



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Luís Fernando Kidinho Araújo dos Santos

**Desempenho Térmico e Energético de Residências Unifamiliares
Protegidas pelo Solo na Região Sul do Brasil**

Florianópolis - SC

2023

Luís Fernando Kidinho Araújo dos Santos

**Desempenho Térmico e Energético de Residências Unifamiliares
Protegidas pelo Solo na Região Sul do Brasil**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Enedir Ghisi, Ph.D.

Florianópolis - SC

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Luís Fernando Kidinho Araújo dos
Desempenho Térmico e Energético de Residências Unifamiliares
Protegidas pelo Solo na Região Sul do Brasil / Luís Fernando Kidinho Araújo
dos Santos ; orientador, EneDir Ghisi, 2023.
169 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis,
2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Desempenho térmico e energético. 3. Arquitetura
subterrânea. 4. Região Sul. 5. Geotermia. I. Ghisi, EneDir. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

Luís Fernando Kidinho Araújo dos Santos

**Desempenho Térmico e Energético de Residências Unifamiliares
Protegidas pelo Solo na Região Sul do Brasil**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 11 de dezembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Marlon Leão, Dr.

Universidade do Estado de Mato Grosso

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.



Prof^a Fernanda Fernandes Marchiori, Dr^a

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof. EneDir Ghisi, Ph.D.

Orientador

Florianópolis, 2023

Agradecimentos

Aos meus pais, Marcia e Luizinho, e minha irmã, Luana, pela incansável demonstração de apoio afetivo, apoio psicológico e suporte financeiro ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença constante e encorajamento são inestimáveis, e é graças à sua presença e apoio que pude perseguir e alcançar meus objetivos acadêmicos.

Ao professor e orientador, EneDir Ghisi, desejo expressar apreciação por suas contribuições valiosas e revisões criteriosas neste trabalho. Sou grato por sua orientação e sabedoria compartilhada.

À colega Laura Leite, reconheço seu incentivo constante, amizade e assistência ao longo deste período acadêmico. Sua colaboração e apoio foram inestimáveis.

Aos colegas de laboratório, Marina, Jéssica, Joana e João, desejo expressar minha gratidão pela companhia inspiradora, contribuições intelectuais e pelas alegres risadas diárias que tornaram os dias de pesquisa mais produtivos e agradáveis.

Ao professor Alberto Hernandez Neto, minha gratidão por suas valiosas contribuições tanto no âmbito do programa *EnergyPlus* quanto na investigação relacionada ao estudo do solo.

À professora Sueli Yoshinaga Pereira, pelos significativos aportes durante o processo de qualificação de mestrado, especialmente no campo de estudos de geologia, que ampliaram dos meus conhecimentos sobre o tema e na concretização deste trabalho.

À professora Ana Paula Melo, expresse minha gratidão pela contribuição no texto de qualificação e pelo suporte na utilização do programa *EnergyPlus*.

Aos professores Deivis Marinoski e Marlon Leão, meus agradecimentos por suas contribuições críticas e por aceitarem generosamente participar da avaliação deste trabalho. Suas análises e sugestões enriqueceram consideravelmente este estudo.

Aos amigos Clara e Leonardo, cujo apoio e amizade têm sido constantes, mesmo em meio à distância geográfica, agradeço profundamente por estarem sempre ao meu lado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), reconheço o apoio financeiro concedido no primeiro ano deste mestrado.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os que, de maneira direta ou indireta, contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho de pesquisa. Minha gratidão é imensa e, sem dúvida, esta jornada de pesquisa não teria sido possível sem o apoio e a orientação generosos de todos vocês.

Resumo

Estruturas subterrâneas, historicamente refúgios, são empregadas na construção civil para proteção e eficiência energética. O solo, ao absorver calor solar, regula a temperatura, adaptando-se a diferentes ambientes. Sua constância térmica facilita a troca de calor, tornando-a uma estratégia versátil para aquecimento no inverno e resfriamento no verão. Esta pesquisa avalia o desempenho térmico e energético de residências unifamiliares utilizando o solo como estratégia bioclimática passiva na Região Sul do Brasil. Realizaram-se simulações e análises térmicas e energéticas conforme as diretrizes da NBR 15575-1, que estabelece critérios de desempenho térmico em nível mínimo, intermediário e superior. As simulações ocorreram em 40 cidades nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, visando um resultado final mais preciso. O programa *EnergyPlus* foi empregado na criação de modelos, incluindo um na superfície e outros variando a porcentagem de contato direto com o solo, como um modelo semissubterrâneo (39,0% de área em contato) e um modelo subterrâneo (55,0%). Para os modelos com contato com o solo, a ventilação e iluminação naturais foram asseguradas por um pátio externo na fachada sul. As simulações visaram avaliar o percentual de horas com temperatura operativa, temperatura operativa máxima e mínima, além da redução da carga térmica total. Comparando com residências na superfície, 30,0% das semissubterrâneas não atingiram o desempenho térmico mínimo, 50,0% atenderam o mínimo, 15,0% alcançaram o intermediário, e 5,0% atingiram o nível superior. Nas residências subterrâneas, 60,0% não cumpriram os requisitos mínimos, 22,5% atingiram o mínimo, 5,0% alcançaram o intermediário, e 12,5% obtiveram aprovação no nível superior. Regiões do norte, noroeste, oeste e leste do Paraná, além do nordeste de Santa Catarina, apresentaram maior concentração de aprovação no nível superior. O Estado do Rio Grande do Sul não obteve aprovações nesse nível. Devido ao clima temperado predominante na maioria da Região Sul, desaconselha-se o uso do solo como estratégia bioclimática passiva. Conclui-se que medidas de proteção do solo em residências unifamiliares são benéficas em áreas de elevadas temperaturas.

Palavras-chave: Desempenho térmico e energético; Arquitetura subterrânea; Região Sul; Geotermia.

Abstract

Subterranean structures, historically utilized as shelters, find application in civil engineering for both protection and energy efficiency. The soil, through solar heat absorption, regulates temperature, adapting to various environments. Its thermal consistency facilitates heat exchange, providing versatility for winter heating and summer cooling. This study evaluates the thermal and energy performance of single-family homes employing soil as a passive bioclimatic strategy in the Southern Region of Brazil. Simulations and thermal and energy analyses were conducted following the guidelines of NBR 15575-1, which sets thermal performance criteria at minimum, intermediate, and superior levels. The simulations took place in 40 cities in the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, and Paraná, aiming for a more accurate final result. The EnergyPlus program was employed to create models, including one at the surface and others varying the percentage of direct soil contact, such as a semisubterranean model (39.0% contact area) and an underground model (55.0%). For models with soil contact, natural ventilation and illumination were ensured through an external patio on the south façade. Simulations aimed to evaluate the percentage of hours with operative temperature, maximum and minimum operative temperature, and total thermal load reduction. Comparatively, concerning surface-built houses, 30.0% of semisubterranean homes did not meet the minimum thermal performance, 50.0% met the minimum, 15.0% reached intermediate, and 5.0% achieved superior levels. In underground houses, 60.0% did not meet minimum requirements, 22.5% met the minimum, 5.0% reached intermediate, and 12.5% obtained approval at the superior level. The northern, northwest, west, and east regions of Paraná, as well as the northeast of Santa Catarina, showed a higher concentration of approval in higher education. The state of Rio Grande do Sul did not obtain approvals at this level. Due to the predominant temperate climate in most of the Southern Region, the use of soil as a passive bioclimatic strategy is discouraged. It is concluded that soil protection measures in single-family homes are beneficial in areas with high temperatures.

Keywords: Thermal and energy performance; Underground architecture; Southern Region; Geothermal.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Tipos climáticos de Köppen-Geiger da Região Sul do Brasil | 24 |
| Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro | 25 |
| Figura 3 - Variação de profundidade em edifícios subterrâneos | 29 |
| Figura 4 - Variação de aberturas para edifícios subterrâneos | 30 |
| Figura 5 - Variação de plano de corte do solo para edifícios subterrâneos | 30 |
| Figura 6 - Variação do teor de umidade do solo | 38 |
| Figura 7 - Transferência de calor interno para o solo | 39 |
| Figura 8 - Planta baixa da residência subterrâneas chinesas | 42 |
| Figura 9 - Diferentes acessos da residência subterrânea chinesa | 42 |
| Figura 10 - Casa subterrânea em Matmata, Tunísia | 43 |
| Figura 11 - Corte esquemático da residência com o <i>Shavadoon</i> | 44 |
| Figura 12 - Residência de pátio rebaixado no Irã | 44 |
| Figura 13 - Estrutura subterrânea ou “buracos de bugre” do povo Jê do Sul .. | 47 |
| Figura 14 - Projeto da residência protegida pelo solo na ilha de Kea, Grécia . | 50 |
| Figura 15 - Consumo de energia elétrica para resfriamento e aquecimento na residência da superfície e subterrânea | 51 |
| Figura 16 - Edifício completamente submerso simulado na Malásia | 54 |
| Figura 17 - Corte esquemático e perspectiva da residência e o contato com o solo | 56 |
| Figura 18 - Variação na orientação solar na residência com o contato com o solo | 57 |
| Figura 19 - Fluxograma do método do pré-processamento | 72 |
| Figura 20 - Fluxograma do método da simulação | 73 |
| Figura 21 - Fluxograma do método do pós-processamento | 73 |
| Figura 22 - Mapa de condutividade térmica do solo da Região Sul do Brasil .. | 74 |
| Figura 23 - Alteração no <i>layout</i> do modelo de residência | 76 |
| Figura 24 - Planta baixa da residência simulada | 77 |
| Figura 25 - Corte esquemático da residência da superfície simulada | 79 |
| Figura 26 - Corte esquemático da residência semissubterrânea simulada | 79 |
| Figura 27 - Corte esquemático da residência subterrânea simulada | 79 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28 - Cidades selecionadas para as simulações das residências | 82 |
| Figura 29 - Período de utilização de ventilação natural | 85 |
| Figura 30 - Período de utilização de ar-condicionado | 86 |
| Figura 31 - Período de ocupação | 87 |
| Figura 32 - Período do sistema de iluminação | 87 |
| Figura 33 - Período de equipamento | 87 |
| Figura 34 - Método de cálculo do <i>GroundDomain</i> aplicado na residência da superfície | 91 |
| Figura 35 - Método de cálculo do <i>GroundDomain</i> aplicado na residência semissubterrânea | 91 |
| Figura 36 - Método de cálculo do <i>GroundDomain</i> aplicado na residência subterrânea | 91 |
| Figura 37 - Temperatura média anual externa de bulbo seco | 99 |
| Figura 38 - Temperatura média anual do solo da Região Sul | 100 |
| Figura 39 - Temperaturas média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 25°28'1"S | 101 |
| Figura 40 - Temperaturas média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 25°31'12"S a 27°24'50"S | 102 |
| Figura 41 - Temperaturas média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 29°20'6"S | 103 |
| Figura 42 - Temperaturas média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 29°41'2"S a 33°41'27"S | 104 |
| Figura 43 – Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Nova Tebas | 105 |
| Figura 44 – Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Foz de Iguaçu | 106 |
| Figura 45 – Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Joinville | 107 |
| Figura 46 – Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Florianópolis | 108 |
| Figura 47 – Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Porto Alegre | 109 |
| Figura 48 – Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Uruguaiana | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figura 49 – Comparação entre os percentuais de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana | 110 |
| Figura 50 – Comparação entre as temperaturas operativas máximas em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana | 111 |
| Figura 51 – Comparação entre as temperaturas operativas mínimas em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana | 112 |
| Figura 52 – Comparação entre o consumo geral de energia em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana | 113 |
| Figura 53 – Comparação entre a temperatura operativa máxima de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 27°24'50"S | 115 |
| Figura 54 – Comparação entre a temperatura operativa máxima de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 33°41'27"S | 115 |
| Figura 55 – Comparação entre a temperatura operativa mínima de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 27°24'50"S | 116 |
| Figura 56 – Comparação entre a temperatura operativa mínima de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 33°41'27"S | 116 |
| Figura 57 – Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 27°24'50"S | 117 |
| Figura 58 – Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 33°41'27"S | 118 |
| Figura 59 – Cidades onde as residências atingiram e não atingiram o nível mínimo de desempenho térmico | 119 |
| Figura 60 – Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (Δ PHFT) com o percentual mínimo (Δ PHFT _{min}) das residências semissubterrâneas | 121 |
| Figura 61 – Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (Δ PHFT) com o percentual mínimo (Δ PHFT _{min}) das residências subterrâneas | 122 |
| Figura 62 – Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências semissubterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT _{min}) do nível intermediário | 123 |

| | |
|---|-----|
| Figura 63 – Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências subterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT _{min}) do nível intermediário | 124 |
| Figura 64 – Cidades onde as residências atingiram e não atingiram o nível intermediário de desempenho térmico | 125 |
| Figura 65 – Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências semissubterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT _{min}) do nível superior | 127 |
| Figura 66 – Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências subterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT _{min}) do nível superior | 128 |
| Figura 67 – Cidades onde as residências atingiram e não atingiram o nível superior de desempenho térmico | 129 |

Lista de Equações

| | |
|---|-----|
| Equação 1 - Cálculo de temperatura do solo de Kusuda e Achenbach | 60 |
| Equação 2 - Cálculo de evapotranspiração da grama padronizada para superfícies curtas e longas | 61 |
| Equação 3 - Cálculo do percentual mínimo de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa | 120 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Condutividade térmica por cidades | 80 |
| Tabela 2 - Variabilidade de condutividade térmica por cidades selecionadas | 81 |
| Tabela 3 - Propriedades dos materiais das residências simuladas | 83 |
| Tabela 4 - Absortância dos materiais das residências simuladas | 83 |
| Tabela 5 - Propriedades do vidro das janelas | 84 |
| Tabela 6 - Propriedades das esquadrias das janelas | 84 |
| Tabela 7 - Consumo anual de energia por metro quadrado da residência semissubterrânea e subterrânea | 126 |
| Tabela 8 - Propriedades térmicas e geográficas das cidades que atingiram o nível superior em desempenho térmico | 130 |
| Tabela 9 - Caracterização das zonas bioclimáticas brasileiras | 148 |
| Tabela 10 - Propriedades térmicas e geográficas das cidades selecionadas | 150 |
| Tabela 11 - Temperatura média mensal do solo | 153 |
| Tabela 12 - Nível mínimo de desempenho térmico do modelo semissubterrâneo | 156 |
| Tabela 13 - Nível mínimo de desempenho térmico do modelo subterrâneo . | 160 |
| Tabela 14 - Nível intermediário de desempenho térmico do modelo semissubterrâneo | 163 |
| Tabela 15 - Nível intermediário de desempenho térmico do modelo subterrâneo | 167 |
| Tabela 16 - Nível superior de desempenho térmico do modelo semissubterrâneo | 168 |
| Tabela 17 - Nível superior de desempenho térmico do modelo subterrâneo . | 169 |

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1. Justificativa | 20 |
| 1.2. Objetivos | 22 |
| 1.2.1. Objetivo geral | 22 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 22 |
| 1.3. Estrutura do trabalho | 23 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 24 |
| 2.1. Aspectos climáticos | 24 |
| 2.1.1. Zonas bioclimáticas brasileiras | 25 |
| 2.1.2. Clima da Região Sul | 27 |
| 2.1.3. Edifício subterrâneo e o clima | 28 |
| 2.2. Aspectos geológicos | 33 |
| 2.2.1. Temperatura do solo | 36 |
| 2.2.2. Umidade do solo | 37 |
| 2.2.3. Edifício subterrâneo e o solo | 38 |
| 2.3. Historiografia da arquitetura subterrânea | 41 |
| 2.4. Simulações computacionais e análises térmicas em edifícios subterrâneos | 48 |
| 2.5. <i>EnergyPlus</i> e métodos de cálculo | 58 |
| 2.6. Paisagem e estética construtiva | 62 |
| 2.7. Impacto construtivo e ambiental | 64 |
| 2.8. Síntese da revisão de literatura | 68 |
| 3. MÉTODO | 72 |
| 3.1. Pré-processamento | 73 |
| 3.1.1. Propriedades do solo | 74 |
| 3.1.2. Unidade habitacional | 76 |
| 3.1.3. Cidades | 79 |
| 3.1.4. Propriedades dos materiais | 83 |
| 3.1.5. Ar-condicionado e ventilação natural | 84 |
| 3.1.6. Cargas térmicas | 86 |
| 3.2. Simulação | 88 |
| 3.2.1. Localização | 88 |
| 3.2.2. Dias típicos | 88 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.3. Períodos extremos e típicos | 89 |
| 3.2.4. Temperatura do solo profundo | 89 |
| 3.2.5. Temperatura do solo não perturbado | 89 |
| 3.2.6. Trocas de calor pelo piso e paredes | 90 |
| 3.2.7. Programação de horários | 92 |
| 3.2.8. Materiais e construção de superfícies | 92 |
| 3.2.9. Pessoas, iluminação e equipamentos | 93 |
| 3.2.10. Ar-condicionado e ventilação natural | 93 |
| 3.2.11. Dados de saída | 94 |
| 3.3. Pós-processamento | 94 |
| 3.3.1. Critérios de análise da NBR 15575-1 | 94 |
| 3.3.2. Desenvolvimento de mapas no programa QGIS | 97 |
| 4. RESULTADOS | 99 |
| 4.1. Caracterização do clima | 99 |
| 4.2. Temperatura do solo | 100 |
| 4.3. Desempenho térmico e energético | 105 |
| 4.4. Nível mínimo de desempenho térmico | 114 |
| 4.5. Nível intermediário de desempenho térmico | 120 |
| 4.6. Nível superior de desempenho térmico | 126 |
| 4.7. Discussão | 131 |
| 5. CONCLUSÃO | 133 |
| 5.1. Limitações do trabalho | 135 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros | 136 |
| REFERÊNCIAS | 137 |
| ANEXOS | 132 |
| Anexo A – Zonas bioclimáticas brasileiras | 148 |
| Anexo B – Propriedades das cidades..... | 150 |
| APÊNDICES | 152 |
| Apêndice A - Temperatura do solo | 153 |
| Apêndice B - Nível mínimo de desempenho térmico..... | 156 |
| Apêndice C - Nível intermediário de desempenho térmico..... | 163 |
| Apêndice D - Nível superior de desempenho térmico | 168 |

1. INTRODUÇÃO

Na problemática abrangendo a questão do aquecimento global, a contínua emissão de substâncias poluentes e a utilização de recursos energéticos têm acelerado de maneira crescente as transformações climáticas em curso. A progressiva intensificação do grau de contaminação atmosférica tem sido notável desde o advento da Primeira Revolução Industrial no século XVIII. Entretanto, um ponto de inflexão ocorreu durante a Segunda Revolução Industrial no século XIX, a introdução do petróleo e do gás natural, ocasionando aumento exponencial no patamar de poluição (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2022).

O setor da construção civil apresenta alto consumo de energia e emite significativas quantidades de gases poluentes, com os edifícios contribuindo com cerca de um terço das emissões globais (ROBERT; KUMMERT, 2012). No ano de 2011, os edifícios residenciais foram responsáveis por 6% das emissões mundiais de gases poluentes, e quando considerado o consumo de energia elétrica, esse valor aumenta para 17% das emissões globais (OLIVIER *et al.*, 2013). Observa-se ainda que, conforme indicado por Lamb *et al.* (2021), os edifícios residenciais já representavam 11% das emissões globais em 2018.

A principal causa das alterações térmicas no Planeta Terra reside nos gases poluentes. Segundo as projeções mais pessimistas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC*, sigla em inglês), a temperatura média global poderá aumentar em até 2°C até o ano 2100. O Relatório de 2021 do *IPCC* (FIELD *et al.*, 2012) destaca que, entre 2006 e 2015, de 20% a 40% da população mundial já habitava regiões com temperaturas 1,5°C acima do nível pré-industrial. A menos que ocorra redução substancial na emissão de gases poluentes nas próximas décadas, a elevação da temperatura média global e a intensificação de eventos climáticos extremos se tornarão inevitáveis e irreversíveis.

As alterações no clima global têm desencadeado ocorrências de eventos climáticos extremos, tais como prolongadas secas, chuvas intensas, elevação do nível dos oceanos e perda de diversidade biológica, entre outros efeitos. Essas ocorrências exercem impactos significativos em diversos setores de um país, abrangendo desde a economia até a eficiência na produção de energia, especialmente nas áreas onde há usinas hidrelétricas.

Conforme a Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial atingiu a marca de 8 bilhões em todo o globo, o que acentua ainda mais os desafios inerentes à mitigação das mudanças climáticas (ONU NEWS, 2022). O crescimento contínuo da população mundial, em face dos eventos climáticos extremos, tende a resultar em aumento na demanda por energia elétrica. Segundo Ürge-Vorsatz *et al.* (2013), a América Latina deverá dobrar seu consumo de energia até 2050. Nesse contexto, a expansão da geração de energia a partir de fontes renováveis e a redução do consumo atual tornam-se processos relevantes para o ser humano.

O aumento no consumo de energia elétrica no Brasil pode se transformar em um desafio, especialmente diante da crescente ocorrência de crises hídricas e das implicações sobre a geração de eletricidade. No início do século XXI, aproximadamente 90% da energia gerada no país tinha origem em usinas hidrelétricas (JARDIM, 2015). Contudo, o Brasil enfrentou uma crise hídrica que resultou em racionamentos, cortes programados e apagões em diversas localidades. Para enfrentar essa situação, houve um direcionamento de investimentos em diferentes fontes energéticas, o que auxiliou a reduzir a dependência das hidrelétricas.

No entanto, conforme o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), aproximadamente 61,9% da energia gerada no Brasil em 2022 provém de usinas hidrelétricas (BRASIL, 2023a). Isso evidencia a clara dependência do país em relação aos seus corpos d'água e reservatórios. Diante dessa realidade, é perceptível que uma crise hídrica tem o potencial de acarretar desafios significativos no fornecimento energético nacional.

O BEN 2023 (BRASIL, 2023a) relata que o consumo de energia elétrica em edifícios residenciais correspondeu a 27% do consumo total do país no ano de 2022. Ademais, é possível observar um aumento estimado de 237% no consumo de energia elétrica por sistemas de ar-condicionado no período entre 2005 e 2017, totalizando 18,7 TWh em 2017. A EPE prevê crescimento anual de 5,4% no consumo de energia elétrica para esse fim, atingindo 48 TWh até 2035 (BRASIL, 2018).

A produção de eletricidade a partir de fontes renováveis vem ganhando cada vez mais relevância, sendo fundamental para suprir o aumento na demanda e reduzir a emissão de poluentes. Segundo o BEN, a produção de eletricidade por meio de fontes renováveis apresentou crescimento nos últimos anos (BRASIL, 2023a). A capacidade instalada em energia solar fotovoltaica, por exemplo, registrou aumento de 66% no Brasil durante 2020 comparado ao ano anterior. Segundo informações do BEN 2023, fontes eólicas representam 11,8% da matriz elétrica brasileira, o bagaço da cana contribui com 4,7% e a fonte solar com 4,4%; há a expectativa de que esses percentuais aumentem nos próximos anos.

A geotermia emerge como uma fonte de energia renovável que pode ser aplicada tanto para fins térmicos quanto para geração de eletricidade, apresentando competitividade frente aos métodos tradicionais como petróleo, gás, carvão e energia hidrelétrica. A distribuição global das áreas ricas em fontes geotérmicas é claramente vinculada a fenômenos vulcânicos e tectônicos que ocorreram ao longo da Era Cenozoica (POPP, 1998).

No Brasil, não há atividade vulcânica suficiente para viabilizar usinas geotérmicas, porém, a exploração direta e ativa das baixas temperaturas do solo profundo pode revelar-se eficaz (ARBOIT *et al.*, 2013). A aplicação com maior potencial seria o aproveitamento para o aquecimento residencial ou industrial, variando conforme a região e as características geológicas locais. Um exemplo prático seria a utilização de bombas de calor com tubulações subterrâneas para proporcionar aquecimento e resfriamento de um edifício.

Soltani *et al.* (2019) relataram que a geotermia, tanto como fonte termal quanto energética, tem sido aproveitada ao longo de séculos. Essa fonte pode ser empregada ativamente, por meio de sistemas de uso direto, aquecimento urbano, geração de energia e bombas de calor, bem como de maneira passiva, como massa térmica incorporada às estruturas dos edifícios. No enfoque passivo, o solo funciona como dissipador de calor durante o verão e fonte de calor durante o inverno. Por conseguinte, a geotermia demonstra sua aplicabilidade tanto em regiões de clima tropical quanto temperado. A abordagem passiva nas edificações se mostra eficaz para enfrentar o alto consumo energético, reduzir e redistribuir as demandas de pico, atenuar a

amplitude térmica interna e diminuir a dependência de combustíveis fósseis (SONG *et al.*, 2021).

As estratégias bioclimáticas passivas podem desempenhar papel fundamental na promoção da adoção de fontes energéticas mais limpas, economicamente viáveis e potencialmente sustentáveis (CALLEJAS *et al.*, 2021). Conforme observado por Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014), a exploração do solo como solução bioclimática passiva já foi empregada em contextos residenciais. No entanto, essa prática tem sido considerada incomum e distante da cultura do *design* moderno.

O subsolo se revela como um local propício para abrigar espaços funcionais e infraestrutura, apresentando impacto ambiental reduzido (BENARDOS; ATHANASIADIS; KATSOULAKOS, 2014). A ideia persistente de que esses espaços são associados a ambientes sujos, úmidos, escuros e perigosos ainda prevalece, solidificando a noção de que ambientes subterrâneos são pouco comuns. Tal percepção encontra suas raízes na utilização da arquitetura subterrânea ao longo do século XX, onde esteve frequentemente ligada ao contexto militar durante períodos de conflito.

Na atualidade, a arquitetura subterrânea é percebida de maneira ampla, carecendo de critérios definidos. São consideradas como arquitetura subterrânea tanto as construções inteiramente enterradas, com um único acesso, quanto aquelas que apresentam interação mínima das paredes com o solo. Desde a década de 1970 até hoje, os edifícios subterrâneos têm o propósito de criar projetos bioclimáticos passivos e sustentáveis, buscando minimizar o consumo energético e proporcionar condições naturalmente confortáveis ao longo de todo o ano.

1.1. Justificativa

O *Homo sapiens* primitivo recorria a cavernas e locais protegidos pelo solo para garantir abrigo, segurança e aquecimento (SOLTANI *et al.*, 2019). Ao longo dos séculos, esses conhecimentos e experiências foram acumulados por diferentes gerações e culturas. Devido aos seus resultados favoráveis, oferece uma base sólida para novas técnicas e futuras aplicações. A ênfase na utilização de arquitetura subterrânea sustentável ganhou destaque na década de 1970,

impulsionada pela mudança do movimento ambientalista de um enfoque emocional para uma abordagem mais radical, além da Crise do Petróleo em 1973. Hoje, surge a necessidade de explorar o potencial da geotermia como solução bioclimática passiva e considerar seus possíveis impactos no desempenho térmico e energético de residências unifamiliares.

Durante os anos 1970, os estudos e a construção de edifícios protegidos pelo solo tiveram aumento significativo devido a fatores políticos e econômicos. Anselm (2008) observou que a busca por eficiência energética alterou a perspectiva em relação ao solo, transformando-o de um simples suporte estrutural em um componente utilizado para a dissipação e absorção de energia térmica. A redução no consumo de energia proporcionada por essa abordagem construtiva está associada ao fato de que os edifícios não ficam expostos à radiação solar direta e à diferença de temperatura entre o solo e o ar. A aplicação da geotermia como abordagem bioclimática passiva tem sido adotada em diversas nações, climas e escalas variadas.

No território brasileiro, o povo indígena Jê-do-Sul já implementava construções semissubterrâneas como forma de enfrentar os desafios climáticos desde 1750 a.C. (LA SALVIA, 1983). Essas edificações foram identificadas nas regiões Sul e Sudeste do país. Com a profundidade de um metro e meio abaixo da superfície, tais construções visavam ao controle da temperatura interna e à proteção contra as adversidades climáticas (WEIMER, 2012). A caracterização climática para essas áreas é de subtropical úmido (*Cfa*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger).

O progresso das simulações computacionais auxiliou as análises de residências construídas abaixo do nível do solo. A investigação acerca desse tópico vem experimentando um aumento em âmbito nacional. Em um estudo conduzido por Souza, Amparo e Gomes (2011), foi examinada a influência da inércia térmica do solo em um projeto residencial localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais. De forma mais recente, uma abordagem foi apresentada por Callejas *et al.* (2021), que conduziram uma pesquisa analisando a viabilidade do resfriamento passivo em uma habitação popular na cidade de Cuiabá, Mato Grosso.

Além das investigações fundamentadas em simulações computacionais, alguns autores, como Bakoosh, Arslangazi e Asilsoy (2021) e Milanovic, Folic e Folic (2018), conduziram medições das temperaturas externa e interna para corroborar a eficácia de edifícios edificados abaixo da superfície. Essas medições fortalecem os resultados obtidos nas simulações, evidenciando que a utilização do solo como massa térmica para proteção de edificações confere benefícios significativos tanto em termos térmicos quanto energéticos.

Neste trabalho, foram investigadas residências unifamiliares construídas abaixo do nível do solo em diferentes partes do Brasil. Utilizando simulações computacionais, foi possível examinar o desempenho térmico e energético dessa técnica construtiva na Região Sul do país. Os resultados obtidos ajudam na avaliação da viabilidade dessa técnica específica nesse contexto geográfico brasileiro.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho térmico e energético de residências unifamiliares que utilizam o contato com o solo como solução bioclimática passiva na Região Sul do Brasil.

1.2.2. Objetivos específicos

Alguns aspectos específicos são necessários para compreensão do tema e para uma análise mais detalhada dos resultados obtidos. Os aspectos consistem em:

- a) Analisar a temperatura operativa das residências unifamiliares protegidas pelo solo;
- b) Analisar a variação da temperatura do solo na Região Sul;
- c) Analisar a redução de carga térmica total nas residências unifamiliares protegidas pelo solo que utilizam ar-condicionado;
- d) Mapear e indicar áreas que tenham maior aproveitamento no uso da geotermia como solução bioclimática passiva.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho se estrutura em cinco capítulos distintos, a saber: introdução, revisão de literatura, método, resultados e conclusão. O primeiro capítulo introduz o tema de estudo, fornecendo justificativas sólidas e delineando os objetivos que norteiam este trabalho. No segundo capítulo apresenta a revisão de literatura, oferecendo ao leitor maiores detalhes do tema, ao mesmo tempo que apresenta pesquisas correlatas e seus resultados.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia adotada para alcançar os objetivos desta investigação, mostrando tanto os dados empregados quanto as configurações internas do programa *EnergyPlus*, utilizado para as análises. O quarto capítulo expõe os resultados obtidos, destacando as descobertas derivadas desta pesquisa. Por fim, o quinto capítulo apresenta a conclusão da dissertação, as limitações deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

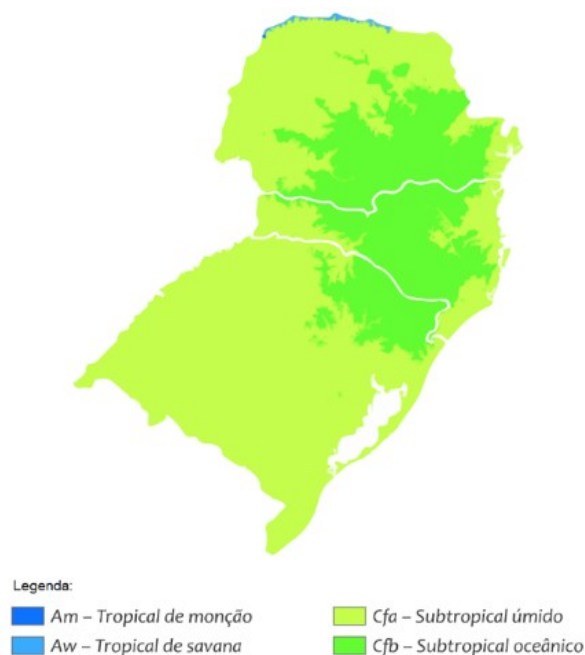
2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi organizada em oito seções, relatando os aspectos climáticos, aspectos geológicos, historiografia da arquitetura subterrânea, simulações computacionais e análises térmicas em edifícios subterrâneos, *EnergyPlus* e métodos de cálculo, paisagem e estética construtiva, impacto construtivo e ambiental e a síntese da revisão de literatura.

2.1. Aspectos climáticos

O Brasil abrange a área aproximada de 8,5 milhões de quilômetros quadrados e é amplamente reconhecido por sua dimensão continental. Essa extensão territorial reflete a diversidade de zonas climáticas presentes no país, que variam desde climas tropicais úmidos até regiões semiáridas e subtropicais úmidas. Na Região Sul é encontrada uma combinação de climas subtropicais úmidos, oceânicos, tropicais de monção e de savana (identificados como *Aw*, *Am*, *Cfa* e *Cfb*, respectivamente, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger), conforme mostra a Figura 1. Para definir as características bioclimáticas das diferentes áreas, o território brasileiro foi segmentado em oito zonas distintas conforme as diretrizes da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Figura 1 - Tipos climáticos de Köppen-Geiger da Região Sul do Brasil.



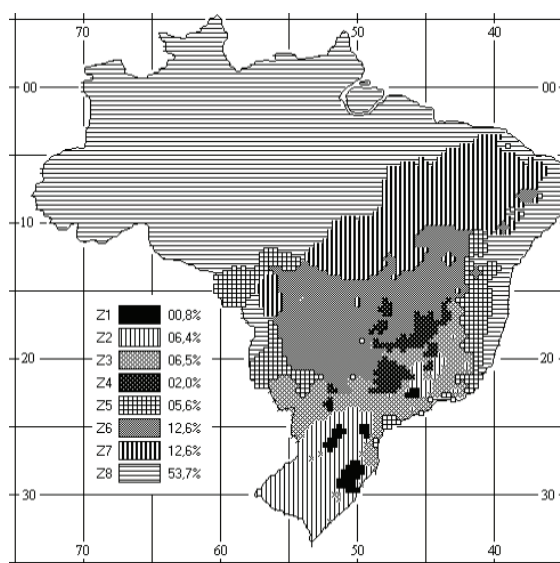
Fonte: Alvares *et al.* (2013).

2.1.1. Zonas bioclimáticas brasileiras

O zoneamento bioclimático do Brasil apresenta a classificação do território nacional conforme os parâmetros estabelecidos na norma técnica NBR 15220. Essa classificação leva em consideração a posição geográfica, temperatura e umidade, sendo esses fatores determinantes para a subdivisão em oito zonas distintas. Conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005), essa divisão foi realizada de maneira a manter uma relativa homogeneidade climática em cada zona, com o intuito de desenvolver um conjunto de técnicas construtivas que otimizem o desempenho térmico das edificações.

Bavaresco *et al.* (2017) apontam para questionamentos em relação a essa divisão, uma vez que existem cidades com características climáticas notavelmente diferentes classificadas na mesma zona. Tal classificação poderia resultar na recomendação equivocada de princípios bioclimáticos para determinados municípios. Em resposta a essa situação, está em andamento uma revisão da norma técnica, com a proposta de dividir as zonas em subzonas, de forma que cada subdivisão corresponda mais precisamente ao respectivo clima e permita a implementação de estratégias otimizadas para aprimorar o desempenho térmico das edificações. A Figura 2 mostra a configuração atual de cada zona bioclimática, juntamente com a distribuição percentual delas em todo o território brasileiro.

Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: ABNT (2005).

Na Região Sul são encontradas as zonas bioclimáticas um, dois, três, quatro, cinco e seis. Nota-se que as zonas bioclimáticas quatro, cinco e seis ocupam uma porção relativamente menor do território nessa região. A caracterização de cada uma dessas zonas é um processo complexo devido às suas variações climáticas, temperaturas e padrões de precipitação distintos. Essa diversidade climática é ilustrada na Tabela 9 no Anexo A, que apresenta a relação entre as zonas bioclimáticas e a classificação de Köppen-Geiger.

A zona bioclimática 8, por sua vez, abrange uma parcela significativa do território nacional, estendendo-se desde a Região Norte até o litoral nordeste do país. Na análise da Tabela 9, é possível constatar a coexistência de quatro tipos de climas distintos nessa mesma zona: *Af* (tropical úmido), *Am* (monçônico), *Aw* (tropical com estação seca no inverno) e *As* (clima tropical com estação seca no verão). A complexidade dessa diversidade climática pode impactar as estratégias construtivas propostas para otimização do desempenho térmico, visto que diferentes climas demandam abordagens distintas.

A norma NBR 15220 (ABNT, 2005) oferece diretrizes para a aplicação de estratégias de condicionamento passivo em todas as zonas bioclimáticas. Projetos que apresentem desempenho térmico insatisfatório são incentivados a realizar ajustes visando aprimorar a eficiência do edifício. A inércia térmica regula as variações de temperatura ao longo do dia, estabelecendo uma relação direta com a troca de calor entre o ambiente externo e o interno. Essa abordagem é destacada pela NBR 15220 (ABNT, 2005) como uma estratégia de condicionamento passivo válida tanto para o inverno quanto para o verão. Especificamente, no contexto do verão, a utilização da inércia térmica é recomendada para o resfriamento de edificações localizadas nas zonas bioclimáticas quatro, seis e sete. No período de inverno, essa estratégia é indicada para as zonas um, dois, três e quatro, contribuindo para o aquecimento eficaz dos edifícios.

A incorporação do solo como elemento de massa térmica para reforçar a inércia térmica emerge como uma estratégia passiva promissora. Conforme Callejas *et al.* (2021), essa abordagem, quando combinada com outras estratégias passivas, tem o potencial de atenuar os desafios climáticos que podem se intensificar no futuro, devido às implicações do aquecimento global em

regiões tropicais. A utilização do solo como escudo térmico para edificações residenciais pode resultar em desempenho positivo em determinadas localidades, contudo, em outras, tal abordagem poderá necessitar da integração com outras estratégias passivas para otimizar ainda mais o desempenho térmico.

2.1.2. Clima da Região Sul

Grimm (2009) destaca que a Região Sul do Brasil é marcada por notáveis contrastes tanto em relação à precipitação quanto à temperatura. Essa diversidade é influenciada tanto pela disposição geográfica da região quanto pelas transições climáticas que ocorrem em suas áreas limítrofes. Quanto à precipitação, a região apresenta distribuição heterogênea: ao norte, prevalece um regime típico de monção, caracterizado pelo início da estação chuvosa na primavera e término durante o outono. Na porção sul, a precipitação é mais uniformemente distribuída ao longo do ano, com maior intensidade durante o inverno. Essa diferenciação também resulta em umidade específica mais elevada na parte sul da região, consequência da maior incidência de chuvas durante o verão.

A configuração geográfica da região é responsável por uma notável variação nas temperaturas ao longo do ano. As serras e o planalto meridional contribuem para um contraste térmico significativo e até possibilitando ocorrências de precipitação em forma de neve, um fenômeno raro no contexto nacional. Além desses fatores geográficos, os fenômenos *El Niño* e *La Niña* também exercem influência marcante sobre os padrões de precipitação e temperatura na Região Sul (GRIMM, 2009). O autor afirma que o ciclo anual de temperatura possui alta amplitude térmica, ou seja, no período entre janeiro e julho, a temperatura média do ar pode variar 11°C no sul e 7°C no norte da região. Essa variação é decorrente da diferença de radiação solar recebida no verão e no inverno em latitudes mais altas (norte da região) do que as mais baixas (sul da região) e da topografia local (GRIMM, 2009).

Durante a estação de inverno, as temperaturas médias no sul e norte da região situam-se em torno de 11°C e 18°C, respectivamente. Nas áreas serranas, é comum observar médias de temperatura ainda mais baixas, devido

ao impacto significativo da topografia, com as elevações mais altas registrando as temperaturas mais baixas. No período de verão, a variação das médias de temperatura segue uma tendência de leste a oeste, apresentando valores médios de aproximadamente 22°C no litoral (leste) e 25°C no extremo oeste. A região de maiores altitudes, por sua vez, mantém médias de temperatura abaixo de 20°C (GRIMM, 2009).

Nas estações de transição, as temperaturas médias exibem semelhanças, mas variam conforme a latitude da região. No sul, por exemplo, o mês de abril registra temperaturas mais quentes do que em outubro, enquanto no extremo norte a tendência é aumentar a temperatura média em outubro em relação a abril. A maior umidade específica observada no sul é atribuída à maior precipitação durante o período de verão (GRIMM, 2009).

2.1.3. Edifício subterrâneo e o clima

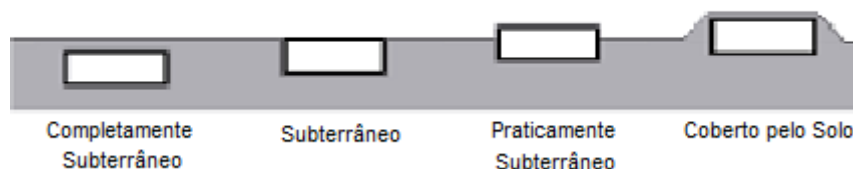
O clima local exerce influência direta sobre a concepção de edifícios subterrâneos. Conforme Van Dronkelaar *et al.* (2014), o clima desempenha papel importante no potencial de economia de energia proporcionado por edificações subterrâneas. Esse fator determinará tanto a temperatura ambiente externa quanto a temperatura do solo nas camadas subterrâneas. No entanto, é importante observar que a temperatura do solo também é afetada por outros elementos além do clima externo, não se limitando apenas a essa influência. A relação entre o clima e o edifício subterrâneo está conectada à sua tipologia construtiva. Wright (2012) apresenta uma análise das variáveis que diferenciam os modelos construtivos subterrâneos, como a profundidade (Figura 3), aberturas (Figura 4) e plano de corte no terreno (Figura 5).

O nível do edifício tem influência direta na extensão da área externa em contato com a radiação solar e as trocas convectivas do ar. No caso de um modelo completamente submerso no solo, não há contato direto com o ambiente externo, visto que ele fica isolado pelo solo circundante. Nesse cenário, as trocas térmicas ocorrem principalmente por condução entre o solo e a estrutura do edifício, o que modifica a temperatura interna. A espessura do solo acima da cobertura do edifício completamente subterrâneo determina o grau de intercâmbio térmico com o ambiente externo. Essa troca é influenciada pela

interferência climática até uma profundidade mínima local (POKORSHA-SILVA *et al.*, 2014; MUKHTAR; NG; YUSOFF, 2018; HAIT, 1985; BENARDOS; ATHANASIADIS; KATSOULAKOS, 2014).

Nos modelos subterrâneo e praticamente subterrâneo, ocorrem trocas térmicas tanto com o solo quanto com o ambiente externo, incluindo exposição à radiação solar, convecção do ar e evapotranspiração do solo. Cada modelo sofre interferência conforme a quantidade de área exposta ao ambiente externo. No caso do modelo coberto pelo solo, onde uma camada mais fina de solo protege o edifício, há influência climática externa, mas em menor escala, pois não está totalmente exposto às intempéries, principalmente à radiação solar.

Figura 3 – Variação de profundidade em edifícios subterrâneos.



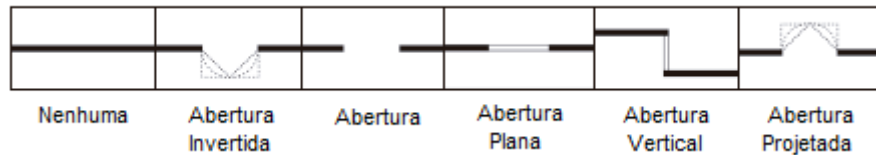
Fonte: adaptado de Wright (2012).

As aberturas em edifícios subterrâneos desempenham papel importante em relação ao acesso, iluminação natural, ventilação e trocas térmicas. A forma e a orientação geográfica das aberturas determinam a quantidade de luz, vento e calor que penetram no interior do edifício. A Figura 4 ilustra diferentes tipos de aberturas para edifícios subterrâneos: ausência de abertura, abertura invertida, abertura, abertura plana, abertura vertical e abertura projetada.

O primeiro modelo retrata um edifício sem nenhuma abertura, completamente isolado pelo solo, exceto por uma entrada de acesso. Esse tipo de tipologia, sem aberturas, era frequentemente empregado em *bunkers* militares do século passado. A abertura invertida ocorre quando a abertura do edifício é projetada abaixo do nível da superfície do solo. Na terceira variação, abertura, não há barreira entre o interior e o exterior, resultando em um edifício subterrâneo com um pátio aberto. Na abertura plana, uma proteção separa o edifício do ambiente externo. A abertura vertical se situa nas laterais do edifício,

proporcionando acesso ao nível do solo. Por fim, o modelo com abertura projetada é aquele em que a abertura protegida é posicionada acima da superfície do solo.

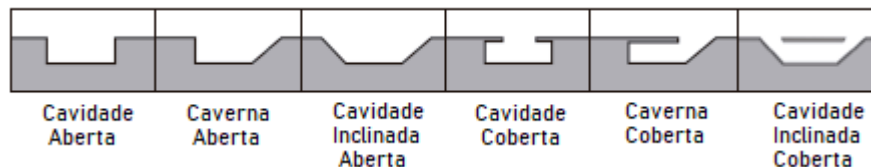
Figura 4 - Variação de aberturas para edifícios subterrâneos.



Fonte: adaptado de Wright (2012).

A Figura 5 mostra os diferentes planos de corte que podem ser adotados em edifícios subterrâneos. A escolha do plano de corte e a inclinação do terreno influenciam a maneira como o edifício se integra ao ambiente externo. Ao combinar as variáveis de profundidade, abertura e plano de corte no solo, é possível conceber diversas tipologias de edifícios subterrâneos que fazem uso do solo como estratégia bioclimática passiva.

Figura 5 - Variação de plano de corte do solo para edifícios subterrâneos.



Fonte: adaptado de Wright (2012).

A configuração arquitetônica do edifício subterrâneo exerce influência direta tanto no desempenho energético quanto na estrutura do mesmo. Conforme apontado por Hait (1985) e pelo Departamento de Energia dos EUA (U.S., 1997), as principais tipologias de edifícios subterrâneos são a Planta Pátio, o Plano Elevado e o Plano *Bermed*. A Planta Pátio envolve um edifício completamente imerso no solo, formando uma cavidade coberta com abertura desprotegida, sendo mais eficaz em climas áridos. O Plano Elevado caracteriza-se por um edifício coberto pelo solo com abertura vertical, onde o solo envolve

quase todas as paredes, criando uma massa térmica que retém calor, sendo mais apropriado para climas temperados. Por sua vez, o Plano *Bermed* refere-se a um edifício com parte das paredes cobertas pelo solo, regulando a temperatura dos espaços adjacentes, sendo geralmente localizado em áreas montanhosas.

Para além da influência da radiação solar, a configuração arquitetônica do edifício subterrâneo interfere em outros fatores climáticos, tais como a ventilação natural e a precipitação. A ausência de ventilação natural em edifícios subterrâneos pode levar à criação de ambientes abafados e úmidos, o que representa um problema significativo para a saúde humana e a propagação de doenças. Embora possa parecer incomum associar a ventilação natural a esses espaços, existem exemplos de edifícios subterrâneos projetados com foco na ventilação. Isso é evidenciado pelas residências subterrâneas no norte da China (ANSELM, 2008) e abrigos subterrâneos na Malásia (MUKHTAR; NG; YUSOFF, 2018), que demonstram a importância desse aspecto.

A arquitetura subterrânea vernacular no Irã, por exemplo, integra ambientes subterrâneos ventilados naturalmente durante a noite (HAZBEI *et al.*, 2015). Os edifícios que adotam essa abordagem possuem janelas que são fechadas durante o dia, devido ao clima quente e árido da região. No entanto, à noite, essas janelas são abertas para capturar o vento frio, conduzido para o interior do ambiente subterrâneo. Devido à maior densidade do ar frio, ele se movimenta naturalmente, seguindo para esses espaços internos. Além disso, o contato com o solo auxilia na manutenção desse ar frio ao longo do período diurno, contribuindo para um ambiente mais confortável e adequado (HAZBEI *et al.*, 2015).

O vapor de água presente no ar externo, que geralmente é mais quente e úmido, pode condensar ao entrar em contato com um solo de temperatura mais baixa (GEIGER, 1961). Esse processo de mudança de estado físico influencia tanto a temperatura quanto a condutividade térmica do solo. Conforme Tan *et al.* (2018), a elevada umidade do ar pode reduzir o potencial de economia de energia em edifícios subterrâneos. Os autores conduziram um estudo na China, onde analisaram o conforto térmico dos ambientes subterrâneos. Além de medir a temperatura e a umidade, Tan *et al.* (2018) também realizaram entrevistas com

os ocupantes desses espaços, buscando avaliar a sensação de conforto e aspectos psicológicos relacionados.

Em cidades como Xangai, situada à beira-mar e caracterizada por alta umidade, a temperatura dentro dos edifícios subterrâneos acabou sendo afetada, ultrapassando os níveis aceitáveis. Por outro lado, na cidade de Nanjing, localizada mais no interior e com menor umidade, os ambientes subterrâneos mantiveram-se dentro da faixa considerada confortável para os habitantes locais (TAN *et al.*, 2018).

O movimento natural da água, influenciado pela força da gravidade, tende a fluir em direção aos pontos mais baixos de elevação. A relação entre níveis elevados de precipitação e ambientes subterrâneos habitados apresenta um desafio. Ocorrências de inundações em estações de metrô e estacionamentos subterrâneos são bem conhecidas, especialmente nas áreas urbanas mais densas. No entanto, a flexibilidade da arquitetura subterrânea permite a adaptação de suas estratégias conforme a localização.

Por meio desta revisão de literatura, tornou-se evidente que os modelos de edifícios completamente submersos ou parcialmente submersos tendem a ser construídos em regiões de clima árido. Exemplos dessa abordagem incluem as residências subterrâneas na China, adequadas para o clima frio (ANSELM, 2008), e os espaços subterrâneos no Irã, que enfrenta um clima quente (HAZBEI *et al.*, 2015). A escassez de precipitação permite aos arquitetos liberar a superfície acima para outros usos, enquanto mantêm o edifício camuflado sob o solo.

Em regiões caracterizadas por climas tropical e subtropical, com abundante precipitação, no contexto de edifícios subterrâneos, nota-se preferência por modelos que estão praticamente submersos ou cobertos pelo solo. Exemplos disso incluem as residências semienterradas no Ceará durante a década de 1960, bem como as estruturas semienterradas criadas pelo povo indígena Jê-do-Sul no sul e sudeste do Brasil por volta de 1750 a.C. (WEIMER, 2012).

Uma estratégia para mitigar possíveis enchentes em edifícios subterrâneos consiste na implementação de um reservatório subterrâneo superdimensionado equipado com uma bomba hidráulica. O superdimensionamento torna-se necessário para que este edifício subterrâneo esteja preparado para grandes

volumes de água. Esse reservatório pode armazenar o excesso de água por um período determinado, sendo posteriormente utilizado para as necessidades internas do edifício ou redirecionado para sistemas públicos de captação pluvial. Essa abordagem contribui para descentralizar o sistema público de captação, reduzindo a sobrecarga e minimizando os riscos de enchentes.

Essa forma de arquitetura possui a capacidade de se adaptar conforme as características climáticas, topográficas e do solo de cada região. Um exemplo disso é observado na Líbia, onde a arquitetura subterrânea adquiriu diferentes configurações ao longo do território. Nas regiões montanhosas, as habitações adotaram o formato de edifícios completamente subterrâneo com aberturas verticais projetadas para o interior das montanhas. Nas áreas desérticas, as construções compactas foram cobertas pelo solo. Na região costeira, surgiu o conceito de casa pátio, caracterizada por edifícios completamente subterrâneo ou subterrâneo, apresentando aberturas horizontais e sem proteção na cobertura (GABRIL, 2014). Essa versatilidade arquitetônica é evidência de sua habilidade em se harmonizar com as condições específicas de cada localidade.

2.2. Aspectos geológicos

O solo representa uma superfície não consolidada, composta por distintas camadas que se diferenciam em termos físicos, químicos, mineralógicos e biológicos, originando-se ao longo do tempo por meio da interação entre fatores climáticos, materiais de origem, topografia e atividades biológicas. Os desafios mais significativos associados aos solos estão relacionados à sua complexidade e à dificuldade de identificação precisa. Ao obter essa identificação, torna-se possível determinar suas limitações e potencialidades, as quais exercem impacto direto na forma como são gerenciados para um uso apropriado (SHINZATO; FILHO; TEXEIRA, 2008).

Conforme Costa (2004), a crosta terrestre sofre transformações complexas resultantes tanto de influências internas como de fatores externos variáveis, incluindo processos de mistura de massas, deformações e alterações decorrentes desses fenômenos. O equilíbrio térmico do solo emerge a partir dos diversos elementos químicos que moldam as trocas de calor. A camada superficial do solo é impactada por múltiplos fatores, incluindo radiação solar,

fluxo térmico proveniente do interior da Terra, interação com o ar circundante, evaporação e precipitação (GEIGER, 1961).

A radiação solar absorvida pela superfície do solo provém tanto do Sol quanto da atmosfera, resultando na absorção de uma parcela da radiação e na reflexão do restante, juntamente com a emissão de radiação em direção ao céu e ao espaço. Geiger (1961) afirma que o fluxo térmico da Terra flui em direção à superfície e, de maneira recíproca, ocorre da superfície em direção ao interior. No inverno, ocorre transferência de calor de baixo para cima, enquanto no verão ocorre de cima para baixo. A convecção possibilita a troca térmica entre o ar e a superfície do solo, resultando em ganhos ou perdas de calor. A evaporação da água presente no solo também exerce influência sobre a perda de calor durante o processo evaporativo. Além disso, a ocorrência de chuva, dependendo da temperatura, pode igualmente influenciar nas trocas térmicas (GEIGER, 1961).

Para avaliar as influências que afetam o solo, é fundamental considerar diversos fatores. Embora seja possível ponderar sobre o efeito da alta temperatura proveniente do interior da Terra, é válido observar que a taxa de aumento térmico com a profundidade é de aproximadamente 1°C a cada 33 metros (conhecido como grau geotérmico). Essa influência merece atenção principalmente em regiões vulcânicas, próximo de fontes termais ou em situações de incêndios subterrâneos, conforme destacado por Geiger (1961).

Um estudo conduzido por Hausmann (1950) examinou a variação da temperatura do solo em Potsdam, Alemanha, ao longo de dois períodos distintos: 1907-1909 e 1947-1949. No primeiro intervalo, registrou-se alteração de temperatura de aproximadamente 1°C a cada 22 metros, enquanto no segundo período a variação foi de 1°C a cada 12 metros. Tal mudança na taxa do grau geotérmico foi atribuída ao fato de que, entre 1907 e 1909, as temperaturas estiveram abaixo da média da época, marcadas por um rigoroso inverno em 1908. Por outro lado, no intervalo entre 1947 e 1949, os anos foram caracterizados por temperaturas mais elevadas, além de um verão árido e intenso em 1947 (HAUSMANN, 1950).

Conforme Clark (1973), o calor interno da Terra é transferido de duas maneiras principais: irradiação e condução. A irradiação tem lugar em regiões de alta temperatura, como o núcleo e o manto. A condução de energia térmica é

um processo mais frequente na camada mais externa, conhecida como crosta terrestre. Esta parte da Terra, localizada na superfície, tem profundidade média de aproximadamente 40 quilômetros. Nessa camada superficial da crosta terrestre, é possível determinar a variação anual da temperatura do solo e o aumento da temperatura à medida que se aprofunda. Esse aumento é medido pelo grau geotérmico, que possui média de 20°C por quilômetro nas proximidades da superfície (CLARK, 1973).

No contexto nacional, o solo é classificado pela Embrapa no Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SANTOS *et al.*, 2018) conforme a profundidade. A classificação auxilia na compreensão das características do solo em diferentes regiões do país. Essa divisão resulta em quatro categorias distintas:

- I. Solo raso, com profundidade igual ou menor que cinquenta centímetros;
- II. Solo pouco profundo, com profundidade maior que cinquenta centímetros e igual ou menor que um metro;
- III. Solo profundo, com profundidade maior que um metro e igual ou menor que dois metros;
- IV. Solo muito profundo, com profundidade maior que dois metros.

Segundo o Atlas Nacional do Brasil (SANTOS, 2010), o histórico de exploração geotérmica no território brasileiro teve início com a descoberta da Lagoa de Pirapitinga, no município de Caldas Novas, por Sebastião Marinho, em 1545. As primeiras medições de temperatura realizadas nas galerias subterrâneas da mina de Morro Velho, localizada em Nova Lima, Minas Gerais, na década de 1950, constituíram o estudo pioneiro sobre o campo geotérmico no país.

Na década de 1970, ocorreu um substancial investimento financeiro e humano na área mineral, com grande número de pesquisas sendo conduzidas em todo o país, desde a região amazônica até o Rio Grande do Sul, sob a coordenação do Ministério das Minas e Energia. Além disso, contribuíram para esse cenário os estudos realizados por professores universitários, geocientistas, alunos e entidades governamentais e privadas, tanto nacionais quanto estrangeiras (SCHOBENHAUS *et al.*, 1984).

2.2.1. Temperatura do solo

A partir dos princípios fundamentais da segunda lei da termodinâmica formulados por Clausius e Kelvin-Planck, o solo desempenha o papel de absorver o calor proveniente do ambiente externo e utilizá-lo para regular o microclima de edifícios subterrâneos por meio de fluxos de calor. Conforme Badache *et al.* (2016), a temperatura da superfície do solo é influenciada por processos complexos de condução, convecção e radiação tanto em sua proximidade imediata quanto em áreas mais distantes. Além disso, a perda de energia térmica devido à evaporação e as trocas de calor entre a superfície e camadas mais profundas do solo podem determinar a temperatura do solo.

Conforme mencionado por Costa (2004) e corroborado por Pokorska-Silva *et al.* (2022), a temperatura do solo é influenciada por diversos elementos, tais como a estrutura e as propriedades físicas do solo, que abrangem capacidade térmica volumétrica, condutividade térmica, calor latente e umidade do solo. Além disso, variações na temperatura ambiente e características superficiais, como vegetação e orientação do declive, também geram influência. Pokorska-Silva *et al.* (2022) estabeleceram três zonas distintas para a temperatura do solo: a zona adjacente à superfície (temperatura superficial), a camada superficial (temperatura do subsolo) e a zona profunda.

Na área próxima à superfície, a temperatura do solo exhibe flutuações conforme as condições climáticas vigentes. Na camada superficial, essa temperatura é influenciada pelas variações sazonais e tende a se aproximar da média anual da temperatura do ar. Na zona profunda, a temperatura mantém relativa constância, aumentando gradualmente com a profundidade, conforme o gradiente geotérmico local. Pokorska-Silva *et al.* (2022) observaram que, a partir de uma profundidade de um metro e noventa e cinco centímetros, os fatores climáticos externos já não exercem influência significativa na temperatura do solo.

A composição e a coloração exercem influência sobre o padrão térmico do solo. A coloração, em particular, exerce impacto direto sobre a temperatura do solo, desempenhando papel de destaque em diversos processos. Nota-se que solos de tonalidade mais clara têm a tendência de refletir maior quantidade de radiação de ondas curtas. De forma geral, a presença de matéria orgânica em

acúmulo tende a conferir coloração mais escura ao solo. A cobertura natural do solo promove a evapotranspiração e resguarda o solo contra adversidades climáticas, contribuindo para um abrandamento na temperatura do solo.

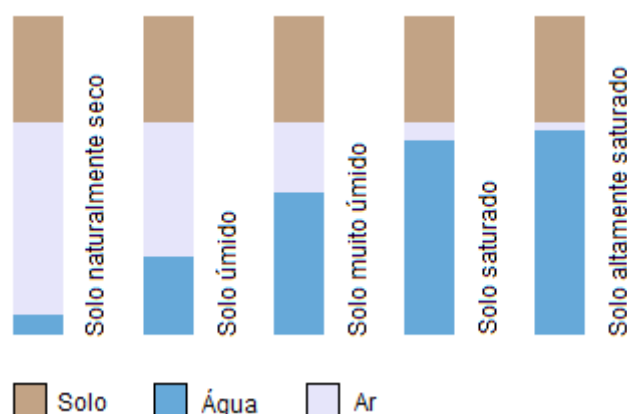
A dimensão dessa cobertura vegetal determina a quantidade de sombreamento e retenção da radiação solar. Em uma pesquisa conduzida por Porto *et al.* (2018), foram realizadas medições de temperatura em dois tipos de solo: um sob a sombra de uma árvore e outro com cobertura vegetal do tipo gramínea. O sensor térmico foi posicionado a uma profundidade de 80 centímetros, situando-se na camada superficial do solo, sujeita a flutuações climáticas. Os resultados revelaram que o solo sob sombreamento apresentava temperatura de 26,5°C, enquanto o solo exposto alcançava 29,5°C.

2.2.2. Umidade do solo

O solo natural é constituído por três componentes fundamentalmente distintos: a própria estrutura do solo, composta por elementos minerais ou orgânicos; água livre, que não mantém ligação química com o solo; e ar, presente nos poros do solo (GEIGER, 1961). A capacidade de condução térmica do solo encontra-se determinada por sua porosidade, teor de umidade e quantidade de matéria orgânica. Aumentos na porosidade acarretam redução na capacidade de condução térmica, sendo mais notável a transição de solos mais densos para solos de menor densidade. Contudo, solos mais densos possuem maior teor de umidade, o que intensifica significativamente a capacidade de condução térmica e, por conseguinte, o fluxo de calor (MOTA, 1981).

Rees, Zhou e Thomas (2001) avaliaram o impacto da saturação do solo no fluxo de calor de estruturas em contato parcial ou total com o solo. A quantidade de umidade presente é influenciada por forças capilares e gravitacionais, bem como pelas condições climáticas circundantes. A condutividade térmica "global" do solo é resultado da interação das condutividades térmicas de seus componentes individuais, como solo, água e ar. Aumentos na proporção de ar nos espaços vazios do solo podem acarretar efeitos significativos na condutividade térmica global, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Variação do teor de umidade do solo.



Fonte: adaptado de Rees, Zhou e Thomas (2001).

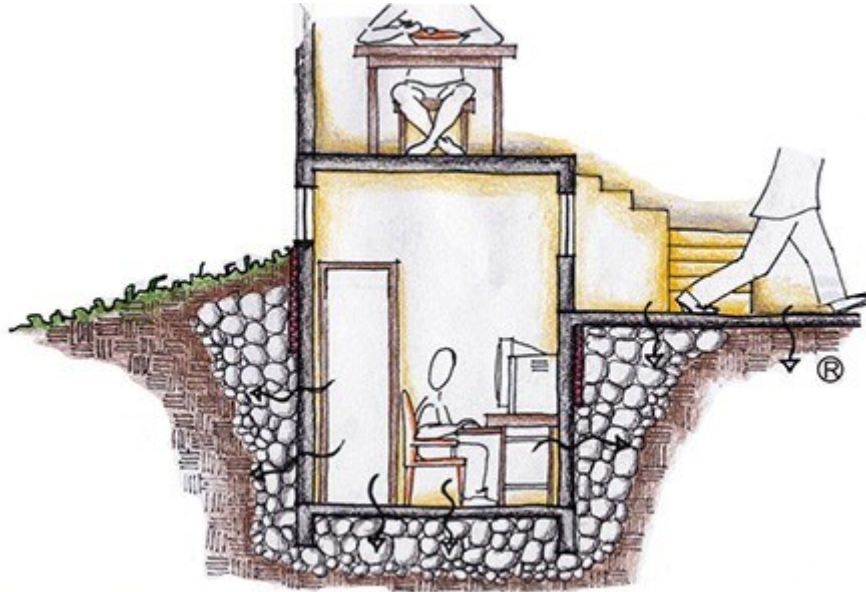
Segundo Rees, Zhou e Thomas (2001), observa-se aumento quase linear na perda de calor para o solo à medida que o lençol freático sobe, entretanto, a distribuição da temperatura não é significativamente afetada por essa elevação. Dessa forma, é possível que programas de simulação computacional que considerem variações no lençol freático demonstrem impacto potencialmente relevante na eficiência energética dos edifícios. Uma alteração do nível do lençol freático, indo de dez metros até a superfície do solo, pode resultar em aumento de até 40% no fluxo de calor entre o solo e uma estrutura profunda com paredes em contato com o solo (REES; ZHOU; THOMAS, 2001).

2.2.3. Edifício subterrâneo e o solo

Conforme Projeção (BRASIL, 2023b), a utilização da massa térmica do solo apresenta vantagens tanto no inverno quanto no verão, uma vez que contribui para reduzir e atrasar as oscilações de temperatura, aproximando o ambiente interno das condições de temperatura média externa. Nos edifícios subterrâneos, a disposição adequada permite que a fundação, o nível inferior e a própria terra em contato com esses elementos atuem como reserva de armazenamento térmico, como mostra a Figura 7. É essencial permitir que a massa da edificação seja exposta à radiação solar durante o inverno e evitar a cobertura das superfícies internas em contato com o solo com materiais isolantes. O controle da umidade é fundamental para prevenir problemas de

condensação, enquanto soluções construtivas devem ser implementadas para evitar o contato direto com a umidade do solo. Ao levar em conta esses aspectos, torna-se possível aproveitar plenamente os benefícios da massa térmica do solo em edifícios subterrâneos, resultando em maior eficiência energética e conforto térmico.

Figura 7 – Transferência de calor interno para o solo.



Fonte: adaptado de Brasil (2023b).

Hait (1983) relatou os elementos que impactam os edifícios subterrâneos, considerando a tipologia, a profundidade, as características térmicas do solo, o isolamento da edificação e a altitude. A tipologia exerce influência na proporção da superfície em contato com o solo, ou seja, uma área maior resulta em maior fluxo de calor entre o solo e a estrutura do edifício. Essa relação também é observada na análise da profundidade, onde a temperatura constante do solo é alcançada a partir de cerca de seis metros, e uma proximidade a esse valor reduz a influência de fatores climáticos externos (HAIT, 1983). As propriedades térmicas do solo, variando em cada local analisado, representam um parâmetro fundamental para prever as transferências de calor provenientes do solo. Enquanto a impermeabilização do edifício se faz necessária para resguardar as estruturas e paredes da umidade do solo, é importante observar que um revestimento impermeável excessivamente espesso pode impactar a

transferência de calor entre o solo e o edifício. Por fim, a altitude, os locais de grande elevação em relação ao nível do mar apresentam temperaturas do solo mais baixas (HAIT, 1983).

Segundo Mukhtar, Ng e Yusoff (2018), o desempenho térmico de edificações subterrâneas está completamente ligado à temperatura do solo, isolamento eficiente, interações com o ambiente térmico natural, configuração vertical e geometria da construção. Milanovic, Folic e Folic (2018) destacam que a análise do desempenho térmico de residências subterrâneas frequentemente explora a relação entre suas características estruturais e térmicas, enquanto dedica menos atenção à interação entre a profundidade do solo, localização do terreno e a zona climática.

No contexto atual, a arquitetura subterrânea emerge com uma crescente conscientização acerca do consumo energético, embasada na sabedoria de construtores anônimos que ao longo dos tempos desenvolveram soluções inovadoras para os desafios habitacionais do século XXI (MILANOVIC; FOLIC; FOLIC, 2018). Esses autores ainda ressaltam que, em regiões de climas temperados, a edificação com algumas paredes em contato com o solo consegue alcançar uma temperatura interna ideal com menor dependência de recursos energéticos alternativos.

Davies, Zoras e Adjali (2001) conduziram uma análise de edifícios caracterizados por uma proporção substancial de área de piso em contato direto com o solo em relação ao volume total. Contudo, deve-se ter cuidado ao avaliar o impacto desse contato com o solo sobre o desempenho térmico da edificação, uma vez que o fluxo de calor proveniente do solo altera o balanço térmico dos ambientes.

Segundo Van Dronkelaar *et al.* (2014), o potencial de economia de energia em edifícios subterrâneos é essencialmente influenciado por uma interação entre dois fatores principais: o clima e a carga térmica. Enquanto o clima determina a temperatura do ar externo e do solo, a carga térmica interna direciona a relação entre a temperatura subterrânea e os pontos de ajuste para aquecimento e resfriamento. As propriedades variáveis do solo exercem influência relativamente pequena na demanda energética, destacando-se que o equilíbrio entre a temperatura subterrânea e as cargas térmicas internas são os fatores

mais relevantes para a redução do consumo de energia (VAN DRONKELAAR *et al.*, 2014).

Regiões onde a temperatura subterrânea se mantém abaixo dos níveis de aquecimento podem oferecer vantagens a edifícios com elevadas cargas térmicas internas, contribuindo para o equilíbrio do balanço térmico e evitando acréscimos na demanda de energia. Segundo Van Dronkelaar *et al.* (2014), a utilidade de um edifício subterrâneo com finalidade esportiva (caracterizada por carga térmica interna elevada) difere conforme o clima: em climas quentes, tal edificação apenas agravaria a necessidade de resfriamento, enquanto em climas frios, demonstraria maior eficácia. Em contraste, para funções residenciais, ocorreria uma situação inversa em relação à função esportiva, uma vez que a carga térmica interna é substancialmente menor.

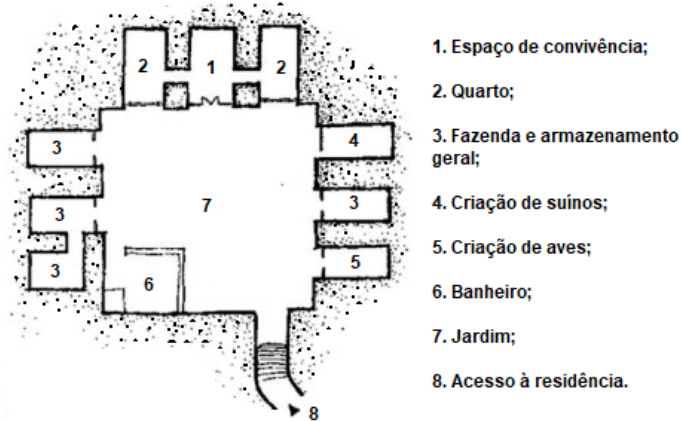
2.3. Historiografia da arquitetura subterrânea

A análise das interações entre civilizações antigas e o meio ambiente é um campo de estudo abordado por diversas disciplinas científicas, reflexo das estruturas sociais e da conexão entre o ser humano e seu entorno (MARQUE *et al.*, 2020). A arquitetura subterrânea, especialmente quanto a edifícios protegidos pelo solo, tem servido como abrigo e defesa contra os elementos climáticos para a humanidade desde épocas pré-históricas. Alkaff, Sim e Efsan (2016) observam que os primeiros indícios do uso dessa abordagem estão presentes em regiões quentes e áridas, sugerindo seu emprego inicial para fins de resfriamento. Contudo, também foram encontradas habitações adotando essa técnica em áreas com invernos de temperaturas negativas.

Anselm (2008) descreveu a descoberta de residências subterrâneas datadas de 2000 a.C. na região de Lianjiazhuang, no noroeste da China. Nessa área, caracterizada por clima continental úmido (classificação *Dfa* de Köppen-Geiger), o inverno apresenta temperaturas negativas. Essas residências, que eram numerosas em toda a extensão da região, empregavam a técnica de construção protegida pelo solo para enfrentar as condições climáticas adversas. O projeto arquitetônico favorecia a ventilação natural, com um pátio central aberto ao ambiente externo, e os espaços individuais eram escavados no

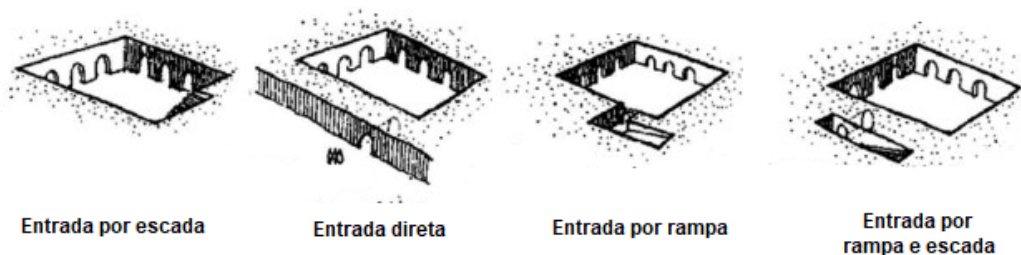
subsolo, conforme mostra a Figura 8. Além disso, os acessos variavam conforme as características da topografia local, conforme representado na Figura 9.

Figura 8 - Planta baixa da residência subterrâneas chinesas.



Fonte: adaptado de Anselm (2008).

Figura 9 - Diferentes acessos da residência subterrânea chinesa.



Fonte: adaptado de Anselm (2008).

De maneira similar às residências chinesas, Alkaff, Sim e Efzan (2016) descreveram a presença de pátios subterrâneos na Tunísia, conforme mostra a Figura 10. Essas residências predominam na aldeia de Matmata, situada em uma região caracterizada por clima quente de deserto (*BWh* na classificação de Köppen-Geiger). Os edifícios residenciais eram escavados diretamente na rocha sólida, visando a proteção contra as variações intensas de temperatura, incluindo o calor extremo durante o dia e o frio noturno.

Figura 10 - Casa subterrânea em Matmata, Tunísia.

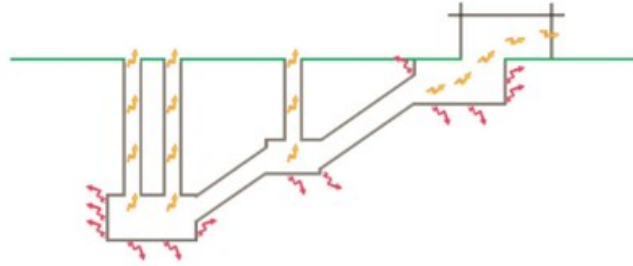


Fonte: Bensemra (2018).

A arquitetura subterrânea no Irã assume várias formas, destacando-se pela utilização do resfriamento passivo geotérmico. De acordo com Attarian e Najjar (2019) e Hazbei *et al.* (2015), essas construções são fruto de experiência e conhecimento popular. O estilo arquitetônico histórico compreende ambientes subterrâneos que variam de cinco a doze metros de profundidade, como evidenciado na Figura 11. Na cidade de Dezful, caracterizada por clima semiárido quente (*BSh* na classificação de Köppen-Geiger), tais ambientes subterrâneos são conhecidos como *Shavadoon*. Devido à sua proximidade com o Golfo Pérsico, a região apresenta umidade média de 50% e temperaturas máximas de até 50°C.

Os edifícios construídos acima da superfície em Dezful consomem cerca de 50-60% de sua energia elétrica para resfriamento mecânico. Em contrapartida, as construções subterrâneas oferecem vantagens como custos de manutenção reduzidos, eficaz amortecimento de ruídos e vibrações, e menor exposição às condições climáticas adversas. Para o funcionamento bem-sucedido do *Shavadoon*, dois fatores essenciais são a estabilidade da temperatura do solo e a ventilação natural, esta última ocorrendo predominantemente durante a noite. Durante as horas noturnas, as janelas são abertas para permitir a entrada de ar fresco, conduzido para os ambientes subterrâneos devido à densidade do ar. Essa estratégia renova o ar interno e estoca uma reserva de ar fresco para o dia seguinte (HAZBEI *et al.*, 2015).

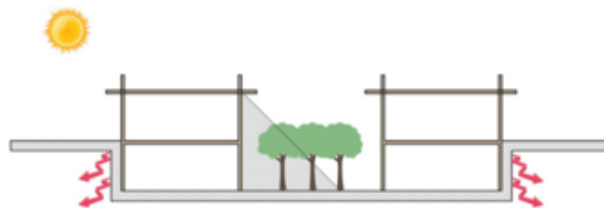
Figura 11 - Corte esquemático da residência com o *Shavadoon*.



Fonte: Vakilinezhad, Mehdizadeh e Mofidi (2013).

Hazbei *et al.* (2015) discutiram a presença de outra tipologia arquitetônica que emprega o contato com o solo como estratégia passiva bioclimática no Irã: as residências com pátio central rebaixado. Essas edificações possuem seu primeiro pavimento em contato direto com o solo, resultando em temperaturas internas mais amenas. O pátio central promove ventilação e iluminação natural, e também incorpora elementos vegetais e espelhos d'água para criar um microclima específico. A Figura 12 mostra um exemplo de residência com pátio central rebaixado, exibindo o fluxo de calor entre o edifício e o solo, além do pátio adornado com vegetação que proporciona sombra.

Figura 12 - Residência de pátio rebaixado no Irã.



Fonte: Vakilinezhad, Mehdizadeh e Mofidi (2013).

Milanovic, Folic e Folic (2018) destacam que os autênticos edifícios subterrâneos se encontram na cidade de Coober Pedy, na Austrália. Situada em uma zona de clima desértico quente (*BWh*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger), a cidade enfrenta noites frias no inverno e calor intenso no verão, com temperaturas variando entre 35°C e 45°C à sombra. Essas condições extremas levaram os habitantes a adotar moradias escavadas nas encostas das

colinas próximas à cidade, onde cerca da metade da população de oito mil pessoas reside abaixo da superfície. Um padrão semelhante de estruturas subterrâneas pode ser observado na vila de Kandovan, no Irã.

Tardif (2017) relatou que no Canadá, mais precisamente na região central da cidade de Montreal, há uma rede de túneis subterrâneos interligados que oferecem proteção às pessoas durante o inverno. Essa área é caracterizada pelo clima continental úmido de verão fresco (*Dfb*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger). Com cerca de 32 quilômetros de extensão, esses túneis ocupam uma área de aproximadamente doze quilômetros quadrados, abrigando conexões com *shoppings*, prédios residenciais, instituições bancárias, museus e outras edificações. A opção pelo deslocamento para o subsolo tem demonstrado ser uma solução eficaz tanto para o planejamento urbano quanto para o consumo energético (TARDIF, 2017).

A Villa Vals é uma unidade habitacional situada na localidade de Vals, na Suíça, desenvolvida em colaboração pelos escritórios de arquitetura CMA e SeARCH. O clima local é caracterizado como tundra (*ET*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger), com uma média anual de temperatura de 0°C. A opção por uma construção subterrânea foi adotada para minimizar o impacto visual sobre a paisagem dos Alpes suíços, resultando, por conseguinte, em melhor controle das condições térmicas internas (VILLA VALS, 2023).

A arquitetura vernacular da Líbia apresenta três tipologias distintas de habitações subterrâneas: os edifícios da região montanhosa, as construções compactas da área desértica e as casas pátio da zona costeira (GABRIL, 2014). Essas habitações eram escavadas diretamente no solo, com os ambientes circundantes mantendo contato com a terra e um pátio central. No caso dos edifícios compactos, uma camada adicional de solo cobre algumas das áreas, visando proporcionar atraso térmico.

Segundo Bakoosh, Arslangazi e Asilsoy (2021), a arquitetura vernacular da Líbia tem sido um elemento intrínseco à vida cotidiana de sua população. A partir da década de 1970, a exploração do petróleo no país atraiu mais estrangeiros ocidentais, o que, por sua vez, introduziu características ocidentais nas construções locais. No entanto, essas novas edificações não compartilhavam vínculos sociais, culturais e climáticos com a Líbia. Diante disso, essas

residências passaram a ser associadas a alto consumo de energia elétrica, uso de recursos não renováveis, poluição e degradação da paisagem natural. A adoção da arquitetura vernacular subterrânea em vez da arquitetura moderna ocidental pode se configurar como uma abordagem para enfrentar os desafios vigentes nos ambientes urbanos do país.

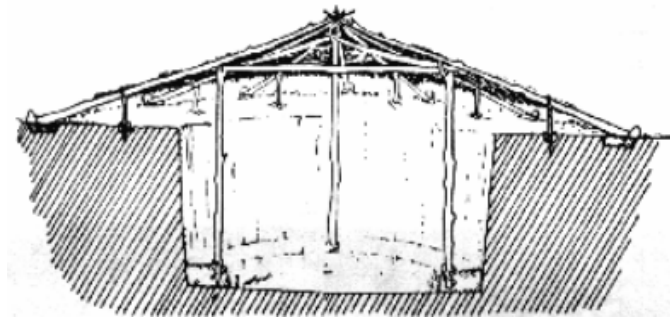
De acordo com Weimer (2012), a prática de construção com proteção do solo pode se manifestar de duas maneiras distintas: seja por meio da escavação de um buraco vertical no solo, seja por meio da criação de uma galeria horizontal na encosta de um morro. A abordagem horizontal dessa tipologia é mais comumente observada nas regiões periféricas que se estendem desde o Himalaia até a Península Arábica, incluindo também o norte do continente africano até o sul da Península Ibérica. No Japão, os habitantes do povo Ainu empregavam estruturas semissubterrâneas para enfrentar as condições climáticas adversas. Essas construções se assemelham às edificações do povo indígena Jê-do-Sul do Brasil, que remontam a quase quatro mil anos atrás. A análise de Weimer (2012) sugere que tais semelhanças não podem ser atribuídas meramente à coincidência.

No Brasil, há registros de construções semissubterrâneas que se estendem desde o Rio Grande do Sul até Minas Gerais, conhecidas como "buracos de bugre". As evidências mais antigas apontam para construções datadas de 1750 a.C. (WEIMER, 2012). O povo Jê-do-Sul, que desenvolveu esse estilo de habitação peculiar, fugiu do padrão comumente observado entre outros povos indígenas brasileiros (WEIMER, 2006). Essas estruturas desempenhavam diversas funções, conforme descrito por Silva (2001). As maiores tinham propósito cerimonial ou defensivo, enquanto as médias eram utilizadas como residências e as menores serviam como dormitórios. O maior sítio arqueológico dessas construções subterrâneas está situado no nordeste do Rio Grande do Sul e no sudeste de Santa Catarina.

O povo indígena Jê-do-Sul tem origens na região central do país (SILVA, 2001). Atualmente, seus descendentes representam o grupo conhecido como povo Kaingang (*Kaa* - mato + *ingang* - morador) (COPÉ, 2006). As estruturas são retratadas por Copé como caracterizadas por uma abertura ampla no solo, muros escavados em rocha basáltica em decomposição e o uso de materiais

naturais. As paredes poderiam ser verticais, principalmente nas construções maiores, ou inclinadas, nas estruturas menores. De acordo com Reis (1997), essas residências escavadas eram, em sua maioria, de formato circular, com diâmetro médio de cerca de seis metros e quarenta centímetros. A profundidade média era de aproximadamente um metro e meio, embora alguns sítios arqueológicos tenham revelado estruturas com profundidades variando entre quatro e sete metros. Weimer (2006) observou que as estruturas maiores frequentemente apresentavam um esteio central para sustentar a cobertura (conforme mostra a Figura 13), enquanto as menores possuíam esteios laterais que sustentavam cobertura vegetada, utilizando varas flexíveis.

Figura 13 - Estrutura subterrânea ou “buracos de bugre” do povo Jê do Sul.



Fonte: D'Angelis e Veiga (2003).

Durante os invernos rigorosos e nas elevadas temperaturas do verão, as estruturas subterrâneas ofereciam ambiente com condições de temperatura excepcionais devido à inércia térmica do solo (LA SALVIA, 1983; WEIMER, 2012). Na década de 1960, Weimer (2012) identificou um conjunto de habitações semienterradas nos arredores de Fortaleza, no Ceará. Essas edificações foram intencionalmente construídas diretamente na areia.

No contexto da Guerra Fria, em 1958, nos Estados Unidos, foram construídos *bunkers* subterrâneos para acomodar os políticos envolvidos na geopolítica global (GARRETT, 2021). No início dos anos 1960, durante a Crise dos Mísseis, uma fase politicamente tensa na qual a ameaça de guerra nuclear pairava iminente (DOMINGOS, 2013), houve aumento significativo na construção de abrigos subterrâneos. O discurso do presidente John Kennedy sobre a possibilidade de um conflito atingir o território nacional levou muitos

cidadãos americanos a buscarem a construção desses abrigos. A demanda crescente impulsionou a formação de especialistas em abrigos nucleares da noite para o dia, especialmente após a revista *Life Magazine* publicar instruções detalhadas sobre como construí-los (SZASZ, 2007).

Segundo Oehler (1981), mesmo diante de todas as evidências, a maioria dos americanos não compartilhava a crença na iminência de uma guerra nuclear. No entanto, tanto os soviéticos quanto os chineses estavam empenhados em políticas de construção de abrigos subterrâneos. O temor da guerra conduziu as pessoas a aprenderem a arte de construir essa tipologia arquitetônica. Com os acordos de paz nuclear que se seguiram na década de 1960, o pavor nuclear começou a diminuir e uma abordagem mais voltada para o meio ambiente começou a se associar a essa forma de construção. A Conferência de Estocolmo (1972) e a Crise do Petróleo (1973) introduziram uma nova perspectiva ambiental na indústria da construção, abrindo espaço para a arquitetura subterrânea ser considerada uma alternativa sustentável e ecologicamente consciente. Além disso, revelou-se promissora na conservação de energia, especialmente no âmbito de sistemas de ventilação.

2.4. Simulações computacionais e análises térmicas em edifícios subterrâneos

Milanovic, Folic e Folic (2018) conduziram um projeto experimental que envolveu a análise de uma residência com proteção pelo solo em algumas de suas paredes, localizada na região de Dobrača, Sérvia. Essa área é caracterizada por clima continental úmido e quente (*Dfb*, classificação de Köppen-Geiger). Nas últimas três décadas, observou-se aumento de aproximadamente um grau na temperatura anual da região, e esse mesmo padrão se repetiu nas temperaturas do solo em profundidades superiores a dez metros. Os pesquisadores examinaram uma série de fatores, incluindo as temperaturas internas e externas, a velocidade do vento e as camadas de isolamento nos anos de 2012 e 2016. A residência em questão possuía uma cobertura de concreto com revestimento betuminoso e um telhado verde com espessura de quarenta centímetros. Durante o inverno, a temperatura interna da residência foi de 15,8°C, enquanto

no verão atingiu 20,6°C. No mesmo período, as temperaturas externas foram abaixo de zero grau no inverno e acima de trinta graus no verão.

Bakoosh, Arslangazi e Asilsoy (2021) conduziram simulações comparativas entre uma residência subterrânea típica da Líbia e uma residência moderna convencional acima do solo, com características ocidentais. Esses estudos foram realizados na cidade de Gharyan, Líbia, onde prevalece um clima semiárido quente (*BSh*, classificação de Köppen-Geiger). Durante o período de um mês no inverno, com temperatura média externa de 9°C e umidade média externa de 66%, foram coletadas medições de temperatura e umidade quatro vezes ao dia.

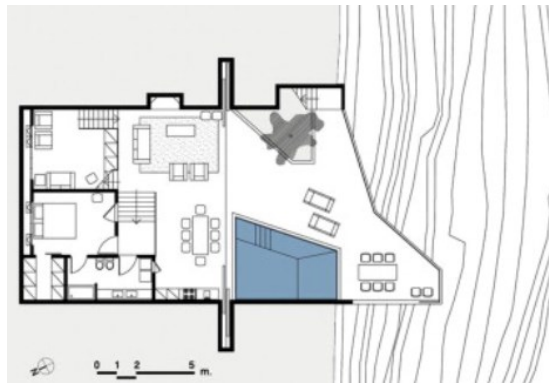
Os resultados indicaram que a temperatura média interna na residência subterrânea foi de 16°C, enquanto na residência acima do solo foi de 12°C. Quanto à umidade, verificou-se uma média de 62% na residência subterrânea e 70% na residência acima do solo. A residência subterrânea apresentou temperaturas mais elevadas no inverno, o que contribui para a redução do consumo de energia elétrica destinada ao aquecimento. O estudo demonstra que a arquitetura vernacular pode ser um guia importante para a arquitetura sustentável, pois oferece um *design* que responde de maneira eficaz ao clima e à cultura da Líbia (BAKOOSH; ARSLANGAZI; ASILSOY, 2021).

Anselm (2008) conduziu simulações em dois edifícios com proteção do solo no noroeste da China, um com 50% da área externa em contato com o solo e outro com 80%. As simulações foram executadas no programa *TRNSYS*, utilizando a temperatura do solo (20°C) medida entre cinco e dez metros de profundidade, em uma localização não exposta à radiação solar. Cada edifício foi submetido a cenários de verão e inverno, com temperaturas de 35°C e 0°C, respectivamente. No primeiro edifício (50%), as condições climáticas resultaram em temperatura interna de 28°C no verão e 5°C no inverno. O segundo projeto (80%), nas mesmas condições, alcançou temperaturas internas de 24°C no verão e 8°C no inverno. A análise de Anselm (2008) concluiu que maior contato com o solo contribui para melhor controle térmico da edificação, reduzindo os custos de resfriamento e aquecimento.

O consumo de energia e o desempenho térmico de um projeto subterrâneo proposto para a Ilha Kea, Grécia, foram investigados por Benardos, Athanasiadis

e Katsoulakos (2014). A ilha possui clima mediterrânico com verões quentes (Csa, classificação de Köppen-Geiger), apresentando temperaturas máximas absolutas de 39,4°C no verão e mínimas absolutas de -2°C no inverno. O projeto da residência com proteção pelo solo considera diversos parâmetros, incluindo seleção do local, orientação solar, percepção interna/externa e ventilação natural. Esses aspectos são fundamentais para criar um ambiente subterrâneo contemporâneo e saudável, conforme mostra a Figura 14. A estrutura de concreto revestida por uma membrana forma a casca protetora da casa em relação ao solo, e uma rede de drenagem é instalada para desviar a entrada de água.

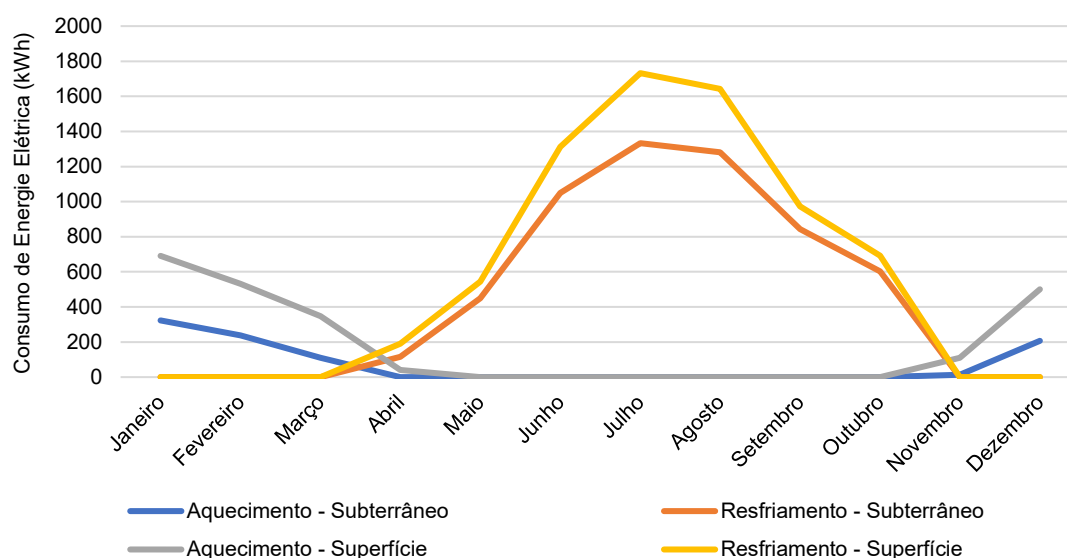
Figura 14 - Projeto da residência protegida pelo solo na ilha de Kea, Grécia.



Fonte: Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014).

Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014) decidiram realizar as simulações no projeto protegido pelo solo e um projeto acima do solo para realizar comparação nos resultados obtidos por meio do programa *Epa-Cad*. Na residência subterrânea não foi adicionado isolamento térmico e na residência da superfície foi adicionado isolamento nas paredes e no telhado. A Figura 15 mostra o consumo de energia para resfriamento e aquecimentos nas duas residências.

Figura 15 - Consumo de energia elétrica para resfriamento e aquecimento na residência da superfície e subterrânea.



Fonte: Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014).

A habitação localizada na superfície registrou consumo de energia para resfriamento 25% superior em comparação à habitação protegida pelo solo. Além disso, a habitação subterrânea apresentou redução de 42% no consumo total de energia elétrica. Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014) examinaram os custos de construção na Grécia e constataram que a construção da habitação na superfície seria 8% mais econômica em termos de custo inicial. Entretanto, quando se considerou o gasto subsequente com o consumo de energia elétrica, a habitação subterrânea revelou desempenho econômico superior. Diante dessas constatações, os autores chegaram à conclusão de que a habitação subterrânea exibiu desempenho térmico e econômico mais vantajoso, especialmente quando se leva em conta o consumo energético.

Hebbal *et al.* (2021) enfatizaram que a utilização do solo como estratégia de bioclimatização passiva apresenta potencial promissor para edifícios em climas quentes. Os pesquisadores conduziram medições de temperatura e simulações computacionais para validar essa abordagem construtiva. A plataforma de simulação *TRNSYS* foi empregada para modelar um ambiente subterrâneo em Ouargla, Argélia, uma região caracterizada por clima quente de

deserto (*BWh*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger). O desempenho térmico de construções passivas é sensível ao perfil do solo e à sua temperatura. Os autores realizaram medições de temperatura do solo desde a superfície até uma profundidade de dois metros, a cada intervalo de 50 centímetros para os sensores. Os pontos de medição variaram de 50 centímetros a 200 centímetros da superfície, resultando em temperaturas de 35°C, 33°C, 32°C e 30°C, respectivamente. Além disso, a medição na superfície do solo registrou temperatura de até 55°C.

O edifício residencial de um único pavimento compreende uma sala subterrânea, na qual foram conduzidas as simulações de Hebbal *et al.* (2021). A estrutura conta com cobertura e piso em concreto maciço. As paredes do pavimento térreo são feitas de tijolos vazados, enquanto no pavimento subterrâneo, a parede norte é constituída por uma camada de concreto maciço com vinte centímetros de espessura, e as demais paredes são de blocos de concreto. As variações na temperatura externa ao longo do dia variaram entre 28°C e 47°C, conforme as medições realizadas no local. O pavimento térreo apresentou temperatura interna média de 37°C, enquanto o pavimento subterrâneo registrou 27,5°C. Esses valores de temperatura foram considerados termicamente aceitáveis, devido à umidade relativa de 25%.

Os resultados das simulações revelaram que o consumo de energia elétrica destinado ao resfriamento da sala subterrânea pode ser completamente eliminado, ao passo que o consumo de energia do pavimento térreo representa 93,6% do consumo total da residência. A temperatura de referência para o sistema de ar-condicionado foi estabelecida conforme as diretrizes da Norma DTRC3-4, onde estipula temperaturas médias aceitáveis de 27°C durante o verão e 21°C durante o inverno (HEBBAL *et al.*, 2021).

Mirabi e Abarghie (2021) conduziram uma pesquisa que explorou estratégias adaptativas para residências com proteção pelo solo no Irã. O estudo foi realizado na cidade de Yazd, caracterizada por possuir clima quente de deserto (*BWh*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger). Devido à baixa umidade relativa, há acentuada variação diária e mensal de temperatura, oscilando entre 42°C no verão e -8°C no inverno. A análise empregou o programa *EnergyPlus* e utilizou o modelo de edifício (*Case 600*) conforme

especificado pelo padrão *ASHRAE* 140 (2017). Os materiais empregados compreenderam concreto reforçado, gesso e vidros duplos. A temperatura de referência do sistema de ar-condicionado, conforme a *ASHRAE* 55 (2013), foi definida entre 21°C e 28°C.

Uma simulação de teste foi executada para validar os resultados obtidos pelo programa *EnergyPlus*. Mirabi e Abarghie (2021) compararam esses resultados com os dados obtidos por Van Dronkelaar *et al.* (2014) por meio de simulações realizadas com o programa *TRNSYS* e também com os cálculos baseados na norma *EN-ISO* 13790 (2008). Constatou-se que o *EnergyPlus* apresentou consumo de energia ligeiramente superior, cerca de 2%, em relação aos resultados do *TRNSYS*. A discrepância nas cargas térmicas de resfriamento e aquecimento foi de aproximadamente 1% e -3%, respectivamente.

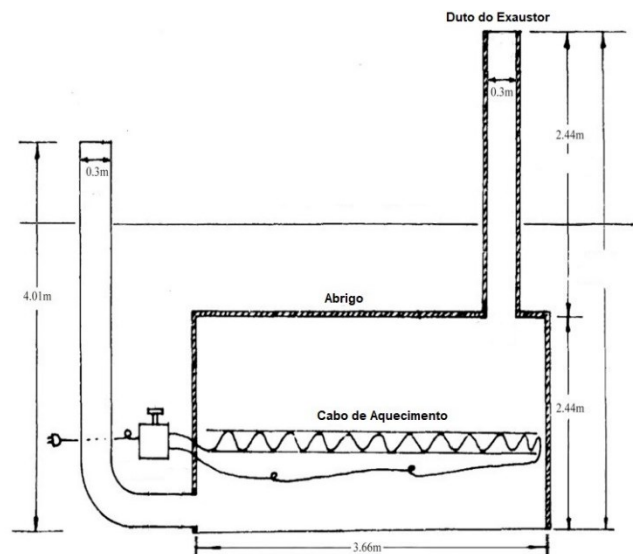
O estudo de simulação foi conduzido em duas fases distintas. A primeira fase envolveu simulações comparativas entre uma residência subterrânea, na qual se variou a espessura do solo acima da cobertura (de 0,5 a 4 metros) e a orientação solar, e uma residência convencional na superfície, na qual a variação limitou-se à orientação solar. Para a residência na superfície, as temperaturas máximas e mínimas ficaram acima das registradas no ambiente externo. Foi observado que o edifício com abertura vertical voltada para o sul apresentou o melhor desempenho térmico para ambos os modelos de residência. Adicionalmente, no edifício subterrâneo, a flutuação anual de temperatura foi reduzida em até 50% em relação à residência na superfície. As temperaturas máximas registradas foram de 39°C no modelo de superfície e 31°C no subterrâneo, enquanto as temperaturas mínimas foram de 15°C no subterrâneo e 5°C no modelo de superfície.

Na segunda fase do estudo, Mirabi e Abarghie (2021) procederam com uma comparação do desempenho térmico entre dois edifícios subterrâneos. O primeiro era totalmente subterrâneo e apresentava uma abertura vertical, enquanto o segundo incorporava quatro modelos (*Case* 600), resultando em uma configuração totalmente submersa com abertura horizontal desprotegida e um arranjo de plano de corte semelhante ao de uma cavidade coberta. Os resultados indicaram que o modelo com abertura horizontal demonstrou desempenho térmico superior, uma vez que a própria estrutura proporcionava

sombreamento às aberturas. Por outro lado, o modelo com abertura vertical ficou exposto à radiação solar direta.

Outro estudo relevante foi conduzido por Mukhtar, Ng e Yusoff (2018), onde as simulações foram realizadas para avaliar o desempenho térmico de um edifício subterrâneo ventilado naturalmente, em um contexto de clima quente e úmido. A pesquisa foi executada na cidade de Petaling Jaya, Malásia, selecionada devido às altas temperaturas, intensidade de iluminação e níveis de umidade relativamente elevados. Essa localidade possui clima de floresta tropical (*Af*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger), caracterizado também por pluviosidade significativa, longas horas de sol e ventos de intensidade variável. As simulações de temperatura interna e ventilação natural foram conduzidas por meio do programa *ANSYS Fluent*. A Figura 16 mostra o modelo de um edifício totalmente submerso, apresentando uma abertura para ventilação e incorporando uma resistência térmica para imitar a ocupação humana.

Figura 16 - Edifício completamente submerso simulado na Malásia.



Fonte: adaptado de Mirabi e Abarghie (2021).

O comportamento térmico do edifício subterrâneo foi examinado ao longo dos períodos diurno e noturno, correspondendo a temperaturas externas de 36,9°C e 22,5°C, respectivamente. Durante as simulações, tanto diurnas quanto noturnas, com a inclusão da resistência térmica ativa, as temperaturas internas

alcançaram valores de 32,1°C e 29,2°C, respectivamente. No entanto, conforme apontado por Mukhtar, Ng e Yusoff (2018), a faixa de temperatura de conforto térmico na Malásia varia de 24°C a 28°C. Diante das temperaturas obtidas nas simulações, seria necessário a implementação de um sistema de ventilação mecânica para obter níveis de conforto térmico satisfatórios. É relevante notar, porém, que o consumo energético desse sistema mecânico é bastante moderado devido à integração com a abordagem bioclimática passiva. Portanto, essa metodologia proposta possui potencial para aplicação em países com climas tropicais semelhantes, constituindo solução viável e eficiente (MUKHTAR; NG; YUSOFF, 2018).

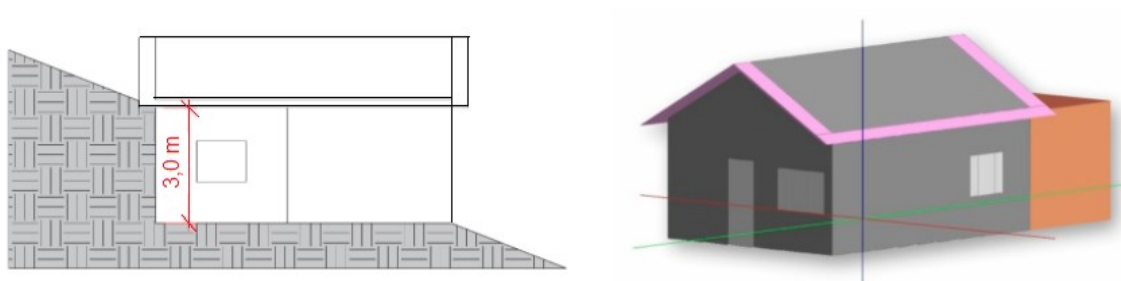
A pesquisa conduzida por Van Dronkelaar *et al.* (2014) focou na avaliação do consumo energético associado ao resfriamento e aquecimento de edifícios subterrâneos. Eles empregaram simulações que englobaram 200 parâmetros de entrada, resultando em 540 cenários distintos. A seleção dos casos levou em consideração múltiplos fatores, incluindo a posição do edifício (subterrâneo ou de superfície), o tipo de clima (abrangendo quinze distintos climas), a finalidade do edifício (abrangendo categorias como doméstico, educacional, hospitalar, esportivo, industrial e de escritório) e a profundidade do edifício (dois, cinco e dez metros). Os climas avaliados tiveram classificações de Köppen-Geiger tais como climas tropicais (*Af* e *Aw*), áridos e semiáridos (*BWh*, *BSh* e *BSk*), climas temperados (*Csa*, *Cwb*, *Cfa* e *Cfb*), climas continentais e subárticos (*Dsb*, *Dwb*, *Dfa*, *Dfb* e *Dfc*), bem como climas polares e alpinos (*ET*).

Os resultados destacam que usos de baixa carga térmica interna, a exemplo de edifícios domésticos e industriais, apresentam maior potencial de economia em climas quentes, enquanto usos com alta carga térmica interna se mostram mais eficientes e promissores em climas frios. Em particular, os edifícios que obtiveram as maiores reduções no consumo energético pertenciam a usos de baixa carga térmica interna, como os setores doméstico, industrial e de escritório. A média de economia desses edifícios alcançou cerca de 70% nos diversos cenários de climas simulados. De maneira geral, os edifícios subterrâneos tiveram redução média de aproximadamente 42% no consumo de energia elétrica em comparação com seus correspondentes de superfície (VAN DRONKELAAR *et al.*, 2014).

Callejas *et al.* (2021) destacaram que, em regiões de clima quente, a aplicação de massa térmica para fins de resfriamento emerge como uma alternativa eficaz para armazenar e reter calor durante o dia, liberando-o gradualmente no ambiente exterior durante a noite. Tomando esse princípio como base, os pesquisadores conduziram simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus*, considerando duas residências distintas: uma incorporando o solo como massa térmica e outra desprovida dessa característica. A investigação ocorreu na cidade de Cuiabá, localizada em Mato Grosso, que apresenta clima tropical de savana (*Aw*, sigla em inglês), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. A Figura 17 mostra a integração do solo com a parede externa dos ambientes.

O estudo concentra-se na estratégia da massa térmica como abordagem responsiva ao clima. O projeto original da residência padrão foi reconfigurado a fim de atender ao nível "A" de eficiência definido nos Requisitos Técnicos da Qualidade para Nível de Eficiência de Edifícios Residenciais (RTQ-R). Para alcançar essa eficiência, houve aprimoramento na resistência térmica das paredes externas e da cobertura. As residências analisadas correspondem a típicas habitações de baixa renda, com área total de 39,18 metros quadrados. Notavelmente, a introdução de massa de solo foi implementada em contato com as paredes dos quartos, espaços que demandam ar-condicionado durante todo o período noturno (CALLEJAS *et al.*, 2021).

Figura 17 - Corte esquemático e perspectiva da residência e o contato com o solo.



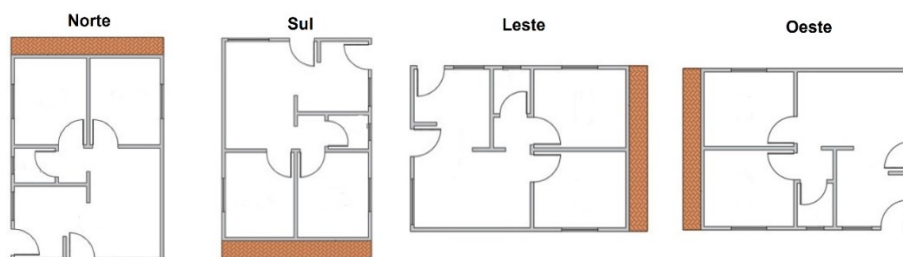
Fonte: Callejas *et al.* (2021).

Ao longo do dia, a ventilação natural é empregada na residência, enquanto o uso do ar-condicionado é restrito aos quartos durante a noite. Uma abordagem

adicional para otimizar o desempenho térmico envolveu a variação da orientação da parede que faz contato com o solo, conforme mostra a Figura 18. Callejas *et al.* (2021) conduziram uma análise das residências em três cenários climáticos. O primeiro cenário, denominado "base", utilizou dados climáticos referentes ao período de 1961 a 1990, seguido pelo cenário de 2020, que incorporou dados climáticos entre 2011 e 2040, e, por fim, o cenário de 2050, com dados climáticos compreendendo o intervalo de 2041 a 2070. Para a formulação dos dados climáticos dos cenários futuros, foram aplicados os efeitos das mudanças climáticas estabelecidas no Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Segundo os resultados de Callejas *et al.* (2021), a disposição da massa de solo orientada para oeste demonstrou ser a mais eficiente em termos de consumo de energia, tanto para as duas diferentes configurações de residência quanto para os três cenários climáticos considerados. No cenário base, o consumo de energia foi de 63,5 kWh/m² sem a incorporação do solo e 39,6 kWh/m² com a presença da massa térmica. No cenário de 2020, o consumo energético correspondeu a 83,8 kWh/m² e 54,9 kWh/m², respectivamente, para as condições sem e com o uso do solo como massa térmica. No cenário de 2050, os valores de consumo de energia foram de 107,6 kWh/m² e 69,5 kWh/m², para os casos sem e com a intervenção da massa de solo. Cabe ressaltar que, no cenário de 2050, a residência que contava com a massa térmica foi submetida a uma nova avaliação de eficiência, conforme os critérios estabelecidos no RTQ-R. Mesmo alcançando o melhor desempenho no consumo de energia, a classificação de eficiência do edifício foi rebaixada de nível "A" para nível "D".

Figura 18 - Variação na orientação solar na residência com o contato com o solo.



Fonte: Callejas *et al.* (2021).

A avaliação do consumo de energia e a análise térmica destacam que a incorporação do contato com o solo nas paredes dos quartos emerge como uma abordagem eficaz para aprimorar tanto o desempenho térmico quanto as condições habitacionais das residências. A adoção dessa estratégia bioclimática passiva revela seu potencial para se adaptar de maneira responsiva às características climáticas dos edifícios. A utilização da massa térmica, em conjunto com outras estratégias passivas, pode mitigar as condições climáticas que se intensificarão no futuro devido ao aquecimento global, especialmente em contextos de climas tropicais (CALLEJAS *et al.*, 2021).

2.5. *EnergyPlus* e métodos de cálculo

Kang *et al.* (2022) enfatizam que diversos instrumentos utilizados para simular o consumo de energia em edificações são integrados aos modelos de transferência de calor acoplados ao solo, como no *EnergyPlus*. Dentro desse programa, são disponibilizados dois métodos de transferência de calor para edifícios em contato com o solo: o método *Kiva* e o método do fator *FC* (que compreende a transferência de calor por meio do piso e a taxa de variação temporal do fluxo de calor). As principais plataformas de simulação adotam algoritmos que se baseiam em correlações simplificadas, proporcionando resultados essencialmente estáticos, que carecem de precisão, ou empregam métodos numéricos detalhados, os quais consomem considerável tempo de processamento. A situação atual limita a viabilidade da co-simulação dinâmica da transferência de calor subterrâneo em conjunto com os modelos energéticos (KANG *et al.*, 2022).

Costa, Roriz e Chvatal (2017) conduziram uma análise da transferência de calor na modelagem de pisos em contato com o solo usando o programa *EnergyPlus*. Diversos métodos de cálculo de transferência de calor e diferentes dados de entrada foram empregados nas simulações. No método de cálculo *Site:GroundDomain:Slab*, a condutividade térmica revelou-se o parâmetro de entrada que mais influenciou os resultados do fluxo de calor. Este achado foi corroborado por Eli *et al.* (2019) em seu estudo sobre análise de sensibilidade em simulações de modelos em contato com o solo no programa *EnergyPlus*.

Contudo, Eli *et al.* (2019) aprofundaram sua investigação e constataram que o método Kusuda-Achenbach, presente no *Site:GroundDomain:Slab*, tinha a evapotranspiração da cobertura do solo como o fator mais influente, seguido pela condutividade térmica e profundidade.

Morselli (2009) relatou que em uma mesma região é possível encontrar diversos tipos de solo, cada um com propriedades distintas, como densidade, forma, cor, consistência e composição química. A presença de água nos vazios do solo pode resultar em comportamentos diversos. Diante dessa complexidade, em simulações acopladas ao solo seriam necessárias várias informações complementares para cada tipo de solo. No entanto, uma vez que a condutividade térmica se destaca como o parâmetro que mais afeta essas simulações no programa *EnergyPlus* (COSTA; RORIZ; CHVATAL, 2017; ELI *et al.*, 2019), as demais informações podem ser padronizadas para reduzir o tempo de simulação e coleta de dados.

Outra análise da modelagem de transferência de calor em ambientes subterrâneos no programa *EnergyPlus* foi conduzida por Resende, Souza e Gomes (2019). O método *Site:GroundDomain:Basement* foi empregado para simular as trocas térmicas entre as paredes da edificação e o solo. O isolamento térmico não foi considerado no piso e nas paredes, uma vez que essa prática não é comum em residências na Região Sudeste do Brasil. A transferência de calor por meio do piso e das paredes subterrâneas apresenta importância significativa na carga térmica total da edificação.

Conforme o manual do *EnergyPlus* (2022), esse método de cálculo é empregado para simular a transferência de calor entre as superfícies horizontais das construções em contato com o solo. O *GroundDomain* tem a capacidade de simular as transferências de calor para cenários de laje, seja ao nível do solo ou abaixo dele. Além disso, é necessário haver interação com o edifício por meio de uma condição externa de contorno aplicada à superfície horizontal. O método *Slab* utiliza uma formulação de diferenças finitas implícitas para resolver as temperaturas do solo. Múltiplas superfícies horizontais podem ser acopladas ao *GroundDomain*, com o programa criando uma superfície equivalente que interage com o solo, possibilitando a obtenção de outras temperaturas externas no modelo para alcançar equilíbrio na distribuição de calor.

O fluxo de calor é tratado conforme a recomendação de Pinel e Beausoleil-Morrison (2012). A temperatura de corpo negro é aplicada como limite de temperatura nas laterais do *GroundDomain* e na superfície inferior. O perfil de temperatura do solo foi determinado por meio da utilização da equação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965). A Equação 1 mostra o cálculo que utiliza a relação entre a época do ano e a profundidade para determinar a temperatura do solo.

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad [1]$$

Onde:

T é a temperatura do solo (°C);

T_m é a temperatura média anual da superfície (°C);

A_s é a amplitude da temperatura da superfície (°C);

e é o número de Euler (2,7182);

z é a profundidade abaixo da superfície (pés);

α é a difusividade térmica do solo (m²/dia);

t é tempo, a partir da meia-noite de 31 de dezembro (dias);

t₀ é o dia do ano com a temperatura mínima da superfície.

As células localizadas na superfície do solo são submetidas a um equilíbrio térmico que incorpora considerações sobre as radiações de comprimento de onda curto e longo, bem como os processos de condução e convecção de calor. Além disso, a evapotranspiração é um fator levado em conta. A taxa de evapotranspiração é estimada como a perda de umidade, utilizando o método proposto por Allen *et al.* (2005), e essa perda é convertida em perda de calor por meio da multiplicação da densidade e do calor latente de evaporação da água. A Equação 2 apresenta o cálculo da evapotranspiração, que ocorre na superfície independentemente de sua altura.

$$ET_{sz} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad [2]$$

Onde:

ET_{sz} é a evapotranspiração da grama padronizada para superfícies curtas ou altas (mm d⁻¹ para tempo diário ou mm h⁻¹ para tempo horário);

Δ é a inclinação da curva de pressão/temperatura da saturação de vapor (kPa °C⁻¹);

R_n é a radiação líquida calculada na superfície da grama (MJ m⁻² d⁻¹ para tempo diário ou MJ m⁻² h⁻¹ para tempo horário);

G é a densidade do fluxo de calor do solo na superfície do solo (MJ m⁻² d⁻¹ para tempo diário ou MJ m⁻² h⁻¹ para tempo horário);

γ é a constante psicrométrica (0,4 g/kg);

C_n é a constante do numerador que muda com o tipo de referência e intervalo de tempo calculado (K mm s³ Mg⁻¹ d⁻¹ ou K mm s³ Mg⁻¹ h⁻¹);

D_d é a constante do denominador que muda com o tipo de referência e intervalo de tempo calculado (s m⁻¹);

T é a temperatura média diária ou horária do ar a 1,5 a 2,5 metros de altura (°C);

u_2 é a velocidade média diária ou horária do vento a 2 metros de altura (m s⁻¹);

e_s é a pressão de vapor de saturação a 1,5 a 2,5 metros de altura (kPa), calculada para intervalos de tempo diários como a média da pressão de vapor de saturação na temperatura máxima e mínima do ar;

e_a é a pressão média de vapor real a 1,5 a 2,5 metros de altura (kPa).

Os cálculos de transferência de calor do método *Basement* são conduzidos utilizando a mesma abordagem empregada pelo método *Site:GroundDomain:Slab* para a simulação de superfícies conectadas ao solo. Esse método é capaz de lidar com diversas configurações de superfícies horizontais e verticais, assim como considerar o isolamento do subsolo. O objeto *Basement* permite associar várias zonas, e o modelo identifica as superfícies em contato com o solo, criando uma superfície equivalente para a distribuição do fluxo de calor. A extensão da superfície vertical é determinada pelo usuário. No

EnergyPlus, os pisos e paredes do subsolo são simulados utilizando modelos padrão de equilíbrio térmico de superfície.

2.6. Paisagem e estética construtiva

Tissier (2003) sustenta que a paisagem deve ser compreendida como a representação da natureza em sua totalidade. No entanto, a paisagem não se limita exclusivamente à natureza. Otto Schlüter introduziu o termo "paisagem cultural" para descrever a paisagem moldada pelo ser humano por meio da sua interação com a natureza. Com base no entendimento da natureza, Karl Marx declarou que "a natureza se humaniza e o homem se naturaliza" (SCHMIDT; PARIS, 1978). Essa afirmação de Marx pode ser recontextualizada para a paisagem arquitetônica como "a natureza se constrói e a construção se integra à natureza". No dia a dia, a natureza é moldada e transformada pelas ações humanas, resultando em alterações na paisagem natural. A interação entre a construção civil e o ambiente por meio de estratégias bioclimáticas confere às edificações uma integração natural, trazendo benefícios tanto em termos de construção quanto ambientais.

À medida que os seres humanos inserem suas influências na natureza moldada, esta adquire uma nova dimensão social como valores de uso (BERNARDES; FERREIRA, 2009). Na relação entre a natureza e o ser humano, English e Mayfield (1972) afirmam que "a paisagem é internalizada no sistema de valores humanos, estabelecendo relações complexas entre as atividades e a percepção do meio ambiente. Nessa perspectiva, a estética da paisagem emerge como uma criação simbólica, meticulosamente elaborada, em que as formas refletem um conjunto de atividades humanas. As marcas deixadas pelo ser humano na paisagem revelam a visão de mundo de uma comunidade ao longo do tempo".

A arquitetura tem o poder de remodelar a microescala de um terreno e harmonizar-se de forma camuflada com a macroescala da paisagem. A construção subterrânea proporciona não apenas uma preservação estética do ambiente, mas também um enriquecimento histórico para o contexto urbano e paisagístico. Ao liberar a área superficial do terreno, essa extensão pode ser explorada de maneiras diversas, possibilitando a criação de espaços verdes com

vegetação, resultando em uma superfície mais exuberante (ANSELM, 2008; HAZBEI *et al.*, 2015; MILANOVIC; FOLIC; FOLIC, 2018). De acordo com Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014), a construção de edifícios subterrâneos oferece a vantagem de causar mínima perturbação ao entorno e limitar a poluição visual. A percepção estética em edifícios protegidos pelo solo é um tema recorrente em diversos estudos, frequentemente enfatizando a importância da permeabilidade visual.

Uma superfície livre em edificações residenciais pode trazer benefícios ambientais ao permitir a evapotranspiração do solo com vegetação. A maximização do espaço vertical do edifício, seja ele público ou privado, juntamente com uma relação mínima com a paisagem, resulta na criação de áreas livres destinadas a outros propósitos. Conforme destacado por Ribeiro e Teixeira (2009), espaços livres contribuem para uma fluidez na paisagem urbana, minimizando os impactos visuais gerados pela massa construída e alterando as características estéticas e funcionais de um ambiente. Os edifícios subterrâneos, ao liberarem a superfície terrestre, têm o potencial de expressar equilíbrio entre espaços livres e construídos acima do solo, promovendo uma coexistência harmoniosa.

Tan *et al.* (2018) conduziram entrevistas com indivíduos que trabalhavam em ambientes subterrâneos. A maioria dos entrevistados compartilhou que ao ter acesso a áreas verdes acima do solo, não sentiam falta de janelas nos espaços de trabalho, além de relatar sensação mais agradável em relação à temperatura e à qualidade acústica. Cabe mencionar que se tratava de edifícios completamente submersos, sem aberturas. Esse contexto de uso influencia a dinâmica das edificações subterrâneas, podendo resultar em experiências distintas entre ambientes de trabalho e residenciais.

Wells (1998) foi pioneiro ao reintroduzir o conceito de residências protegidas pelo solo no âmbito da construção civil. A partir desse momento, a arquitetura subterrânea tem lutado para superar os estigmas associados ao movimento ambientalista dos anos 1960, quando foi relacionada a ideais utópicos e *hippies*. O autor também argumentou que a superfície terrestre foi concebida para abrigar vida vegetal e não industrial (WELLS, 1998), apresentando uma perspectiva radical para a aceitação e adoção dessa

abordagem construtiva. Conforme enfatizado por Wagner e Schubert-Weller (1994), o cerne dessa tipologia arquitetônica é não apenas habitar o solo, mas também viver em harmonia com ele.

O arquiteto Luís Perreira Miguel concebeu e construiu uma residência protegida pelo solo em Portugal. Tundrea *et al.* (2014) observou que, apesar de seu estilo moderno, a casa apresenta dunas artificiais que parecem integrar-se organicamente, enriquecendo sua sofisticação contemporânea com elementos naturais emprestados da praia e da vegetação circundante. O próprio arquiteto explicou que criou a duna para oferecer um refúgio fresco do calor português e para harmonizar-se com a paisagem local (PERREIRA, 2009). A interação com o ambiente circundante é um aspecto vital para todas as construções, embora a arquitetura subterrânea tenha a flexibilidade de determinar sua presença na paisagem. Sterling *et al.* (2012) observaram que estruturas subterrâneas, ao estarem integralmente em contato com o solo, não afetam a estética da superfície após a construção. Adicionalmente, tais estruturas oferecem espaços livres que permitem que a vegetação participe de trocas térmicas e de umidade com o meio ambiente.

2.7. Impacto construtivo e ambiental

A preocupação global com a degradação ambiental e a escassez de recursos naturais na década de 1970 desencadeou o aumento das investigações sobre residências subterrâneas (SHETA, 2010). De acordo com Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014), essa tipologia oferece vantagens como: mínima interferência no ambiente circundante e reduzida poluição visual; custos de manutenção mais baixos devido à menor exposição de superfícies; maior proteção contra condições climáticas adversas; e absorção aprimorada de ruídos e vibrações. Apesar disso, a análise do impacto ambiental gerado por essas residências tem sido pouco abordada nas pesquisas relacionadas a aspectos térmicos e energéticos. Embora individualmente essas residências possam causar baixo impacto ambiental, a concepção de complexos habitacionais subterrâneos poderia potencialmente apresentar desafios (BENARDOS; ATHANASIADIS; KATSOULAKOS, 2014).

Alkaff, Sim e Efzan (2016) destacaram que diversos estudos abordam uma perspectiva abrangente do desenvolvimento sustentável, compreendendo três dimensões fundamentais: ambiental, social e econômica. No contexto ambiental, a construção subterrânea pode apresentar potenciais riscos de contaminação do lençol freático. No entanto, tais residências protegidas pelo solo proporcionam um ambiente mais seguro diante de desastres naturais.

Tundrea *et al.* (2014) conduziram uma análise do impacto ambiental de uma residência subterrânea. O estudo foi realizado em uma área rural na cidade de Iași, Romênia, utilizando o programa *GaBi 6*. Essa região apresenta clima subtropical úmido (*Cfa*, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger). Foram simulados dois modelos de residências com as mesmas propriedades físicas, dimensões e materiais estruturais: uma protegida pelo solo e outra na superfície. A residência subterrânea inclui telhado verde, paredes em contato direto com o solo e uma parede envidraçada com orientação solar para o sul ou oeste. A residência na superfície possui telhado convencional de telhas cerâmicas e isolamento. A avaliação dos parâmetros englobou desde a extração de matérias-primas até a conclusão das edificações, abrangendo todo o ciclo de vida das casas.

A avaliação do impacto ambiental é devidamente quantificada por meio dos cálculos do Potencial Global de Aquecimento (*PGA*, sigla em inglês). A metodologia *CML 2001* foi empregada como base para a obtenção dos resultados. Ficou evidente que o impacto ambiental total foi consideravelmente maior na residência construída na superfície, chegando ao dobro em comparação com a residência protegida pelo solo (TUNDREA *et al.*, 2014). A estratégia de proteção subterrânea ressalta que é possível atingir baixo impacto ambiental, mesmo ao empregar materiais de alta intensidade energética, como concreto, aço e alvenaria. O isolamento e a impermeabilização utilizados na residência subterrânea foram feitos a partir de cortiça, um material natural renovável que possui notáveis propriedades isolantes e vida útil praticamente indefinida, mantendo intactos os princípios de transferência de calor. Uma habitação ecologicamente integrada ao solo oferece melhoria na qualidade de vida, melhor proteção contra desastres naturais e menores custos de manutenção (TUNDREA *et al.*, 2014). Entretanto, é imperativo adotar enfoque

cauteloso ao abraçar tal conceito, pois a construção dos elementos ocultos ou enterrados exige execução precisa, assegurando que cada camada necessária esteja adequadamente ajustada antes de ser recoberta com terra.

Segundo Mirrezaei (2015), a fragilidade dos ecossistemas contemporâneos está intrinsecamente ligada à perda de áreas verdes, à degradação paisagística e à redução dos recursos superficiais. A integração do solo nas edificações pode contribuir para a manutenção da flora e fauna local. A obtenção de uma coexistência harmoniosa com o meio ambiente é possível por meio de parâmetros estabelecidos pela autora, que incluem:

- I. Preservação da integridade da paisagem;
- II. Conservação do equilíbrio do ecossistema;
- III. Intervenção mínima na topografia;
- IV. Utilização de materiais ecológicos.

A adoção de materiais ecologicamente responsáveis auxilia na redução da dependência de materiais convencionais, que frequentemente geram poluição significativa durante a extração ou fabricação. A preferência por materiais produzidos localmente ou em proximidade à região de construção não apenas diminui a necessidade de transporte, mas também reduz a emissão de gases poluentes (MIRREZAEI, 2015).

De acordo com Sterling *et al.* (2012), construções subterrâneas apresentam impacto ambiental mais significativo em comparação com edifícios construídos na superfície. No caso de escavações em rochas, a restauração do estado original se torna inviável, resultando em possíveis alterações permanentes nos materiais do solo, nas características naturais e nos fluxos de água subterrânea. O grau de impacto ambiental é de extrema importância e pode variar desde a poluição das águas subterrâneas até pequenas mudanças térmicas no solo nas proximidades da construção.

O impacto ambiental está diretamente relacionado ao tamanho do projeto, indicando que uma única empreitada subterrânea pode gerar impacto relativamente menor, enquanto um conjunto de projetos ou um amplo complexo poderia resultar em impactos substanciais. A liberação de calor proveniente dessas estruturas subterrâneas pode contribuir para a formação de ilhas de calor

urbano subterrâneo, influenciando as temperaturas das águas subterrâneas (QIAO *et al.*, 2019).

As construções subterrâneas frequentemente empregam estruturas robustas de concreto com alta energia incorporada, e o processo de movimentação de terra consome considerável quantidade de energia. No entanto, essas edificações costumam ter vida útil prolongada, e quando combinadas com a redução do consumo de energia e a geração de energia renovável, o consumo inicial de energia é compensado (STERLING *et al.*, 2012). Essas estruturas oferecem resistência em face de eventos catastróficos, como terremotos, furacões, tornados, incêndios externos, explosões, exposição à radiação e ameaças terroristas (PARKER; LONNERMARK; INGASON, 2008).

Mizbejabbbers (2012) compartilhou sua experiência em uma casa subterrânea com área de 230 metros quadrados, construída na década de 1980, e detalhou os aspectos positivos e negativos dessa abordagem arquitetônica. Localizada na cidade de Little Rock, EUA, a região possui clima subtropical úmido (*Cfa*, segundo a classificação de Köppen-Geiger). Entre os benefícios da residência subterrânea destacam-se a proteção contra tornados, a abundante iluminação natural, a qualidade visual, a redução do ruído e a proximidade com a natureza.

No entanto, a execução da construção revelou diversas falhas que geraram problemas futuros. Entre as desvantagens enfrentadas estavam vazamentos recorrentes, susceptibilidade a inundações, limitações no paisagismo, reparos onerosos e complicados, proliferação de mofo, depreciação do valor imobiliário e falta de privacidade. Conforme Mizbejabbbers (2012), as paredes em contato com o solo foram construídas com concreto, mas uma inadequada mistura do material resultou em rachaduras na cobertura apenas um ano e meio após a conclusão da construção, levando a vazamentos.

A edificação foi erguida em uma encosta, uma escolha desaconselhada pelo autor, uma vez que essa abordagem exige um sistema de drenagem superdimensionado para lidar com chuvas intensas e seu grande volume de água. A alta umidade resultante dos vazamentos causou o surgimento de mofo no interior da residência, obrigando a remoção de árvores e plantas com raízes profundas para possibilitar os reparos necessários.

Segundo Mizbejabbers (2012), devido ao atraso na transferência de calor para o solo e as paredes de concreto, o período de aquecimento e resfriamento se iniciam seis semanas depois da mudança de estação. A residência em questão utilizava um sistema de ar central para aquecimento em maio e resfriamento em novembro. Embora os aspectos positivos tenham sido reconhecidos pelo autor, os problemas enfrentados com a edificação foram considerados relevantes. Contudo, Mizbejabbers (2012) expressa que, na ausência dos problemas construtivos, ele estaria disposto a residir novamente em um ambiente subterrâneo.

Krzemińska, Zareba e Dzikowska (2017) propõem uma mudança na mentalidade em relação a novos modelos de edifícios nos próximos anos. Atualmente, a construção total ou parcial de residências no subsolo é vista como tabu, mas essa perspectiva poderá se modificar. As autoras destacam que as residências subterrâneas construídas sem janelas criam uma barreira psicológica significativa para os moradores, prejudicando o cotidiano nesse ambiente. Além disso, os altos custos associados à proteção contra danos estruturais causados pelas raízes das plantas e a falta de regulamentação para edifícios subterrâneos são consideradas desvantagens importantes. Apesar disso, a transição de espaços da superfície para jardins, florestas e habitats naturais pode ter impacto positivo na qualidade do ambiente natural em todas as suas dimensões, incluindo a estética paisagística.

2.8. Síntese da revisão de literatura

A arquitetura subterrânea tem sido explorada ao longo de diferentes sociedades e culturas, sendo notáveis as suas características distintas, que incluem proteção climática e individual como principais motivos para a sua construção. Contudo, essa abordagem construtiva enfrentou um período sombrio durante a Guerra Fria, quando ficou associada ao medo nuclear, isolamento total e doenças. Depois desse período, na década de 1970, essa percepção começou a se transformar, e a arquitetura subterrânea ganhou reconhecimento como uma alternativa ecologicamente amigável na construção.

A técnica de integração com o solo foi aplicada de maneiras variadas, adaptando-se conforme o clima e a região. Os primeiros registros históricos

remontam a residências completamente submersas com pátio central, encontradas em diferentes partes do mundo, desde o norte asiático até o oeste africano. A busca pela proteção térmica foi um fator primordial nessas culturas, com a arquitetura subterrânea sendo empregada tanto em regiões quentes quanto frias. Além disso, a prevalência desse estilo construtivo está ligada ao clima seco, por reduzir consideravelmente os desafios relacionados a chuvas intensas e umidade atmosférica.

As vantagens proporcionadas pela arquitetura subterrânea são aplicáveis em todas as regiões construídas, no entanto, estão sempre intrinsecamente ligadas às soluções construtivas locais. Os desafios podem variar conforme as características do local, incluindo o tipo de solo, clima, quantidade de chuvas, temperatura, riscos sísmicos, tornados e outros fatores. O projetista deve realizar uma análise profunda da região e dos elementos que afetarão a edificação subterrânea, buscando assim desenvolver soluções adequadas para o projeto.

Os avanços atuais na engenharia têm possibilitado a construção de edifícios subterrâneos em climas tropicais e subtropicais, mesmo em áreas com elevados índices pluviométricos. A região em que o edifício será construído influenciará diretamente na tipologia e no formato da edificação. Características como o tipo de solo e a topografia do terreno podem contribuir para a adaptação mais eficiente da arquitetura subterrânea, especialmente em períodos chuvosos. Em locais onde o solo é pouco estruturado geologicamente e há histórico de deslizamentos durante longos períodos de chuva, a construção de edifícios subterrâneos próximos a encostas ou morros não seria apropriada.

Um exemplo de edificação subterrânea totalmente submersa, com um pátio central, oferece benefícios térmicos significativos devido à maior área externa em contato direto com o solo. Contudo, a implementação bem-sucedida desse tipo de projeto requer planejamento detalhado de drenagem para lidar com a gestão da água. O custo de construção dessas estruturas deve ser criteriosamente avaliado para garantir equilíbrio adequado entre custo e benefício para o proprietário. O desafio do alto volume pluviométrico pode ser superado por meio de um projeto bem-planejado e estratégico, caso for avaliado que é viável essa técnica construtiva no determinado local.

Ao abordar o desafio relacionado ao elevado volume pluviométrico em edifícios subterrâneos, é possível explorar a eficiência térmica e energética dessa técnica construtiva. A camada de solo tem alta inércia térmica, o que resulta em resposta prolongada ao calor externo que incidiria sobre o edifício. Esse efeito se traduz em temperatura interior mais baixa em dias quentes e mais alta em dias frios, devido à demora na dissipação do calor. Como resultado, a necessidade de consumo de energia elétrica para resfriamento ou aquecimento é reduzida devido à manutenção mais constante da temperatura interna do edifício.

A transferência de calor ocorre entre as superfícies externas do edifício e o solo adjacente. Ao aumentar a área em contato com o solo, a temperatura média interna do edifício se aproxima da temperatura média do solo, obtendo menor amplitude térmica. O uso específico do edifício também pode influenciar na carga térmica interna. Os edifícios com baixa carga térmica interna se revelam vantajosos para climas quentes. No entanto, a análise histórica de residências subterrâneas demonstra que esse conceito residencial é eficaz tanto em climas quentes quanto frios.

Os fatores geológicos mais relevantes para edifícios subterrâneos são a temperatura e a condutividade térmica do solo. Esses parâmetros são influenciados por diversos fatores que variam de região para região. A temperatura do solo é sensível às condições climáticas, tendendo a se aproximar da temperatura média do ar externo. A condutividade térmica do solo é afetada pela presença de umidade, sendo que quanto maior o teor de água nos vazios do solo, maior será a sua condutividade térmica.

O setor da construção civil inevitavelmente causa impacto ambiental, tornando essencial adotar medidas que minimizem seu alcance, visando menor interferência no ambiente local. A arquitetura subterrânea apresenta impacto direto nas camadas superficiais do solo e envolve significativo consumo energético devido às atividades de movimentação do solo. Mesmo empregando materiais de elevado consumo energético na construção, como o concreto, o resultado de um edifício subterrâneo se traduz em consumo reduzido de energia, o que contribui para um balanço energético positivo e uma menor pegada ambiental.

Um benefício adicional da arquitetura subterrânea é a liberação da superfície do solo, permitindo a criação de áreas verdes. Essa abordagem acaba por promover um ambiente mais propício para a fauna e flora local, contribuindo para a preservação e enriquecimento do ecossistema.

A revisão de literatura revelou-se abrangente em áreas caracterizadas por climas mais secos, envolvendo tanto regiões de clima quente quanto frio. A ausência de estudos direcionados aos climas tropicais, especialmente aqueles com altos índices de precipitação, destaca-se como uma lacuna significativa que merece atenção para a compreensão aprimorada das técnicas construtivas. A residência protegida pelo solo, como a arquitetura subterrânea, devido à sua importância histórica ao longo de diferentes períodos, ainda é utilizada em regiões de climas extremos. A expansão dessa técnica construtiva pode auxiliar no desempenho térmico e energético de outras regiões e climas.

Embora o tema ressurgisse periodicamente, a pesquisa acadêmica ainda carece de estudos aprofundados. No contexto brasileiro, a abordagem desse tema é escassa, com alguns relatos sendo explorados, mas sem uma análise detalhada das técnicas e de seu desempenho térmico. A revisão da literatura destaca a existência de diversas lacunas que requerem investigação adicional quanto à arquitetura subterrânea.

3. MÉTODO

O método utilizado está ilustrado nas Figuras 19, 20 e 21, seguindo um fluxo de três etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Na fase de pré-processamento, foram estabelecidos os parâmetros iniciais, abrangendo a seleção das 40 cidades simuladas, as características físicas e térmicas do solo para cada cidade, as unidades habitacionais, as propriedades dos materiais, as cargas térmicas internas, configuração do sistema de aquecimento e resfriamento, além da ventilação natural.

A etapa de simulação seguiu o procedimento estabelecido na NBR 15575-1 (ABNT, 2021), envolvendo a simulação de dois modelos: um com ar-condicionado e outro com ventilação natural. O programa *EnergyPlus* 23.1.0 foi utilizado para processar os dados de entrada e gerar resultados térmicos e energéticos específicos para cada residência nas cidades selecionadas.

Na fase de pós-processamento, os resultados de desempenho térmico foram analisados conforme os critérios da NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Esses resultados permitiram a criação de mapas que identificaram as cidades que tiveram suas residências com nível mínimo, intermediário e superior.

Figura 19 - Fluxograma do método do pré-processamento.

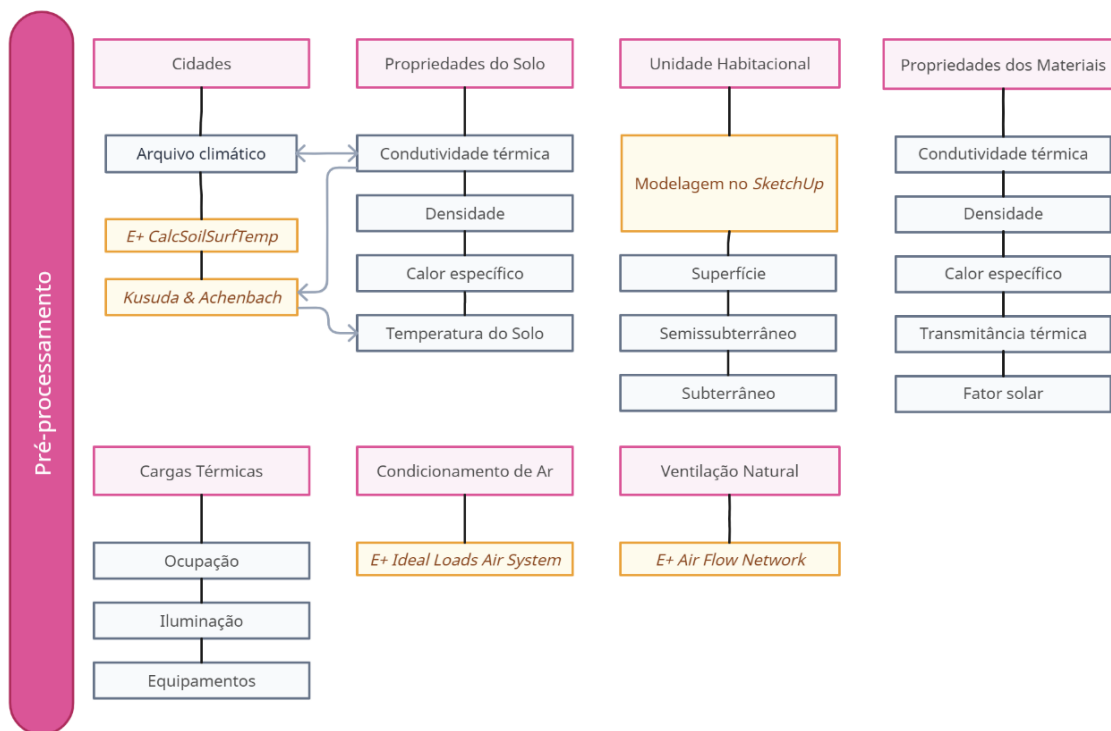


Figura 20 - Fluxograma do método da simulação.

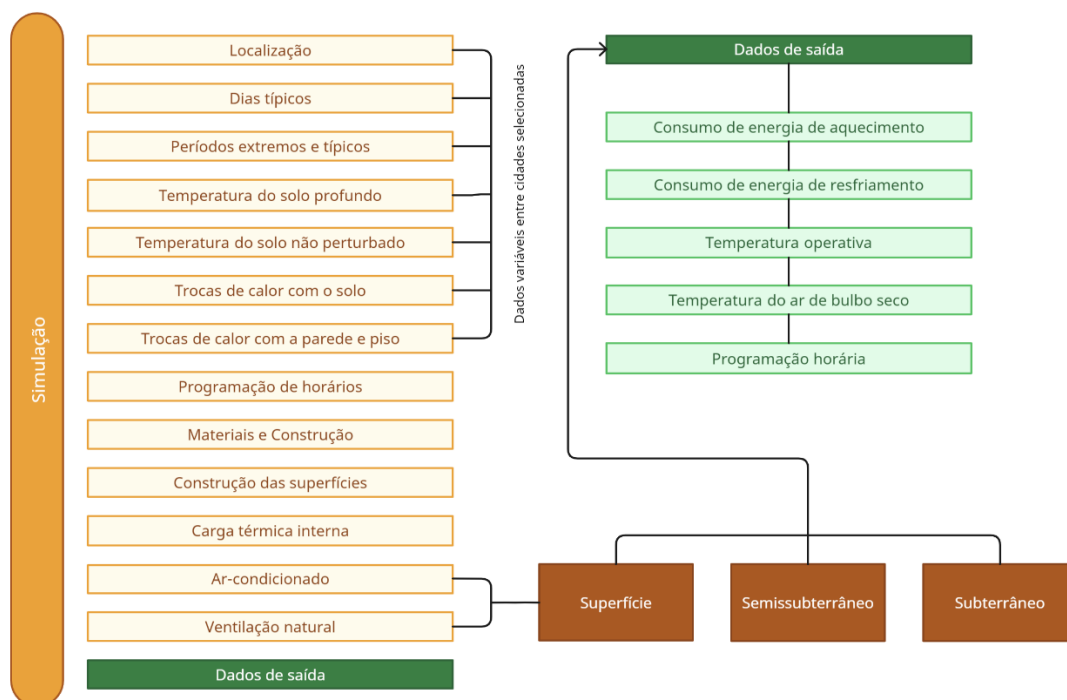
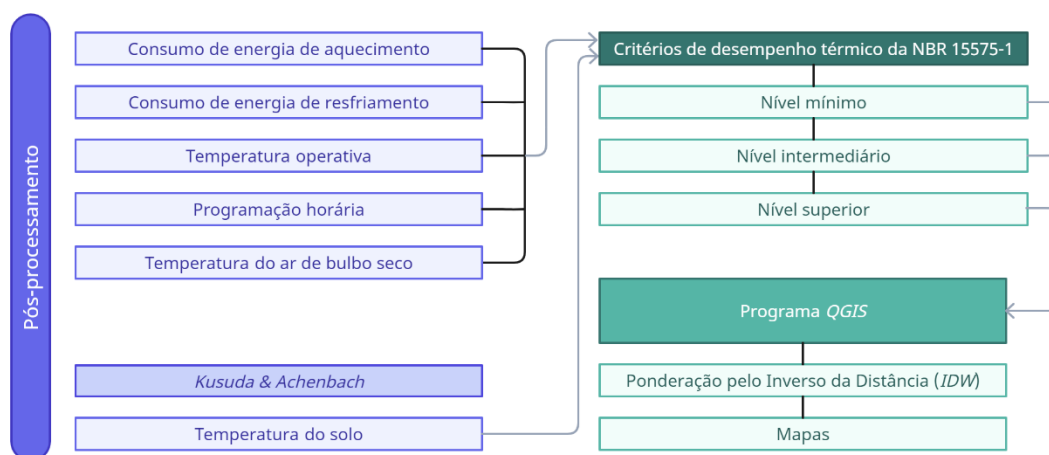


Figura 21 - Fluxograma do método do pós-processamento.



3.1. Pré-processamento

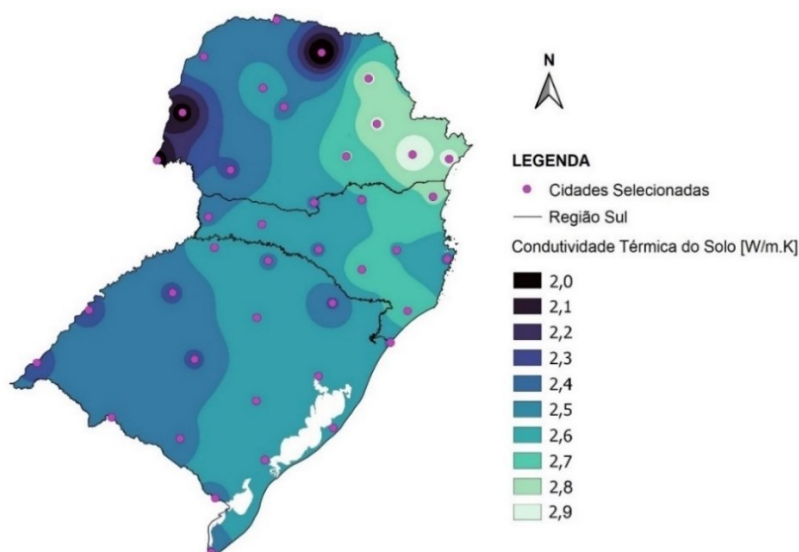
O programa *EnergyPlus* é de natureza complexa e envolve ampla variedade de variáveis de entrada e opções de modelagem. Na fase de pré-processamento, foram consideradas as informações necessárias para conduzir as simulações. Essas informações englobam propriedades do solo e dos materiais, cargas térmicas internas, ventilação natural, especificações das unidades habitacionais, sistemas de ar-condicionado e a seleção das cidades.

3.1.1. Propriedades do Solo

As características do solo são essenciais nas simulações de residências que envolvem transferências térmicas entre o edifício e o solo. Essas propriedades térmicas incluem a condutividade térmica, a densidade, o calor específico e a temperatura do solo. A variação de cada um desses elementos é influenciada por fatores climáticos e geológicos, necessitando de análises laboratoriais e de campo para sua determinação precisa. Costa, Roriz e Chvatal (2017) e Eli *et al.* (2019) evidenciam que a condutividade térmica é um dos fatores de maior impacto nas análises térmicas de edifícios simulados por meio do programa *EnergyPlus*.

Com isso, a condutividade térmica e a temperatura do solo foram individualmente obtidas para cada cidade selecionada. A densidade e o calor específico foram extraídos da NBR 15220 (ABNT, 2005), que fornece valores médios do solo. A norma aborda o solo argiloso seco, com densidade de 1700 kg/m³ e calor específico de 0,84 kJ/(kg.K). A condutividade térmica foi determinada por meio de análises térmicas realizadas por Gomes (2009) em solos da Bacia do Paraná. A Figura 22 mostra esses dados aplicados ao mapa da Região Sul. A Tabela 10 no Anexo B apresenta as condutividades térmicas das 40 cidades selecionadas.

Figura 22 - Mapa de condutividade térmica do solo da Região Sul do Brasil.



Fonte: adaptado de Gomes (2009).

A temperatura média do solo é relativamente constante e está próxima da média anual da temperatura da região. Entretanto, diversos fatores podem influenciar essa temperatura e afetam a maneira como o calor é dissipado. A temperatura do solo pode variar dependendo da classificação e composição do solo, da cobertura vegetal, do tipo e volume das plantas, da profundidade e do relevo.

Os registros climáticos das cidades brasileiras utilizam dados horários de um ano meteorológico típico (*TMY*, sigla em inglês) e incluem informações sobre a temperatura do solo. No entanto, o programa *EnergyPlus* não aconselha o uso direto dos dados de temperatura do solo presentes nos arquivos climáticos, devido à possibilidade de interferências nos dados medidos (ENERGYPLUS, 2021). Neste estudo, a temperatura do solo foi determinada por meio da aplicação da fórmula desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965), conforme a seção 2.5. Os valores da densidade e do calor específico do solo foram mantidos constantes para todos os cálculos. Essa configuração diminui a precisão dos resultados, visto que esses valores são diferentes para cada solo e cidade. No cálculo, a condutividade térmica foi alterada para cada cidade, em função da análise das pesquisas de Costa, Roriz e Chvatal (2017) e Eli *et al.* (2019). A profundidade de quatro metros foi considerada para os cálculos, por ter uma temperatura mais constante e ser a profundidade considerada pelo programa *EnergyPlus* no objeto *Site:GroundTemperature:Deep*.

A realização desse cálculo demanda informações como a temperatura média anual da superfície do solo, a amplitude térmica da superfície do solo e a constante de fase da temperatura da superfície do solo. Esses dados foram obtidos a partir de simulações preliminares realizadas no programa *EnergyPlus*, utilizando o recurso *CalcSoilSurfTemp* e baseado nos arquivos climáticos *TMY* específicos de cada cidade. Para efetuar essas simulações prévias, o programa requer determinados parâmetros, incluindo as condições do solo e da superfície do solo. Para esses parâmetros, foi indicado que o solo era de características densa e seca, seguindo a característica do solo argiloso seco definido pela NBR 15220 (ABNT, 2005). A vegetação na superfície do solo gera sombreamento e auxilia na evapotranspiração do solo. Para parâmetro do cálculo, foi utilizado o solo sem vegetação. Como identificado por Grimm (2009), o sul da região tem

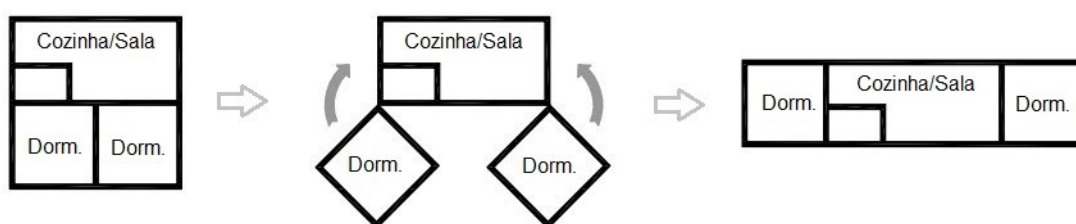
chuvas ao longo do ano e no norte, as chuvas são constantes nos meses chuvosos. Para homogeneizar este fator, a superfície do solo foi identificada como úmida.

3.1.2. Unidade habitacional

A avaliação do desempenho térmico foi conduzida em uma residência unifamiliar com uma área de 39m². Este modelo representa uma típica habitação de baixa renda, que já foi utilizada pelo Governo Federal em programas de habitação social (BRASIL, 2023c). A unidade possui dimensões de 3,0m x 13,0m x 2,8m e abriga dois dormitórios, um banheiro, uma sala e uma cozinha conjugada.

Para a adaptação da residência, foi realizada a linearização da estrutura, com a reorganização dos dormitórios nas extremidades. Essa mudança de configuração, do *layout* quadrado para o retangular, otimiza o contato com o solo, aumentando a área de superfície externa em contato direto com o solo. Isso, por sua vez, melhora as trocas térmicas com as paredes, que podem absorver ou liberar calor para o solo. A Figura 23 mostra a transformação do modelo original para a configuração adotada neste estudo, apresentando a etapa inicial do modelo original e a segunda etapa com os dormitórios posicionados nas extremidades.

Figura 23 - Alteração no *layout* do modelo de residência.

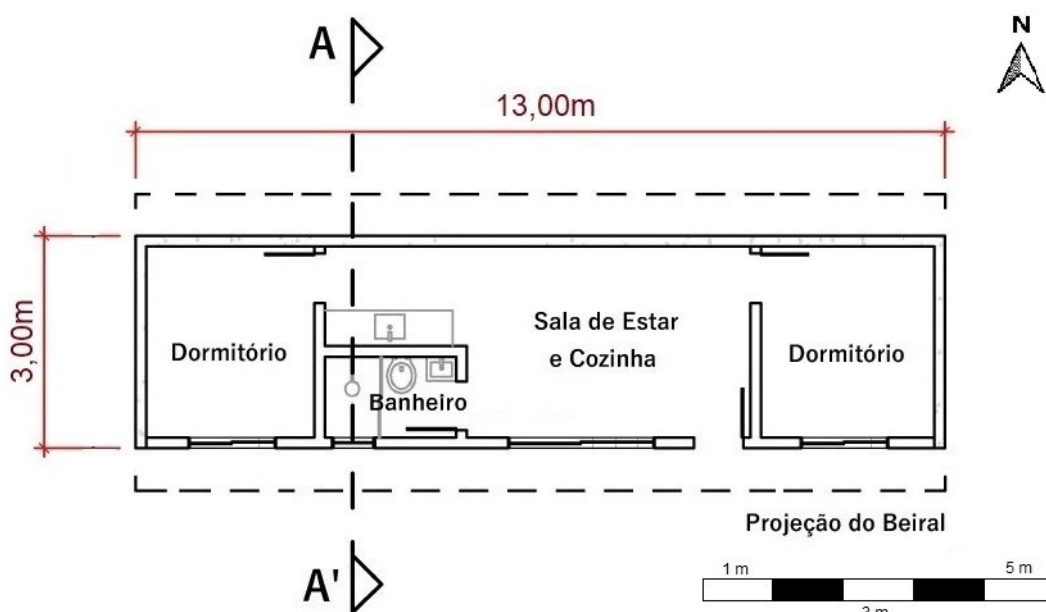


As coberturas dos três modelos de residências simuladas (superfície, semissubterrâneo e subterrâneo) compartilham características idênticas, consistindo em uma laje de concreto com cobertura de telha. A geometria da cobertura permaneceu a mesma, com dois caimentos laterais, embora os beirais tenham sido retirados para as simulações, conforme as diretrizes da NBR 15575-

1 (ABNT, 2021). Essa decisão visou evitar qualquer interferência do sombreamento dos beirais no desempenho térmico.

A planta baixa da edificação permaneceu igual nos diferentes modelos. Nos modelos protegidos pelo solo, as fachadas leste, norte e oeste têm contato direto com o solo, sendo que o modelo semissubterrâneo apresenta profundidade de 1,40 metro, enquanto o subterrâneo chega a 2,80 metros. A fachada sul, por ter menor incidência de radiação solar no Hemisfério Sul, foi projetada para permanecer em contato com as condições climáticas externas. Portanto, os modelos protegidos pelo solo possuem uma área aberta para permitir essas trocas de calor com o ar externo. Essa área rebaixada e sua respectiva sombra não foram consideradas como parte do entorno nas simulações, garantindo que os resultados obtidos reflitam exclusivamente a relação da residência com o solo. O acesso da residência semissubterrânea e subterrânea acontece através da área rebaixada. A Figura 24 apresenta a planta baixa da residência.

Figura 24 - Planta baixa da residência simulada.



Os dormitórios foram dimensionados com $7,50\text{m}^2$ cada um, enquanto o banheiro possui 2m^2 e a sala de estar/cozinha, 22m^2 . Todas as simulações utilizaram a unidade habitacional completa, no entanto, a análise térmica se concentrou na sala de estar/cozinha e nos dormitórios, considerados como

ambientes de permanência prolongada (APP), conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Para se adaptar aos critérios da norma de desempenho, as janelas foram redimensionadas conforme os requisitos para os elementos transparentes, que exigem área transparente correspondente a 17% da área do piso da APP. Como a parede norte foi utilizada para o contato com o solo nas simulações semissubterrâneas e subterrâneas, a sala de estar/cozinha tinha apenas a parede sul disponível para acomodar os 3,74m² de elementos transparentes. Isso resultou em uma abertura relativamente grande para uma residência desse porte, mas foi um ajuste necessário para cumprir com as diretrizes da NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Quanto aos dormitórios, cada um foi projetado com área de 1,27m² de elementos transparentes. Além disso, os critérios que requerem uma abertura de 45% foram respeitados, atingindo o percentual de 7,65% de abertura para ventilação, o que deixou os dormitórios com 0,57m² de área de abertura para ventilação. A sala de estar/cozinha também recebeu 1,68 m² de abertura para ventilação. Os perfis das esquadrias foram adicionados aos modelos de simulação segundo a NBR 15575-1, e as propriedades térmicas dos perfis e vidros estão detalhadas na seção 3.1.4.

A única alteração entre os modelos é o nível do edifício. Com isso, foi realizada uma avaliação da eficácia da proteção do solo, investigando se uma maior porcentagem da área externa da edificação em contato com o solo resultaria em desempenho superior. As Figuras 25, 26 e 27 apresentam cortes esquemáticos das edificações e suas interações com o solo. A Figura 25, que representa a residência da superfície, mostra apenas o piso em contato com o solo, abrangendo 23% da área externa total de 158 metros quadrados. Por sua vez, as Figuras 26 e 27 contemplam 39% e 55% da área externa em contato com o solo, respectivamente.

Figura 25 - Corte esquemático da residência da superfície simulada.

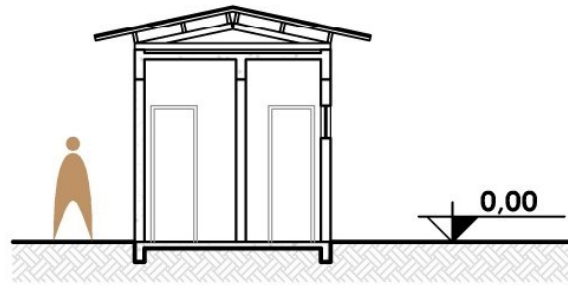


Figura 26 - Corte esquemático da residência semissubterrânea simulada.

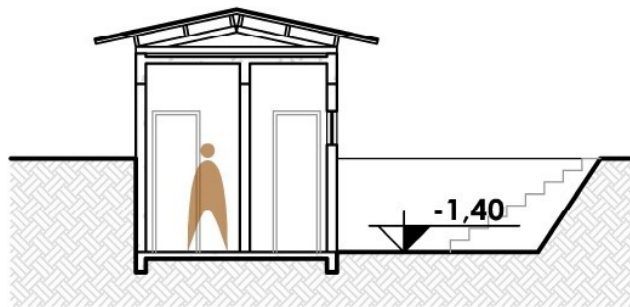
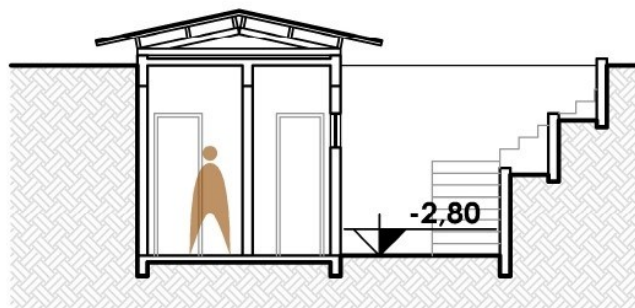


Figura 27 - Corte esquemático da residência subterrânea simulada.



3.1.3. Cidades

A seleção das cidades para as simulações foi realizada em três etapas distintas, levando em consideração alguns critérios: disponibilidade de dados climáticos, diversidade na condutividade térmica do solo e distribuição geográfica equidistante. Na primeira etapa, foi conduzida uma análise para identificar cidades com arquivos climáticos disponíveis, sendo cada cidade destacada no mapa correspondente ao seu Estado. O total de 92 cidades foram selecionadas em toda a Região Sul, com 25 cidades no Paraná, 25 em Santa Catarina e 42

no Rio Grande do Sul. Os arquivos climáticos foram obtidos por meio do *site climate.onebuilding.org*, seguindo o formato meteorológico do *EnergyPlus* (*EPW*) e baseados em dados de um ano meteorológico típico (*TMY*).

A segunda etapa abordou a variabilidade na condutividade térmica do solo, com valores variando de 2,0 a 2,9 W/(m.K). A Tabela 1 mostra a relação das 92 cidades com suas respectivas condutividades térmicas. Na terceira etapa, a localização das cidades foi examinada no mapa de cada Estado, visando evitar a seleção de cidades com condutividade térmica e clima muito semelhantes. Por outro lado, foi necessário evitar uma distância excessiva entre as cidades para preservar um número suficiente de cidades por Estado, garantindo assim a sensibilidade dos resultados.

Tabela 1 – Condutividade térmica por cidades.

| Número de cidades | Condutividade térmica do solo (W/m.K) |
|--------------------------|--|
| 1 | 2,0 |
| 3 | 2,1 |
| 2 | 2,2 |
| 1 | 2,3 |
| 9 | 2,4 |
| 35 | 2,5 |
| 24 | 2,6 |
| 10 | 2,7 |
| 5 | 2,8 |
| 2 | 2,9 |

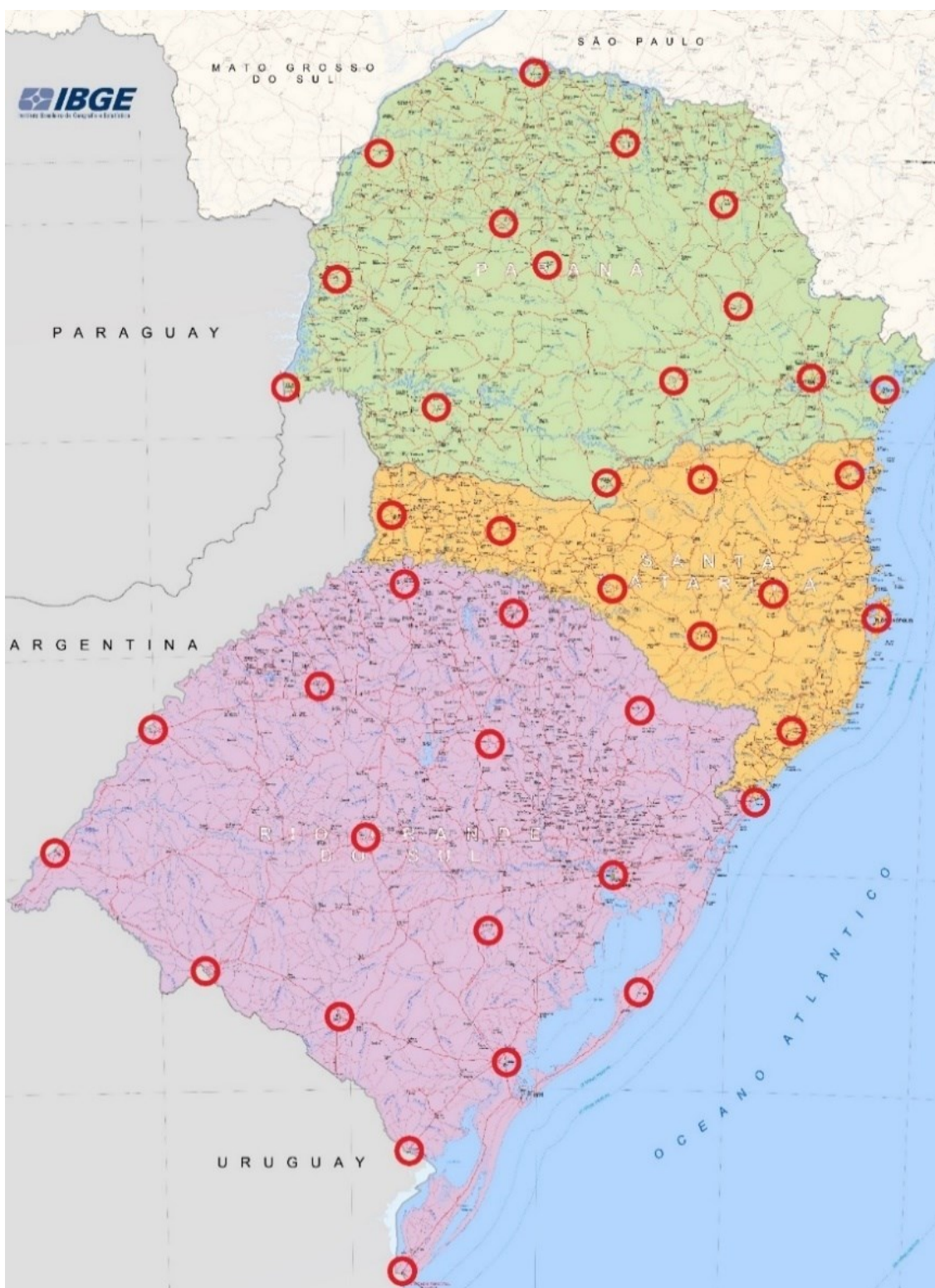
O método de interpolação empregado para gerar os mapas foi a interpolação ponderada pela distância inversa. Conforme a documentação do programa *QGIS*, esse método pode comprometer a qualidade do resultado da interpolação quando a distribuição dos pontos de dados da amostra não é uniforme (*QGIS*, 2023). Portanto, a seleção dos pontos de dados foi realizada considerando a manutenção de distâncias equivalentes ou próximas desse valor, para obter resultados mais precisos. Nesse processo, foram escolhidas 40 cidades para serem submetidas às simulações computacionais. A variabilidade

na condutividade térmica das cidades selecionadas está apresentada na Tabela 2, enquanto a Figura 28 exibe a localização geográfica de cada cidade dentro da Região Sul. O arquivo climático incluiu a altitude de cada cidade, o que é importante para a análise e comparação com os resultados obtidos nas simulações. Essas informações estão disponíveis na Tabela 10 no Anexo B.

Tabela 2 - Variabilidade de condutividade térmica por cidades selecionadas

| Número de cidades | Condutividade térmica do solo (W/m.K) |
|--------------------------|--|
| 1 | 2,0 |
| 2 | 2,1 |
| 6 | 2,4 |
| 14 | 2,5 |
| 9 | 2,6 |
| 4 | 2,7 |
| 3 | 2,8 |
| 1 | 2,9 |

Figura 28 - Cidades selecionadas para as simulações das residências.



Fonte: adaptado de IBGE (2023).

3.1.4. Propriedades dos materiais

Os materiais apresentam propriedades fundamentais, incluindo a condutividade térmica, espessura, densidade e calor específico. Esses fatores têm impacto direto na temperatura interna da residência e na quantidade de energia necessária para aquecê-la ou resfriá-la. As Tabelas 3 e 4 mostram as propriedades dos materiais utilizados nos modelos simulados neste estudo. A utilização desses materiais é padrão para a análise de desempenho térmico, definidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Tabela 3 - Propriedades dos materiais das residências simuladas.

| Material | Condutividade térmica (W/m.K) | Densidade (kg/m ³) | Calor específico (J/kg.K) | Espessura (m) |
|--------------------|---|--|-------------------------------------|-------------------------|
| Parede de concreto | 1,75 | 2200 | 1000 | 0,10 |
| Piso de concreto | 1,75 | 2200 | 1000 | 0,10 |
| Laje de concreto | 1,75 | 2200 | 1000 | 0,02 |
| Porta de madeira | 0,15 | 650 | 2300 | 0,03 |
| Telha | 0,65 | 1700 | 840 | 0,006 |

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Tabela 4 - Absortâncias dos materiais das residências simuladas.

| Material | Absortância de ondas longas | Absortância da radiação solar | Absortância da radiação de luz visível |
|------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Parede Interna | 0,90 | 0,50 | 0,50 |
| Parede Externa | 0,90 | 0,58 | 0,58 |
| Piso de Concreto | 0,90 | 0,50 | 0,50 |
| Laje de Concreto | 0,90 | 0,50 | 0,50 |
| Porta de Madeira | 0,90 | 0,50 | 0,50 |
| Telha | 0,90 | 0,65 | 0,65 |

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Além das diretrizes referentes ao redimensionamento de elementos transparentes e ao percentual de abertura para ventilação, a NBR 15575-1 também estipula as propriedades que devem ser aplicadas nas janelas. Isso inclui a utilização de vidro simples incolor com espessura de três milímetros como material transparente, bem como a descrição das propriedades dos perfis das janelas. Essas diretrizes visam garantir resultados mais precisos e maior fidelidade com modelos do mundo real. As Tabelas 5 e 6 mostram as propriedades do vidro e do perfil da janela conforme especificadas na norma.

Tabela 5 - Propriedades do vidro das janelas.

| Material | Condutividade (W/m.K) | Transmitância (W/m ² .K) | Fator Solar |
|-----------------------|---------------------------------|---|--------------------|
| Vidro simples incolor | 0,90 | 5,7 | 0,87 |

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Tabela 6 - Propriedades das esquadrias das janelas.

| Absortância à radiação solar dos perfis | Emissividade de onda longa dos perfis | Condutividade térmica (W/m ² .K) | Largura dos perfis da esquadria (mm) |
|--|--|---|---|
| 0,58 | 0,90 | 56 | 50 |

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Segundo as diretrizes estabelecidas pela norma de desempenho, a cobertura externa deve seguir uma sequência específica de materiais nas simulações. Além da telha e da laje mencionadas anteriormente, a cobertura deve incluir, entre esses materiais, uma câmara de ar com uma resistência térmica de 0,21 (m².K)/W. Essa configuração permite que o programa *EnergyPlus* interprete os dados de um telhado inclinado, onde essa camada de ar é distribuída uniformemente por toda a cobertura.

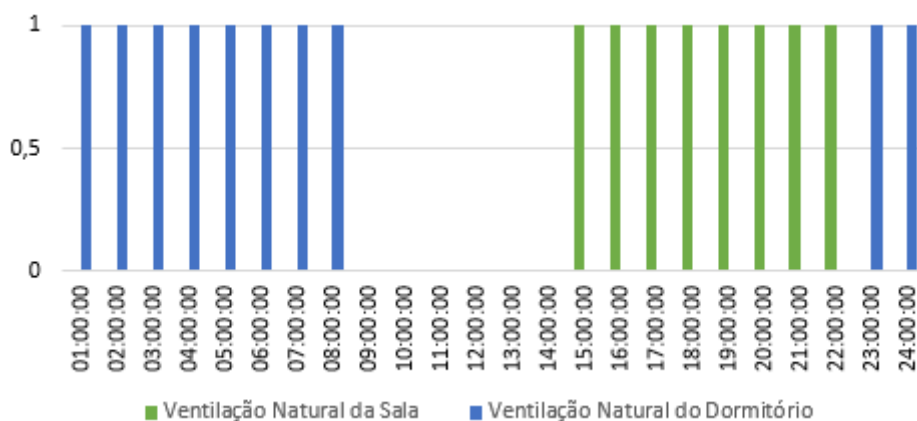
3.1.5. Ar-condicionado e ventilação natural

O controle da temperatura interna está ligado à ventilação natural dos ambientes, e quando a temperatura atinge níveis elevados ou muito baixos, o sistema de

condicionamento de ar é ativado para regular a temperatura. Os critérios para a aplicação desses dois métodos de controle de temperatura foram obtidos na NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

No contexto das simulações, a ventilação natural ocorre somente quando há ocupação na APP, conforme mostra a Figura 29, onde um significa ambiente ocupado e zero, ambiente desocupado. Além disso, as janelas são abertas e fechadas com base na diferença de temperatura entre o ar interno e externo. A exceção é a janela do banheiro, que permanece aberta durante todo o dia. Essas aberturas das janelas ocorrem quando o espaço está ocupado, quando a temperatura de bulbo seco interna atinge ou excede 19°C, ou quando a temperatura de bulbo seco interna é maior que a temperatura de bulbo seco externa.

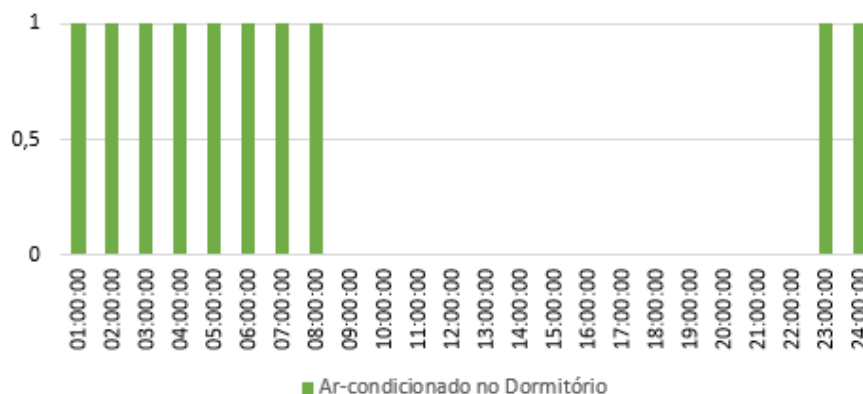
Figura 29 - Período de utilização de ventilação natural.



O sistema de ar-condicionado também é ativado apenas durante os períodos em que há ocupação de pessoas na APP, conforme representado na Figura 30, onde um significa ambiente ocupado e zero, ambiente desocupado. O programa *EnergyPlus* calcula a carga térmica ideal para resfriamento e aquecimento para cada APP e, conseqüentemente, para a unidade habitacional toda. Nesse sistema, apenas a temperatura ambiente é levada em consideração, sem considerar a umidade. Conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), quando o ar-condicionado é ativado, a temperatura de *setpoint* para resfriamento é de 23°C, enquanto para aquecimento é de 21°C. Além disso, as janelas e portas

permanecem sempre fechadas durante o funcionamento do sistema de ar-condicionado.

Figura 30 - Período de utilização de ar-condicionado.



3.1.6. Cargas térmicas

As cargas térmicas internas determinam a quantidade de calor introduzido em cada ambiente de permanência prolongadas (dormitórios, sala e cozinha) com base na ocupação do espaço e na geração de calor pelas pessoas, iluminação e equipamentos, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021). As Figuras 31, 32 e 33 exibem os períodos diários durante os quais a ocupação de pessoas, iluminação e equipamentos estão ativos em cada ambiente. O valor 1 indica que a função está ativa no ambiente, enquanto o valor 0 indica que a função está inativa. A densidade de potência instalada para iluminação foi definida como 5 W/m² na sala e nos dormitórios, enquanto os equipamentos estão presentes apenas na sala, com uma DPI de 120 W. Esses valores quando ativos utilizam de toda a potência definida no programa *EnergyPlus*.

Figura 31 - Período de ocupação.

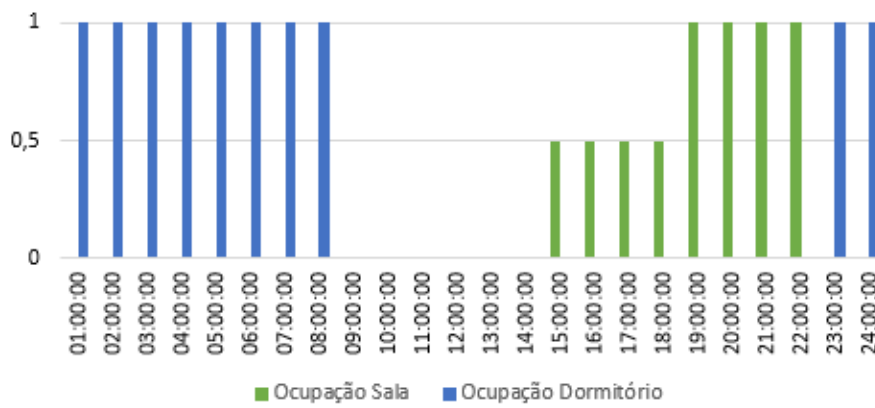


Figura 32 - Período do sistema de iluminação.

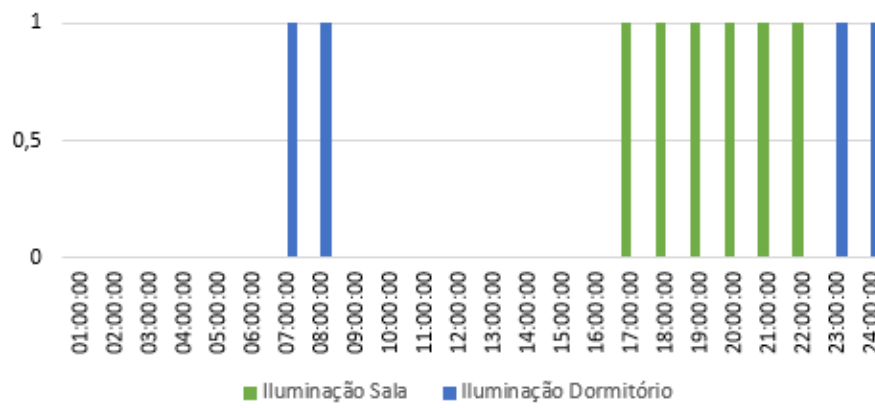
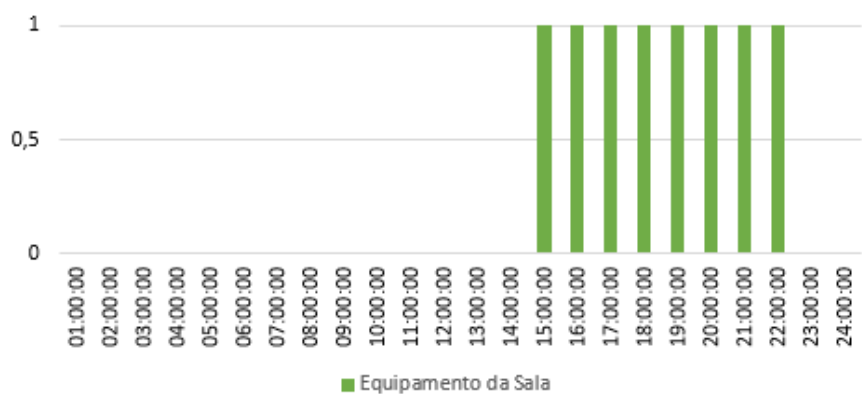


Figura 33 - Período de equipamento.



3.2. Simulação

A simulação ocorreu baseada com o procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1. A norma estabelece requisitos e critérios de desempenho aplicáveis a edificações habitacionais (ABNT, 2021). A avaliação de desempenho térmico foi realizada nas áreas de permanência prolongada da residência unifamiliar. A residência totalmente na superfície foi o caso de referência, a partir dos resultados da simulação dessa edificação foi realizado o comparativo entre as residências semissubterrânea e subterrânea.

3.2.1. Localização

Os dados de localização são essenciais para a identificação do local simulado. Conforme o *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021), quando se realiza simulação anual, a inclusão da localização não se faz necessária, incorporadas no arquivo climático. As informações essenciais compreendem o nome do local, a latitude, a longitude, o fuso horário e a altitude em relação ao nível do mar.

Neste estudo, foram realizadas simulações em diversas cidades, e mesmo ao utilizar o arquivo climático correspondente a cada uma delas, a localização foi inserida em todas as simulações, variando conforme a cidade e os dados específicos de cada localidade. Essas informações foram extraídas do conjunto de dados do arquivo climático, e posteriormente incorporadas a um arquivo *IDF* dedicado a esse propósito.

3.2.2. Dias típicos

Para realizar simulações de um dia típico, foram empregados os parâmetros definidos no objeto *SizingPeriod:DesignDay*, conforme o *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021). Esse objeto fornece os elementos necessários para a execução das simulações, incluindo informações como a temperatura do ar, radiação solar e outros fatores climáticos.

A fonte dos dados meteorológicos e informações associadas aos dias típicos de cada cidade foi o arquivo *IDF* do conjunto de dados climáticos. Normalmente, esses arquivos contêm cinco dias típicos para cada cidade, compreendendo dois de inverno e três de verão. É importante destacar que o arquivo *IDF* da cidade de Foz do Iguaçu, no Paraná, é uma exceção notável,

pois inclui 78 dias típicos, com seis de inverno e 72 de verão. Todos esses dados foram integrados aos modelos de simulação correspondentes.

3.2.3. Períodos extremos e típicos

Durante a criação dos arquivos *EPW*, um procedimento é utilizado para identificar os períodos extremos e típicos no arquivo meteorológico real. O objeto *SizingPeriod:WeatherFileConditionType* possibilita a seleção de um desses períodos para os cálculos de dimensionamento de carga térmica.

Os dados associados a esses períodos foram obtidos diretamente do arquivo *IDF* contido no conjunto de dados climáticos. Foram selecionados seis períodos, abrangendo um dia típico para cada estação do ano (verão, inverno, primavera e outono), bem como um dia extremo de verão e um de inverno. Todos os dados relacionados a esses períodos extremos e típicos, específicos de cada cidade, foram integrados aos modelos de simulação correspondentes.

3.2.4. Temperatura do solo profundo

No componente *Site:GroundTemperature:Deep* são incorporadas as temperaturas do solo profundo de cada mês, conforme as diretrizes do *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021). A temperatura do solo a uma profundidade de quatro metros é calculada para o solo em condições "não perturbadas" e em situações "típicas". A temperatura mensal do solo para cada cidade foi simulada conforme descrito na seção 3.1.1., utilizando o arquivo climático e uma simulação preliminar no programa *EnergyPlus*.

Esses dados foram consolidados na equação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965), como mencionado na seção 2.5. A profundidade de quatro metros foi adotada para calcular a temperatura mensal do solo profundo, seguindo as práticas do programa *EnergyPlus* e documentado no arquivo de referência de entrada e saída de dados.

3.2.5. Temperatura do solo não perturbado

O objeto *Site:GroundTemperature:UndisturbedKusudaAchenbach* fornece a temperatura do solo não perturbado com base na correlação estabelecida por Kusuda e Achenbach (1965). Essa correlação emprega três parâmetros

(temperatura média do solo, amplitude do solo e deslocamento de fase) para calcular a temperatura do solo superficial, a fim de compará-la com a temperatura do solo não perturbado em relação à profundidade e ao tempo (ENERGYPLUS, 2021).

As informações sobre o solo incluem sua condutividade térmica, densidade, calor específico, temperatura média anual da superfície do solo, amplitude térmica da superfície do solo e a constante de fase da temperatura da superfície do solo. Para cada cidade simulada, esses dados foram ajustados, exceto a densidade e o calor específico do solo, conforme detalhado na seção 3.1.1. A condutividade térmica do solo foi obtida a partir das características específicas de cada cidade selecionada, enquanto as demais informações foram derivadas de simulações realizadas no pré-processador *CalcSoilSurfTemp*, presente no programa *EnergyPlus*.

3.2.6. Trocas de calor pelo piso e paredes

Segundo o *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021), o objeto *Site:GroundDomain:Slab* é utilizado para simular a transferência de calor por meio do solo em superfícies horizontais de edifícios no programa *EnergyPlus*. O objeto *Site:GroundDomain:Basement* é usado para simular a transferência de calor acoplada ao solo com ambientes subterrâneos no *EnergyPlus*, o objeto *basement* é utilizado em superfícies verticais e horizontais, traduzindo na edificação como piso e paredes da zona. Nas simulações realizadas neste estudo, esse objeto *Slab* foi utilizado para modelar as trocas de calor no piso da edificação da superfície e o objeto *Basement* utilizado para as trocas de calor do piso e das paredes dos modelos semissubterrâneos e subterrâneos.

As alterações efetuadas nestes objetos se concentraram na adaptação da condutividade térmica, densidade e calor específico do solo. Para cada cidade considerada, a condutividade térmica específica daquela localidade foi incorporada, enquanto os valores de densidade e calor específico permaneceram inalterados, conforme a seção 3.1.1. Os demais parâmetros de entrada foram mantidos conforme as configurações padrão estabelecidas pelo programa *EnergyPlus*. As Figuras 34, 35 e 36 mostram os modelos da superfície,

semissubterrâneo e o subterrâneo com suas respectivas *GroundDomain* aplicadas.

Figura 34 - Método de cálculo do *GroundDomain* aplicado na residência da superfície.

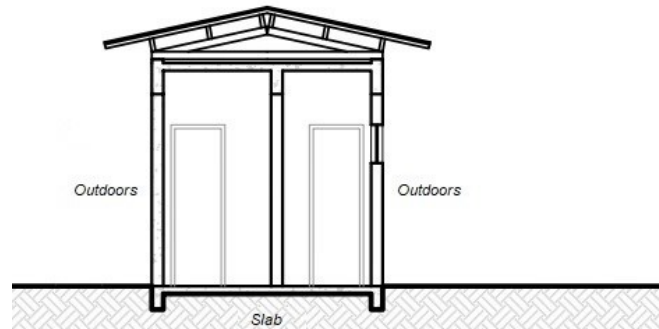


Figura 35 - Método de cálculo do *GroundDomain* aplicado na residência semissubterrânea.

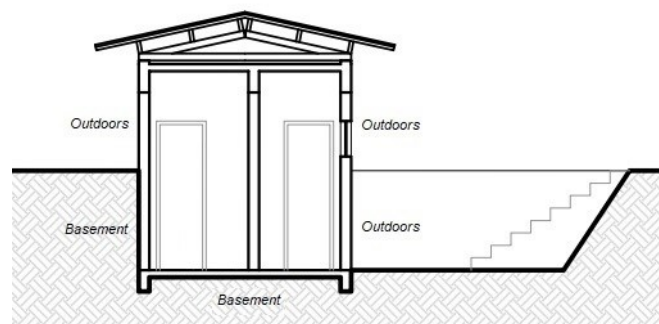
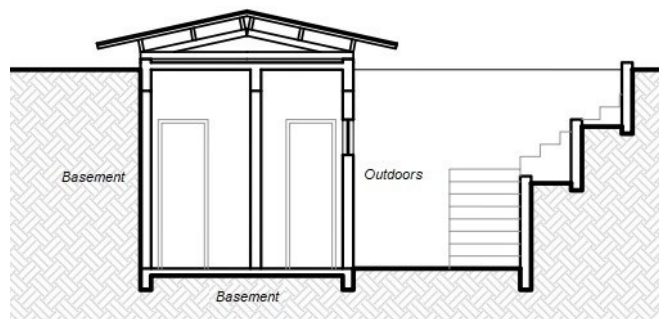


Figura 36 - Método de cálculo do *GroundDomain* aplicado na residência subterrânea.



3.2.7. Programação de horários

O *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021) expressa que o objeto *Schedule* influencia sobre o agendamento de diversos elementos, tais como densidade de ocupação, iluminação, controles termostáticos e atividade de ocupação. A descrição diária é empregada e consiste em simplesmente um nome e os valores correspondentes que abrangem as 24 horas de um dia, a serem associados a esse nome. Esses agendamentos são processados pelo *EnergyPlus* e podem ser acessados por meio de rotinas de módulo para obter informações essenciais, como intervalos de tempo e valores por hora, entre outros.

O agendamento desses elementos nas simulações seguiu as recomendações da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021). A ocupação do ambiente, a iluminação, o uso de equipamentos, período de ventilação natural e ar condicionado foram programados nesse objeto.

3.2.8. Materiais e construção de superfícies

As propriedades dos materiais e a construção com esses materiais são incorporadas a esses componentes. Conforme o *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021), o objeto *material* abrange as quatro principais propriedades térmicas dos materiais (espessura, condutividade térmica, densidade e calor específico).

Depois da configuração dos materiais, esses elementos são aplicados ao objeto *construction* para criar as camadas correspondentes, como paredes, telhados, janelas, pisos, portas e janelas. Nesse objeto, a ordem das camadas é definida, especificando quais materiais estão localizados na parte externa e interna das zonas. Os detalhes sobre os materiais e a construção das camadas dos elementos estão apresentados na seção 3.1.4.

Dentro do objeto "*BuildingSurface*", cada superfície presente nas zonas, como dormitórios, sala e banheiro, é descrita. São especificadas superfícies como o piso, as paredes, a laje, a cobertura, portas e janelas para cada uma dessas zonas. Essas superfícies são fundamentais para a composição de cada zona. Nesse contexto, as superfícies são classificadas em externas, internas e

em contato com o solo, e a integração com os objetos *Slab* e *Basement* é realizada aqui para estabelecer conexões significativas.

3.2.9. Pessoas, iluminação e equipamentos

O objeto de pessoa é empregado para modelar o impacto do ocupante nas condições do espaço (ENERGYPLUS, 2021). Neste objeto, são definidos o número de pessoas por zona e o modelo de "*schedule*" a ser seguido para essa informação. Segundo o *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2021), o objeto de iluminação fornece detalhes sobre o sistema elétrico de uma zona, incluindo a potência, o cronograma de funcionamento e o calor gerado pela iluminação artificial. Por sua vez, o objeto de equipamento elétrico descreve o consumo de energia do equipamento e o calor gerado por ele.

As simulações seguiram as diretrizes da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021). A ocupação, o calor gerado pela iluminação e o equipamento são detalhados nas seções 3.1.6 e 3.2.7, que abordam as cargas térmicas internas das zonas e a programação das atividades dentro de cada zona.

3.2.10. Ar-condicionado e ventilação natural

O objeto *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem* funciona como um simulador de carga térmica, especialmente projetado para sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (*HVAC*, em inglês). Ele oferece uma maneira simplificada de analisar o desempenho de um edifício sem a necessidade de criar um modelo detalhado de um sistema *HVAC* completo. Conforme os parâmetros definidos na seção 3.1.5, para completar esse sistema, são estabelecidas temperaturas mínimas e máximas que acionam o aquecimento ou resfriamento (ENERGYPLUS, 2021).

Nas simulações que envolvem ar-condicionado, o objeto *AirflowNetwork* é utilizado para simular a infiltração de ar nos ambientes, uma vez que as residências brasileiras geralmente não são totalmente vedadas. Nesse cenário, as janelas e portas permanecem fechadas, com exceção da janela do banheiro, que permanece aberta (ABNT, 2021).

A ventilação natural dos ambientes também é configurada por meio do *AirflowNetwork*, seguindo critérios estabelecidos pela norma de desempenho.

Esses critérios determinam os momentos em que as janelas e portas devem estar abertas, como descrito na seção 3.1.5. No modelo, as portas internas permanecem sempre abertas.

3.2.11. Dados de saída

A partir das informações fornecidas no programa *EnergyPlus*, é necessário definir quais dados de saída são necessários para fins de análise. O objeto *Output* permite a especificação dos resultados desejados. Nas simulações que envolvem ventilação natural, foram configurados três *outputs*: a temperatura operativa de cada ambiente e os cronogramas de ocupação da sala e dos dormitórios. Essa configuração possibilitou a verificação dos critérios de temperatura operativa apenas nos momentos em que as áreas de permanência prolongada estavam ocupadas.

Por outro lado, nas simulações que utilizaram ar-condicionado, os *outputs* exigidos estavam relacionados às cargas térmicas de aquecimento e resfriamento de cada ambiente. Esses dados de carga térmica foram posteriormente analisados em conjunto com os dados de temperatura operativa dos arquivos que usaram ventilação natural. Dessa forma, os resultados da simulação puderam ser avaliados conforme as diretrizes da NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

3.3. Pós-processamento

Nesta etapa, ocorreu a análise e comparação dos resultados relativos ao desempenho térmico e energético das residências, levando em consideração os dados fornecidos pelo programa *EnergyPlus*, os critérios de avaliação na NBR 15575-1 (ABNT, 2021) e o desenvolvimento dos mapas no programa QGIS.

3.3.1. Critérios de análise da NBR 15575-1

Por meio dos dados gerados pelo programa *EnergyPlus*, os resultados foram analisados conforme os requisitos estabelecidos na norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Esses critérios foram submetidos a todas as residências e todas as 40 cidades. Nos modelos com ventilação natural, foram obtidos três indicadores: o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa

(PHFT), a temperatura operativa anual máxima ($T_{o_{max}}$) e a temperatura operativa anual mínima ($T_{o_{min}}$). Nos modelos sem ventilação natural e com sistema *HVAC*, foram calculadas a carga térmica para resfriamento (Cg_{TR}) e aquecimento (Cg_{TA}). Esses valores foram somados para obter a carga térmica total (Cg_{TT}). Esses indicadores são derivados dos três modelos deste estudo, com o modelo de superfície como referência e os modelos semissubterrâneo e subterrâneo representando as edificações reais. Isso permitiu analisar e comparar os dados de desempenho térmico dessas edificações.

O cálculo do o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa depende dos dados de temperatura externa de bulbo seco, da temperatura operativa e da ocupação do ambiente de permanência prolongada. Para determinar a faixa de temperatura operativa aceitável, a temperatura externa média anual de bulbo seco (TBS_m) de cada cidade é considerada. A partir desses dados e das informações fornecidas pela norma de desempenho, pode-se calcular o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), que representa o número de horas em que o ambiente de permanência prolongada está ocupado e mantém uma temperatura operativa dentro da faixa aceitável. Esse valor é dividido pelo número total de horas em que o ambiente de permanência prolongada é ocupado ao longo do ano e multiplicado por cem para obter a porcentagem. O percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa da unidade habitacional é calculado como a média dos valores de cada ambiente de permanência prolongada, conforme estabelecido pela NBR 15575-1 (2021).

As temperaturas operativas anuais máxima e mínima também são calculadas com base nas informações de temperatura operativa e ocupação de cada ambiente de permanência prolongada. Ao analisar as horas de ocupação em cada ambiente ao longo do ano, pode-se identificar as temperaturas máximas e mínimas em cada uma delas. A temperatura operativa anual máxima e mínima da unidade habitacional é determinada como a maior temperatura máxima entre as APPs e a menor temperatura mínima entre as APPs, respectivamente.

No cálculo da Cg_{TR} e da Cg_{TA} , foi utilizada a temperatura operativa da simulação com ventilação natural, o período de ocupação e as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento obtidas por meio das simulações com ar-

condicionado. O valor da carga térmica é considerado somente nos momentos em que a APP está ocupada e a temperatura operativa está fora da faixa de temperatura estipulada pela análise do TBS_m. Esse procedimento é realizado para cada APP e, em seguida, a CgTR e a CgTA de cada APP são somadas para obter os valores totais correspondentes à unidade habitacional. A CgTT é calculada somando a CgTR e a CgTA.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021) estipula três níveis de desempenho térmico: mínimo, intermediário e superior. A avaliação do nível mínimo é baseada nos resultados do modelo com ventilação natural, levando em consideração o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa, temperatura operativa máxima e mínima. Para atingir os níveis intermediário e superior, esses dados são utilizados em conjunto com a carga térmica total. Os critérios para alcançar o nível mínimo incluem: o percentual (PHFT) do modelo real ser maior que 90% do percentual (PHFT) do modelo de referência, a temperatura operativa máxima (To_{max}) do modelo real deve ser menor ou igual à To_{max} da referência, somada a uma temperatura de tolerância definida pela norma, e a temperatura operativa mínima (To_{min}) do modelo real deve ser maior ou igual a To_{min} da referência, subtraído de um valor de tolerância também definido pela norma.

Os níveis intermediário e superior somente podem ser obtidos se a edificação atender aos critérios do nível anterior. No nível intermediário, os critérios estabelecidos são mais rigorosos. O cálculo do percentual (PHFT) neste nível segue diretrizes específicas definidas pela norma de desempenho. É necessário que o percentual Δ PHFT (diferença entre o percentual de referência e o percentual real) seja maior ou igual ao valor mínimo estabelecido, conhecido como Δ PHFT_{min}. O cálculo do percentual mínimo (Δ PHFT_{min}) é baseado no valor do percentual (PHFT) do modelo de referência. Se esse valor for inferior a 70%, é calculado conforme a fórmula definida pela norma. No entanto, se for igual ou superior a 70%, o valor utilizado é zero. A avaliação da To_{max} e To_{min} segue os mesmos critérios estabelecidos no nível mínimo.

Quanto à carga térmica, é avaliada a redução da carga térmica total (RedCgTT) nos modelos reais em comparação com o modelo de referência. Essa redução deve atender ou superar o valor mínimo de redução de carga

térmica ($RedCgTT_{min}$) estipulado. A redução mínima de carga térmica total ($RedCgTT_{min}$) segue a mesma lógica de avaliação do percentual mínimo ($\Delta PHFT_{min}$), ou seja, se o percentual de referência for inferior a 70%, o valor utilizado é zero. No caso de ser igual ou superior a 70%, é realizado um exame do consumo de energia anual por metro quadrado. Se esse consumo for inferior a 100, é utilizado o valor de 17 para residências unifamiliares; caso contrário, deve ser empregado o valor de 27 para o mesmo tipo de residência.

No nível superior, os cálculos do $\Delta PHFT_{min}$, da To_{max} e To_{min} permanecem inalterados em relação ao nível intermediário. A diferença ocorre na $RedCgTT_{min}$, nesse critério, todas as edificações devem ser submetidas ao cálculo do consumo anual por metro quadrado, e se o resultado for inferior a 100, o valor de 35% é adotado como a redução de carga térmica total mínima para residências unifamiliares.

3.3.2. Desenvolvimento de mapas no programa QGIS

Esses resultados obtidos constituem a base fundamental para a elaboração de um mapa de viabilidade da aplicação da estratégia bioclimática passiva de proteção pelo solo em residências nas cidades da Região Sul do Brasil. Esse mapa, que segue uma representação visual semelhante a um mapa de calor, utiliza cores em duas dimensões para apresentar de forma clara e representativa os dados e suas magnitudes.

Para a construção e apresentação desses resultados, bem como para a visualização das temperaturas, consumo energético e viabilidade da abordagem de contato com o solo, foi utilizado o programa QGIS 3.28.7. Esse *software* de código aberto é capaz de processar e analisar dados georreferenciados, proporcionando uma compreensão mais profunda da distribuição espacial das informações. Os mapas foram gerados por meio de uma análise espacial, um processo que manipula dados espaciais para extrair novas informações e significados a partir dos dados originais. A análise espacial é executada com um Sistema de Informação Geográfica (SIG), que disponibiliza ferramentas de análise espacial, incluindo a interpolação de dados (QGIS, 2023).

O modelo de interpolação utilizado foi o ponderado pelo inverso da distância (*IDW*, em inglês). Nesse método, os pontos amostrais são ponderados durante

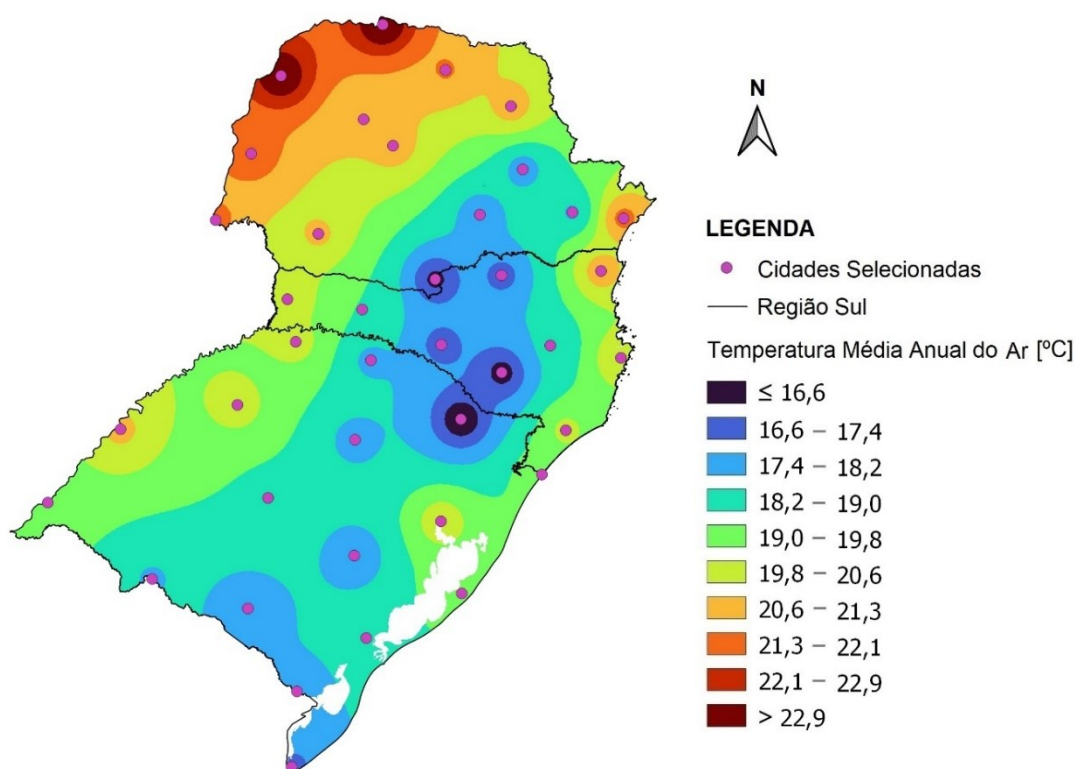
a interpolação de forma que a influência de um ponto em relação ao outro diminui à medida que a distância até o ponto desconhecido aumenta. Dessa maneira, o pós-processamento das simulações enriquece o estudo, proporcionando mapas que destacam, de maneira visual e compreensível, os benefícios e implicações da estratégia de proteção pelo solo como uma abordagem bioclimática passiva nas cidades da Região Sul do Brasil.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização do clima

A fim de definir os indicadores de desempenho térmico, conforme estipulado na NBR 15575-1 (ABNT, 2021), é essencial considerar a caracterização climática. Isso ajuda a determinar em que intervalo as cidades se situam em relação à média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m) e qual a faixa de temperatura operativa foi considerada para cada cidade. A Figura 37 apresenta os resultados das temperaturas médias anuais externas de cada cidade, obtidos por meio de pré-simulações realizadas no programa *EnergyPlus*, utilizando os dados climáticos específicos de cada cidade.

Figura 37 - Temperatura média anual externa de bulbo seco.

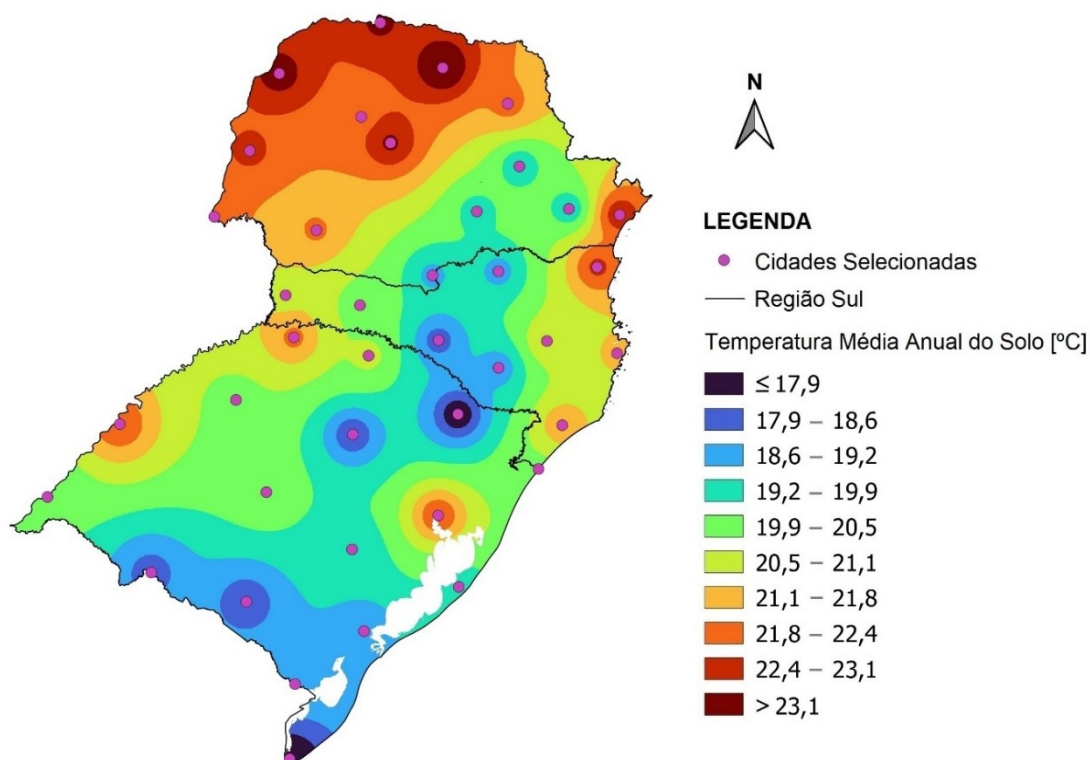


Ao analisar a temperatura, foi visto que todas as cidades estão no intervalo 1 da norma de desempenho, sendo o TBS_m abaixo de 25°C. A partir disso, a norma recomenda que a temperatura operativa de cada cidade tem que ser menor que 26°C e maior que 18°C.

4.2. Temperatura do solo

A temperatura do solo a uma profundidade de quatro metros é suscetível às condições climáticas externas, resultando em variações médias ao longo do ano. A Figura 38 apresenta a média anual da temperatura do solo na Região Sul do Brasil, obtida pelo cálculo de Kusuda e Achenbach (1965), evidenciando que a temperatura do solo é mais elevada nas áreas ao norte e noroeste da Região Sul. Por outro lado, as temperaturas mais baixas são registradas na porção centro-sul da região, com menção especial às cidades de Vacaria, situada no nordeste do Rio Grande do Sul, e Chuí, localizada no sul do Estado. Além disso, a cidade de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul, também se destaca, mas neste caso, devido à sua temperatura do solo mais elevada. A Tabela 11 no Apêndice A apresenta a média mensal da temperatura do solo de cada cidade simulada.

Figura 38 - Temperatura média anual do solo da Região Sul.

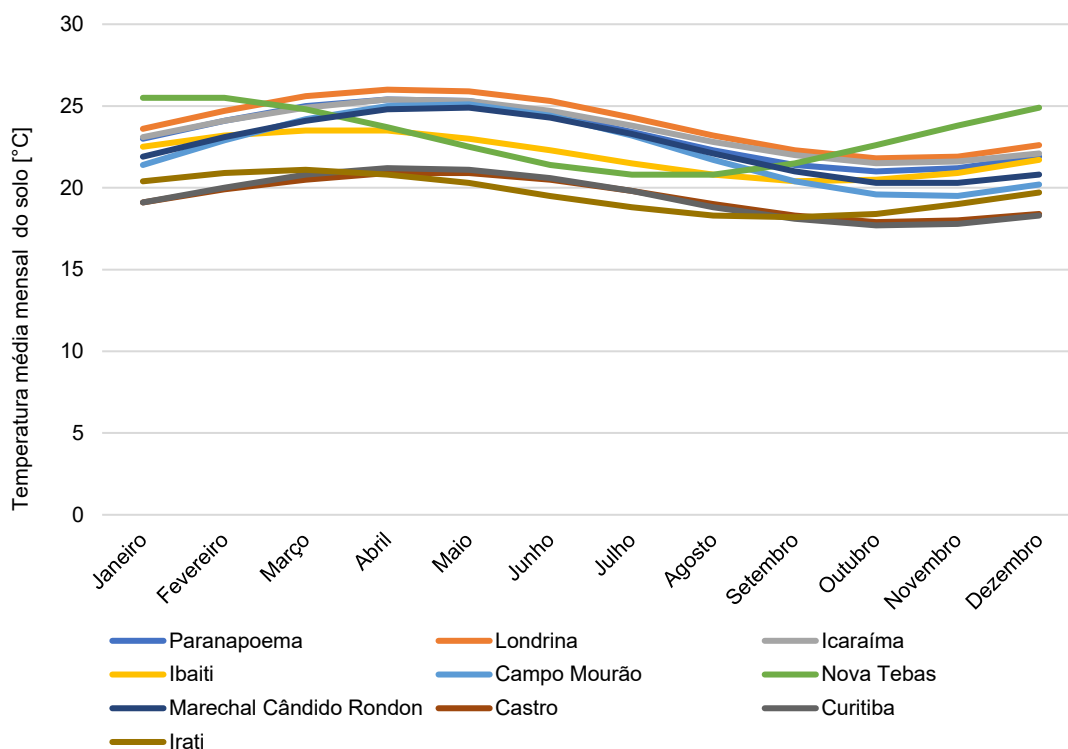


As Figuras 39 a 42 mostram os resultados da temperatura média mensal do solo nas cidades simuladas, com a latitude de cada cidade sendo o parâmetro

de análise crescente. Isso permite examinar a variação da temperatura desde a cidade mais ao norte até a mais ao sul da região. Na Figura 39, pode-se observar a temperatura média mensal do solo nas cidades de 22°38'2"S a 25°28'1"S. A variação de temperatura ao longo dos meses foi semelhante na maioria das cidades, mas houve algumas diferenças notáveis em Nova Tebas, Ibaiti e Irati.

Nova Tebas apresentou temperaturas mais altas nos meses de dezembro e janeiro, diferente das outras cidades simuladas, cujas temperaturas mais altas ocorrem nos meses de abril e maio. Como resultado, o período de temperaturas mais baixas foi adiantado para o mês de julho. Isso indica que essa cidade tem as temperaturas do solo mais elevadas durante o verão e as mais baixas no inverno, em concordância com a variação da temperatura externa do ar. No caso de Irati, a temperatura mais alta foi registrada em março, enquanto a temperatura mais baixa ocorreu em agosto, sugerindo antecipação em comparação com as outras cidades. Quanto a Ibaiti, a cidade apresentou amplitude térmica relativamente baixa, com pouca variação entre as temperaturas mais altas e mais baixas ao longo do ano.

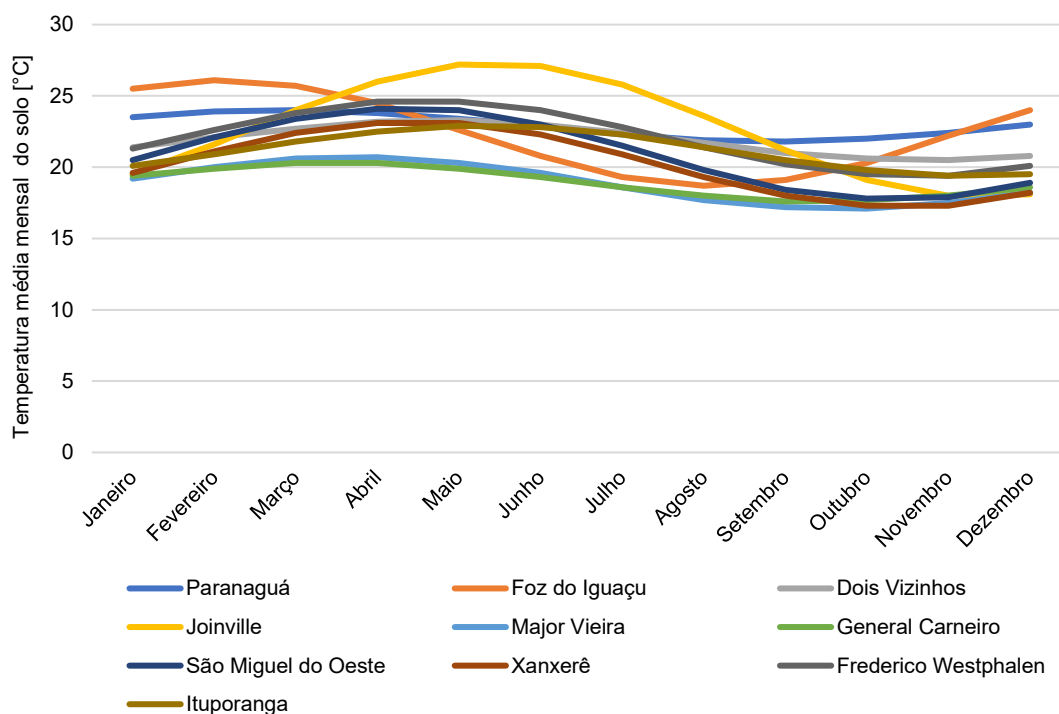
Figura 39 - Temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 25°28'1"S.



As cidades de Irati, Castro e Curitiba, devido à sua localização em regiões de elevada altitude, registram temperaturas mais baixas, o que resulta nas médias mais baixas de temperatura do solo em todo o Estado do Paraná. A Figura 40 mostra a temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 25°31'12"S a 27°24'50"S. As cidades de Foz do Iguaçu e Joinville se destacam por suas variações de temperatura em comparação com as outras cidades simuladas. Foz do Iguaçu exibe amplitude térmica considerável, com a temperatura mais alta em fevereiro e a mais baixa em agosto. Em contrapartida, a cidade de Joinville apresenta a temperatura mais elevada em maio e junho, um comportamento atípico em relação às demais cidades estudadas.

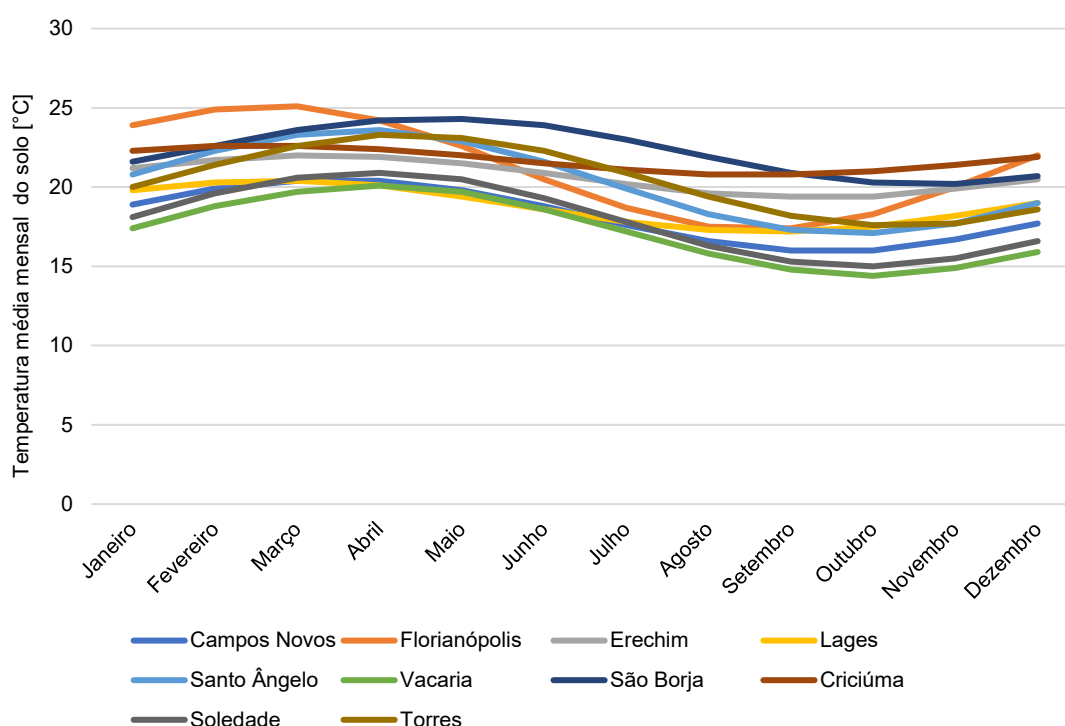
As cidades de Major Vieira e General Carneiro, devido à sua localização em regiões de elevada altitude, registram as temperaturas do solo mais baixas. Quando se analisa a latitude dessas cidades, observa-se que as duas cidades com as temperaturas do solo mais baixas e a cidade de Joinville estão praticamente alinhadas, embora apresentem comportamentos de temperatura do solo completamente diferentes.

Figura 40 - Temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 25°31'12"S a 27°24'50"S.



A Figura 41 mostra a temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 29°20'6"S. Florianópolis se destaca ao apresentar a temperatura do solo mais elevada no mês de março e a mais fria em agosto, semelhante à cidade de Foz do Iguaçu. No entanto, Criciúma se diferencia das demais cidades simuladas ao obter a menor amplitude térmica. Nessa cidade, a temperatura do solo mantém-se praticamente constante ao longo do ano, aproximando-se da média anual da temperatura do ar.

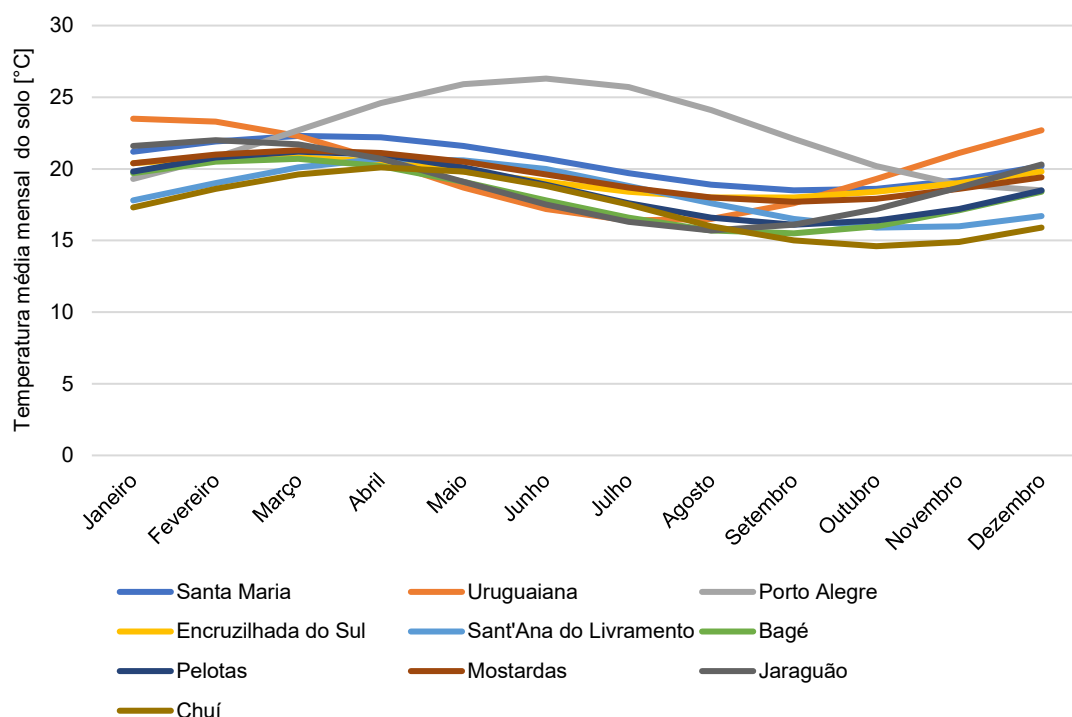
Figura 41 - Temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 29°20'6"S.



A Figura 42 mostra a temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 29°41'2"S a 33°41'27"S. A cidade de Uruguaiana apresenta um padrão de variação de temperatura do solo semelhante ao observado em Nova Tebas e Foz do Iguaçu, com temperaturas mais elevadas no verão e mais frias no inverno. Porto Alegre segue padrão semelhante ao de Joinville, com temperaturas mais elevadas no inverno e mais baixas no verão. Enquanto isso, as demais cidades exibem variações de temperatura do solo que se assemelham à maioria dos resultados obtidos, onde as temperaturas mais

altas ocorrem em março e abril, enquanto as mais baixas são registradas em setembro e outubro.

Figura 42 - Temperatura média mensal do solo de cidades localizadas nas latitudes 29°41'2"S a 33°41'27"S.



A temperatura do solo, quando avaliada na profundidade de quatro metros, é impactada pelo clima da região em que se encontra. Ao analisar os resultados da temperatura do solo nas 40 cidades, ficou evidente que a altitude desempenhou um papel significativo. Cidades situadas em regiões mais elevadas apresentaram temperaturas do ar e do solo mais baixas. Além disso, cidades localizadas na mesma latitude, porém em altitudes diferentes, demonstraram resultados distintos, com as cidades de menor altitude registrando temperaturas mais elevadas em comparação com as de maior altitude. Mesmo assim, as cidades com temperaturas do solo mais elevadas estão presentes no norte da Região Sul e com altitudes média de 359 a 650 metros.

Outro fator que influencia a temperatura do solo é a latitude das cidades. Ao examinar as Figuras 39 a 42, percebe-se redução nas temperaturas máximas

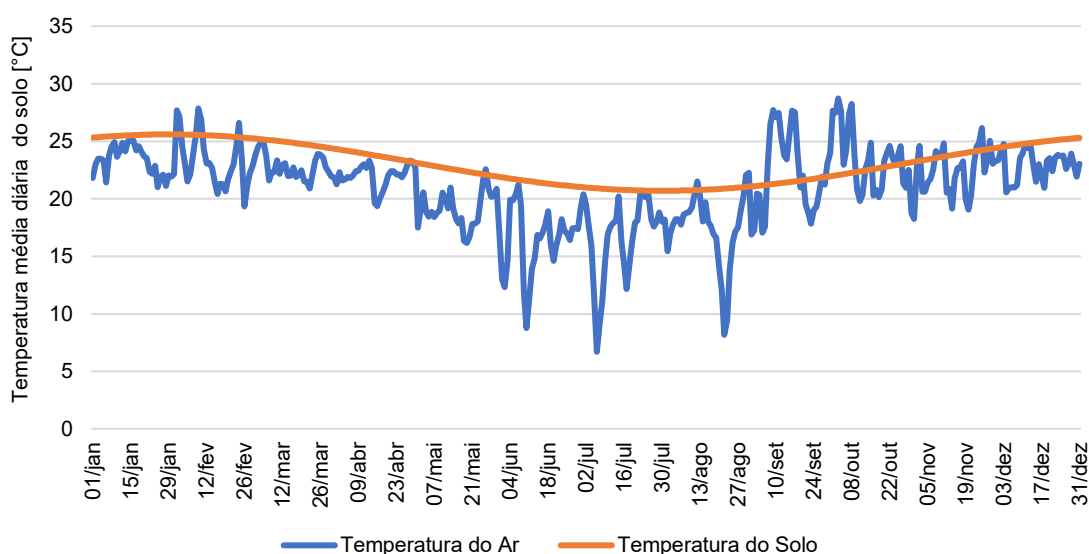
e mínimas, com exceção das cidades que apresentaram variações de temperatura atípicas em relação à maioria. Na Figura 39, por exemplo, a cidade de Londrina alcançou a temperatura do solo mais alta, atingindo 25,9°C, enquanto Curitiba registrou a temperatura mais baixa, com 17,8°C.

Na Figura 40, a temperatura mensal mais alta ocorreu em Frederico Westphalen, atingindo 24,6°C, enquanto a cidade de Xanxerê apresentou a temperatura mais baixa, registrando 17,3°C. Na Figura 41, São Borja obteve a temperatura mais alta, alcançando 24,3°C, enquanto Soledade teve a temperatura mais baixa, com 15°C. Por fim, a Figura 42 revelou que a cidade de Santa Maria registrou a temperatura mais alta, chegando a 22,2°C, ao passo que a cidade de Chuí apresentou a temperatura mais baixa, com 14,6°C. Em geral, quanto menor a latitude, menor será a temperatura do solo.

4.3. Desempenho térmico e energético

As cidades que tiveram a variação da temperatura do solo diferente da maioria na seção anterior foram analisadas com mais detalhes. Seis cidades com duas em cada Estado da Região Sul: Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana. Adotando o critério de análise baseado na latitude, a Figura 43 mostra a comparação entre as temperaturas do ar e do solo em Nova Tebas.

Figura 43 - Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Nova Tebas.

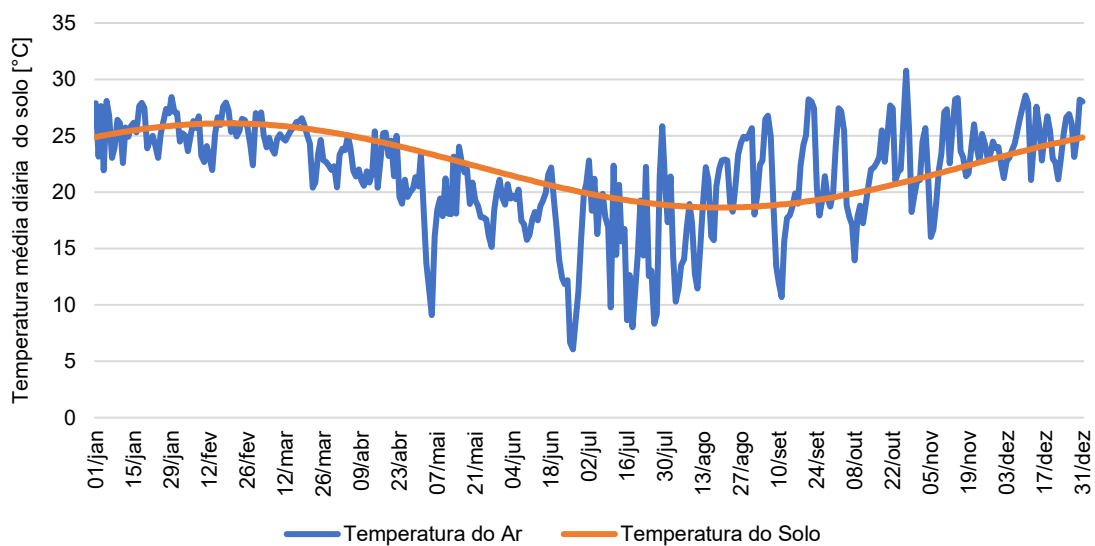


A temperatura do ar varia conforme as condições climáticas, enquanto a temperatura do solo tende a ser mais estável. A variação da temperatura do solo segue, na maioria, a variação da temperatura do ar. Ao longo do ano, a temperatura do solo tende a ser mais alta do que a do ar, tanto no verão quanto no inverno. A exceção a essa regra ocorre durante o período de setembro até o início de dezembro, quando a temperatura do ar supera a do solo.

Durante o verão, a temperatura mais elevada do solo não contribui para o resfriamento, uma vez que o calor tende a se deslocar do solo para o interior das residências. No entanto, no inverno, a temperatura mais alta do solo é vantajosa, pois ajuda a aquecer o ambiente por meio do processo de condução de calor.

A Figura 44 mostra a comparação entre as temperaturas do ar e do solo em Foz do Iguaçu. Nessa cidade, a temperatura do solo permanece relativamente constante, seguindo a variação térmica da temperatura do ar. A amplitude térmica do ar varia ao longo de um período curto, o que faz com que a temperatura do solo seja mais elevada nos dias mais frios e mais baixa nos dias mais quentes. Essa diferença térmica favorece a transferência de calor da residência para o solo.

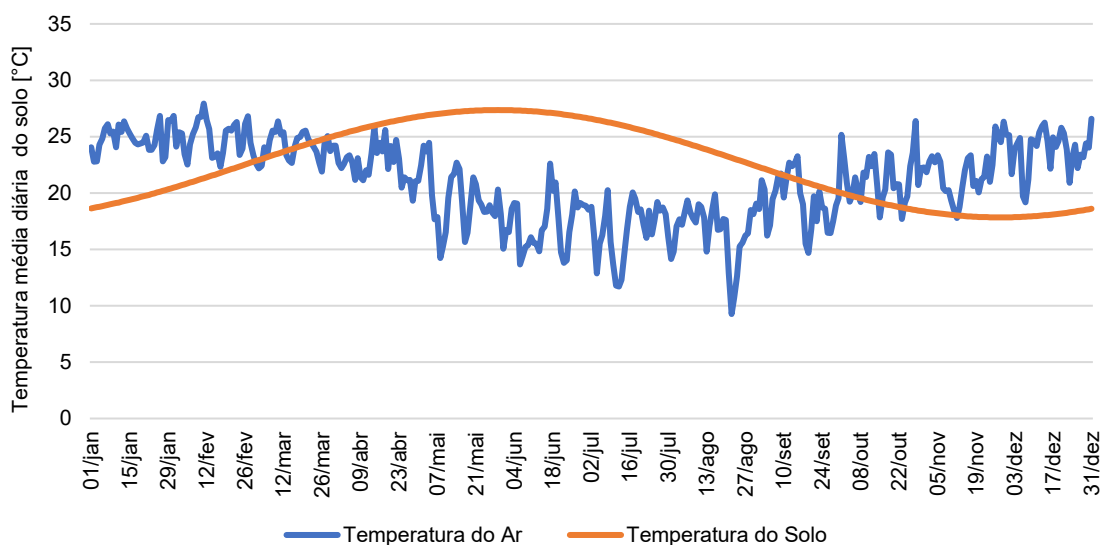
Figura 44 - Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Foz do Iguaçu.



De janeiro até o início de junho, a temperatura do solo permaneceu acima da temperatura do ar. No entanto, durante o inverno, a temperatura do ar diminuiu ainda mais, com alguns dias apresentando temperaturas superiores à do solo. A partir de agosto, a temperatura do ar, geralmente, supera a temperatura do solo em Foz do Iguaçu. Devido a essa diferença de temperatura entre o ar e o solo, a transferência de calor da residência para o solo é favorecida.

A Figura 45 mostra a comparação entre as temperaturas do ar e do solo em Joinville. Ao contrário das cidades mencionadas anteriormente, Joinville apresenta uma variação distinta da temperatura do solo. Enquanto a temperatura do ar permanece alta durante o verão e baixa durante o inverno, a temperatura do solo segue um padrão oposto. Essa variação favorece a utilização do solo como solução bioclimática passiva, permitindo a transferência de calor da residência para o solo mais frio no verão e a absorção de calor do solo para a residência no inverno. A temperatura do solo no final de maio ($27,4^{\circ}\text{C}$) quase igualou a temperatura diária mais elevada do ar, registrada em 11 de fevereiro, que foi de $27,9^{\circ}\text{C}$.

Figura 45 - Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Joinville.

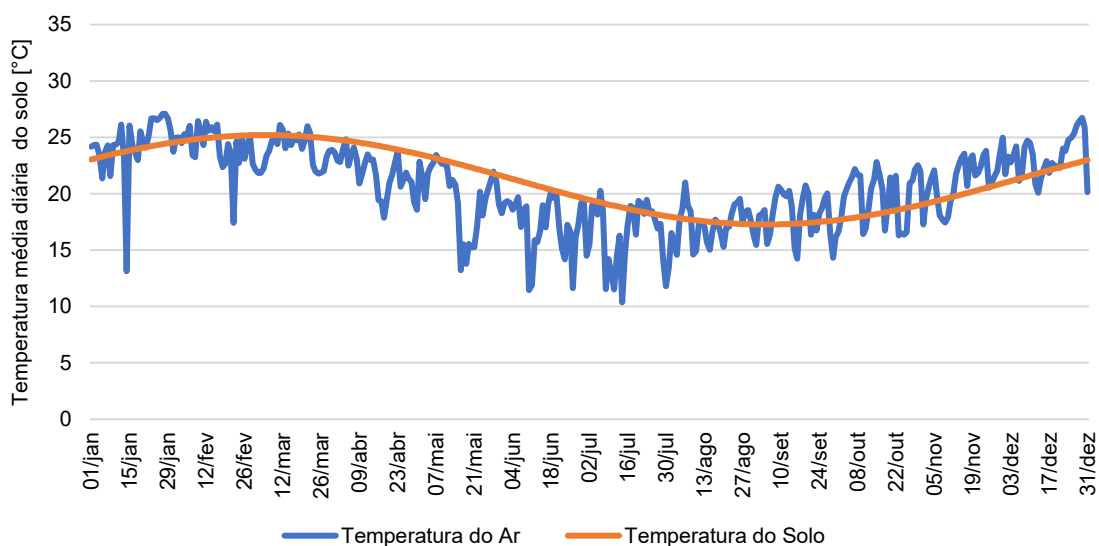


Florianópolis registra variações na temperatura do solo que acompanham as oscilações da temperatura do ar, semelhante com o que ocorre em outras cidades. A Figura 46 mostra a comparação entre as temperaturas do ar e do solo

em Florianópolis. A partir de fevereiro, a temperatura do solo supera a temperatura do ar, uma situação que persiste até o mês de agosto.

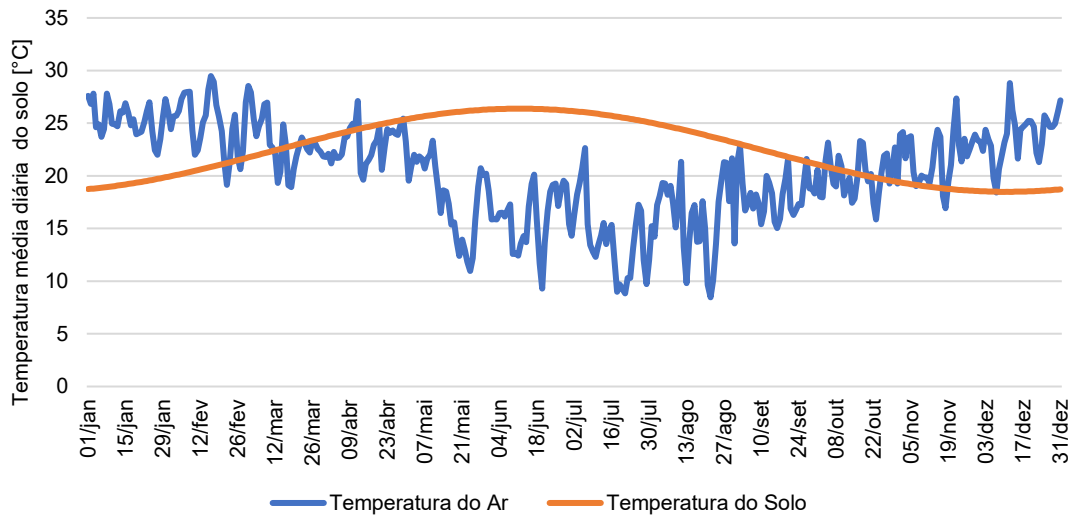
Durante o outono e o inverno, a temperatura do solo se mantém mais elevada, o que auxilia na absorção de calor pelas residências. No final do inverno e na primavera, a situação se inverte, com a temperatura do solo ficando mais baixa do que a do ar, o que favorece a transferência de calor das residências mais quentes para o solo. No período do verão, nos três primeiros meses do ano, a temperatura do ar e do solo se aproximam, com a temperatura do solo acima da temperatura do ar. Entretanto, durante um período quente, a proximidade dessas temperaturas não se revela vantajosa.

Figura 46 - Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Florianópolis.



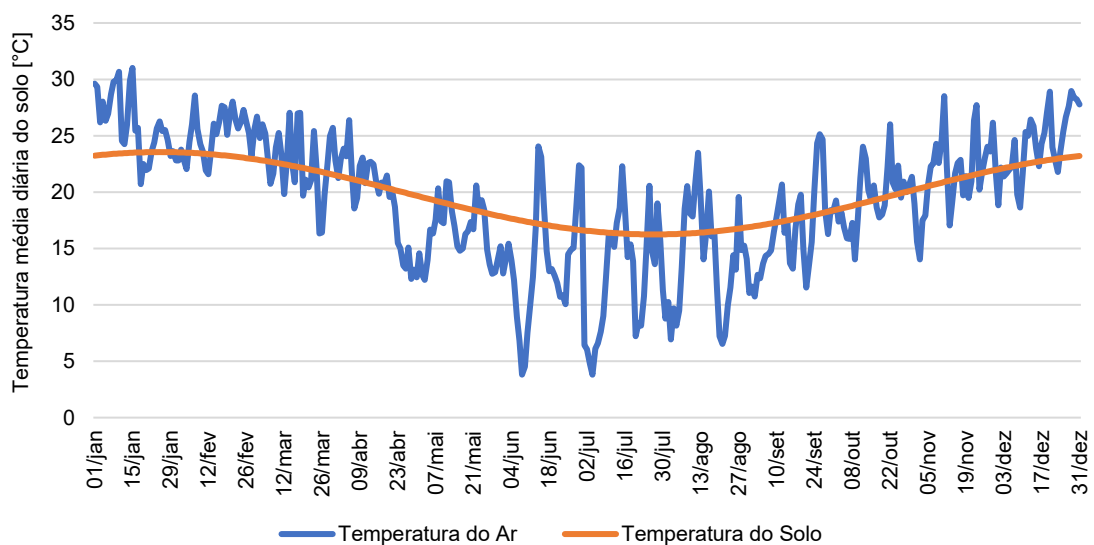
A Figura 47 mostra a comparação entre as temperaturas do ar e do solo em Porto Alegre. Nessa cidade, a variação da temperatura do solo assemelha-se a Joinville, com o solo apresentando temperaturas mais baixas no verão e mais elevadas no inverno. Essa variação favorece a transferência de calor entre as residências e o solo. Assim como em Joinville, em Porto Alegre, há um período em que a temperatura do solo ultrapassa 25°C. Em um exemplo, em 21/06, a temperatura média do ar registrava 9,3°C, enquanto a temperatura do solo atingia 26,3°C. Essa diferença térmica favorece as residências que estão em contato com o solo, promovendo a transferência de calor de maneira vantajosa.

Figura 47 - Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Porto Alegre.



Uruguaiana mostra uma variação diferente na temperatura do ar ao longo do ano, e ao compará-la com a temperatura do solo, percebe-se que o solo mantém uma média próxima da temperatura do ar durante todo o ano. Em dias mais frios, a temperatura do solo fica acima da temperatura do ar, enquanto em dias mais quentes, fica abaixo. A Figura 48 mostra a comparação entre as temperaturas do ar e do solo em Uruguaiana.

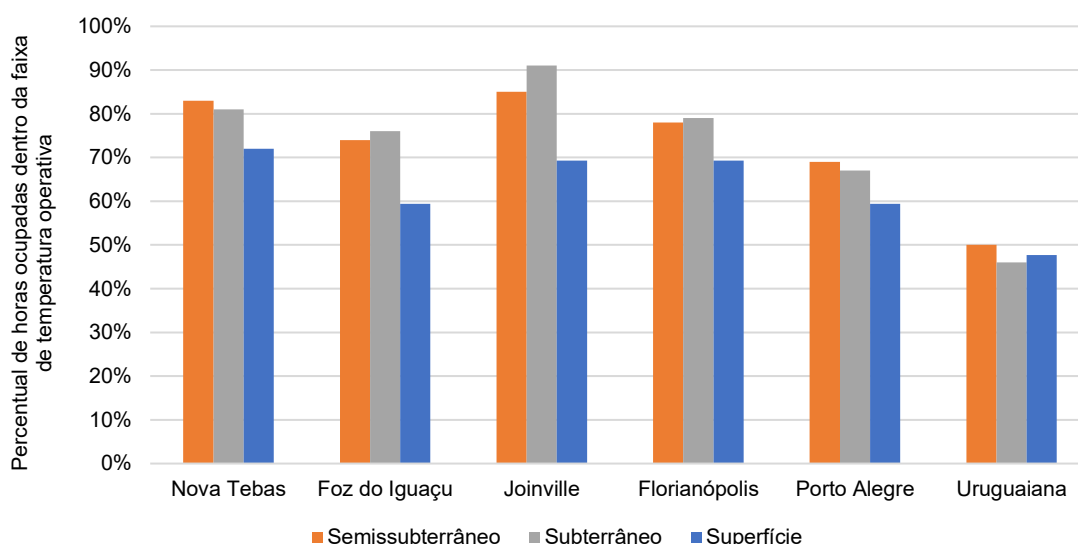
Figura 48 - Comparação da temperatura diária do ar e do solo de Uruguaiana.



A variação de temperatura no solo, na profundidade de quatro metros, segue geralmente as variações da temperatura do ar. Essa comparação entre as temperaturas do ar e do solo auxiliou na compreensão do percentual de horas em que a temperatura operativa se mantém dentro de uma faixa desejável. A Figura 49 mostra a comparação entre o percentual de horas em que a residência de superfície, considerado como referência, e o percentual das residências semissubterrâneas e subterrâneas. Foi analisada a quantidade de horas que o ambiente ocupado manteve a temperatura operativa dentro da faixa de 18°C a 26°C, conforme definido pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Quando a residência possui um percentual maior do que a residência da superfície, isso indica que ela tem mais horas de ocupação em que a temperatura operativa está dentro desse intervalo. Entre as cidades analisadas, somente a residência subterrânea em Uruguaiiana apresentou um percentual menor do que a residência da superfície. De acordo com esse critério e seguindo as normas de desempenho estabelecidas, essa residência não alcançaria o nível mínimo de desempenho térmico.

Figura 49 - Comparação entre os percentuais de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiiana.



As Figuras 50 e 51 mostram a temperatura operativa máxima e mínima, respectivamente. Conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), a temperatura operativa máxima no ambiente ocupado da residência da superfície deve ser superior à das residências semissubterrâneas e subterrâneas para que essas residências atinjam níveis de desempenho térmico. Ao analisar a Figura 50, é evidente que todas as cidades cumprem esse requisito, mantendo temperaturas abaixo da temperatura do modelo de referência. Notavelmente, a residência subterrânea registra uma redução ainda maior na temperatura operativa máxima em comparação a residência semissubterrânea.

Na Figura 51, a temperatura operativa mínima das residências semissubterrâneas e subterrâneas deve ser superior à temperatura da residência da superfície, conforme determinado pela norma de desempenho. Mais uma vez, essas cidades estão em conformidade com esse critério, e as residências subterrâneas apresentam temperaturas mais elevadas do que as residências semissubterrâneas. É importante notar que mesmo a residência subterrânea em Uruguaiana, que não atingiu o percentual de horas ocupadas da residência da superfície, atendeu aos critérios estabelecidos para a temperatura operativa máxima e mínima.

Figura 50 - Comparação entre as temperaturas operativas máximas em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana.

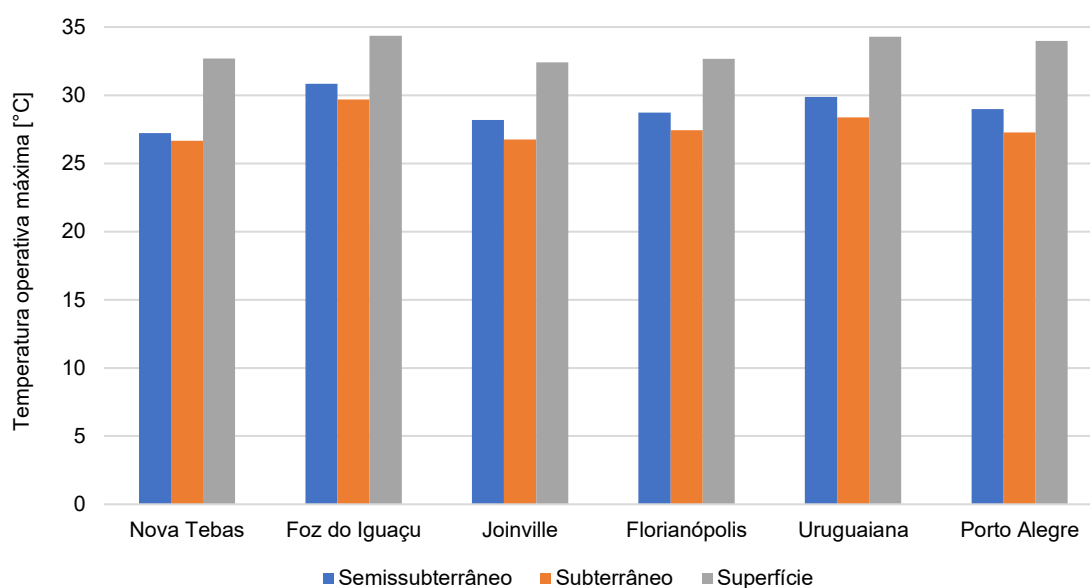
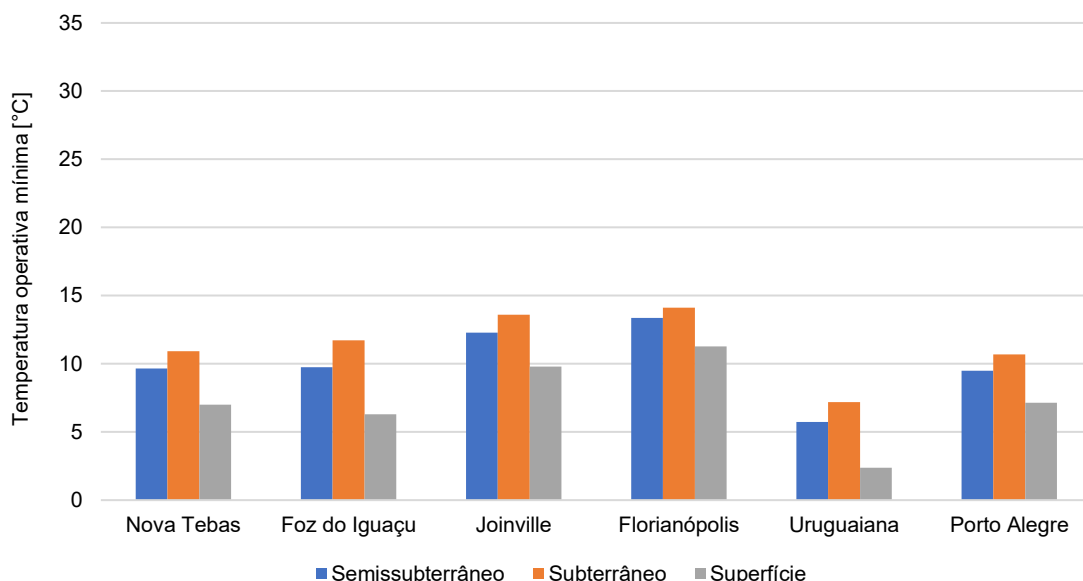


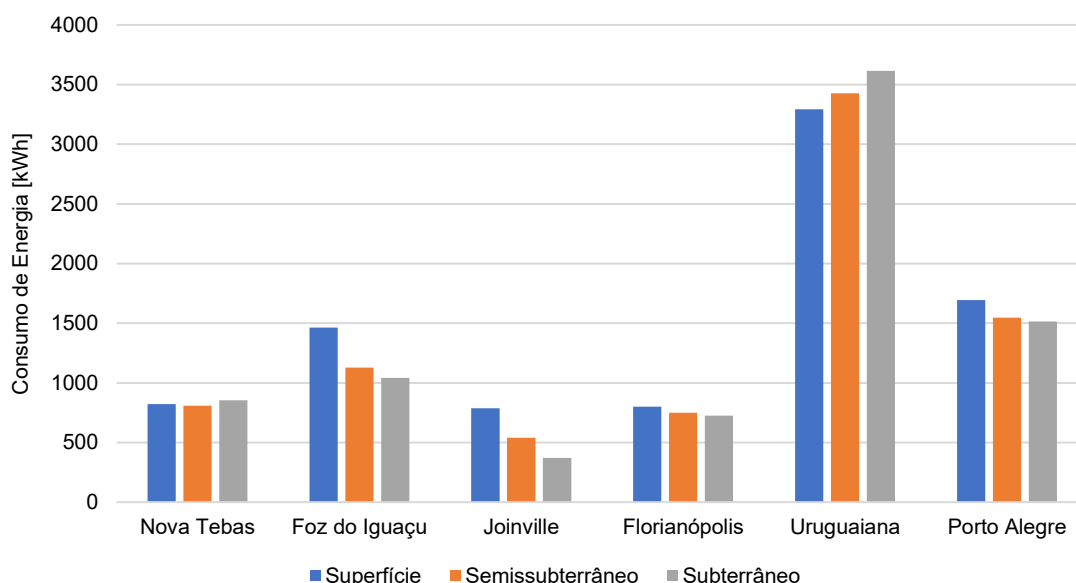
Figura 51 - Comparação entre as temperaturas operativas mínimas em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana.



O consumo de energia de cada residência reflete a quantidade de carga térmica necessária para controlar a temperatura interna. A Figura 52 mostra o consumo geral de energia nos três tipos de residência. As residências semissubterrâneas e subterrâneas devem apresentar consumo inferior ao da residência de referência para cumprir esse critério da norma de desempenho.

Nesse contexto, as residências nas cidades de Nova Tebas e Florianópolis apresentaram consumos de energia semelhantes. No entanto, o consumo aumentou na residência subterrânea em Nova Tebas e diminuiu em Florianópolis. Porto Alegre registrou redução no consumo de energia de 8,6% na residência semissubterrânea e 10,6% na subterrânea, enquanto as cidades de Foz do Iguaçu e Joinville alcançaram reduções de consumo mais significativas, de 22,8% e 31,5% na residência semissubterrânea e 28,6% e 52,8% na residência subterrânea, respectivamente. Notavelmente, a residência em Uruguaiana aumentou seu consumo de energia, mesmo aumentando o contato com o solo, por não ter uma amplitude térmica expressiva entre a temperatura do ar e do solo.

Figura 52 - Comparação entre o consumo geral de energia em Nova Tebas, Foz do Iguaçu, Joinville, Florianópolis, Porto Alegre e Uruguaiana.



A cidade de Nova Tebas, cuja temperatura do solo se mantém predominantemente acima da temperatura do ar, registrou consumo de energia com pouca variação. Em contraste, Foz do Iguaçu apresenta grande amplitude térmica na temperatura do ar, o que contrasta com a temperatura mais constante do solo, favorecendo a transferência de calor. Essa condição resultou em reduções no consumo de energia para as residências semissubterrânea e subterrânea.

Tanto Joinville quanto Porto Alegre têm variação de temperatura do solo oposta à temperatura do ar, o que levou a reduções no consumo de energia. Por outro lado, Florianópolis possui temperatura do ar com baixa amplitude térmica, que se aproxima da temperatura do solo. Mesmo com ausência de diferença significativa entre a temperatura do ar e do solo, houve diminuição no consumo de energia. Embora essa redução tenha sido relativamente pequena, de 6,2% na residência semissubterrânea e 9,3% na subterrânea.

Em Uruguaiana, a temperatura do solo assume uma posição intermediária entre as variações da temperatura do ar, apresentando uma consistência. O solo exibe uma moderação, situando-se no meio das temperaturas máximas e mínimas do ar, proporcionando estabilidade térmica ao longo dos dias. Esse cenário resultou em aumento de 4,8% no percentual de horas de ocupação

dentro da faixa de temperatura operativa para a residência semissubterrânea e uma redução de 3,5% no percentual para a residência subterrânea em comparação com a residência da superfície. Isso se refletiu no consumo de energia, uma vez que o aumento no contato com o solo resultou em aumento no consumo de energia para aquecimento e resfriamento. Os resultados de desempenho térmico estão presentes nas Tabelas 12 e 13 do Apêndice B e de desempenho energéticos estão nas Tabelas 14 e 15 do Apêndice C.

4.4. Nível mínimo de desempenho térmico

No nível mínimo de desempenho térmico, a análise se concentra nas simulações que incorporam ventilação natural. Isso envolve cálculos relacionados ao percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), à temperatura operativa máxima ($T_{o_{max}}$) e à temperatura operativa mínima ($T_{o_{min}}$). Esses cálculos foram realizados por meio da comparação entre a residência da superfície e as residências semissubterrâneas e subterrâneas em cada cidade.

As residências simuladas representam unidades unifamiliares, conforme determinado pelas normas de desempenho. Para essa tipologia de construção, existe uma tolerância permitida para as temperaturas $T_{o_{max}}$ e $T_{o_{min}}$, na qual se admite um acréscimo de dois graus e uma redução de um grau, respectivamente.

As Figuras 53 e 54 mostram os resultados relativos à temperatura operativa máxima das residências simuladas em cada cidade. Notou-se que a temperatura operativa máxima nos ambientes de permanência prolongada das residências semissubterrâneas e subterrâneas foi menor do que nas residências da superfície. Isso indica que o uso do solo auxiliou na redução da temperatura máxima desses ambientes.

As Figuras 55 e 56 mostram os resultados relacionados à temperatura operativa mínima dessas residências. As residências semissubterrâneas e subterrâneas cumpriram os critérios estabelecidos pela norma de desempenho, registrando resultados superiores quando comparadas com os resultados da residência de referência. Os resultados de desempenho térmico estão presentes nas Tabelas 12 e 13 do Apêndice B.

Figura 53 - Comparação entre a temperatura operativa máxima de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 27°24'50"S.

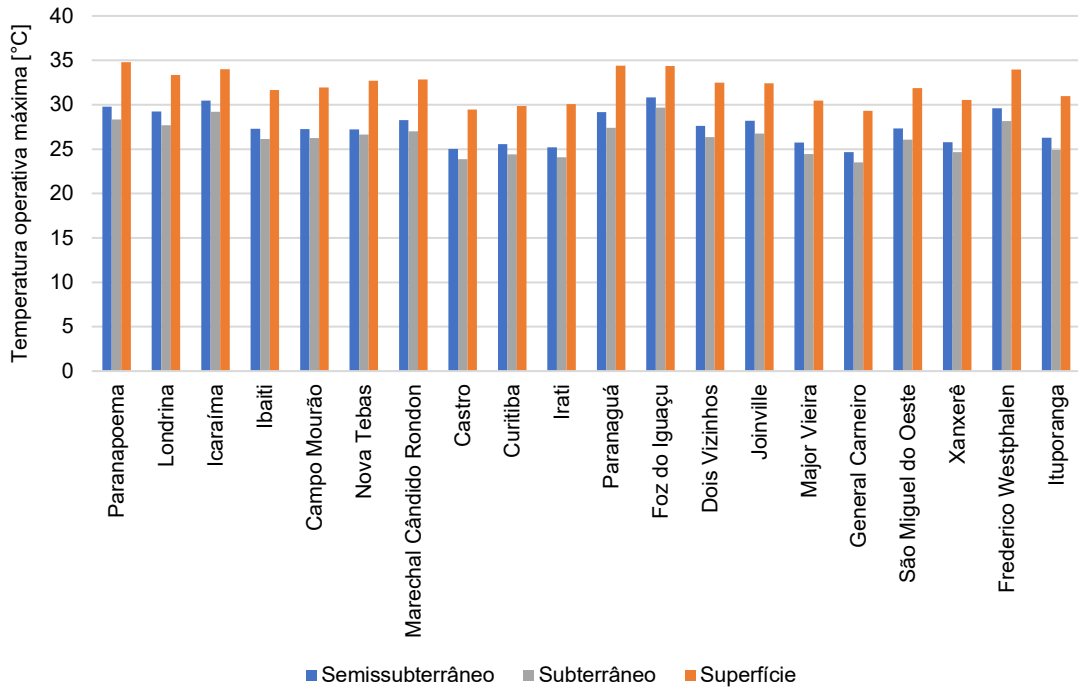


Figura 54 - Comparação entre a temperatura operativa máxima de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 33°41'27"S.

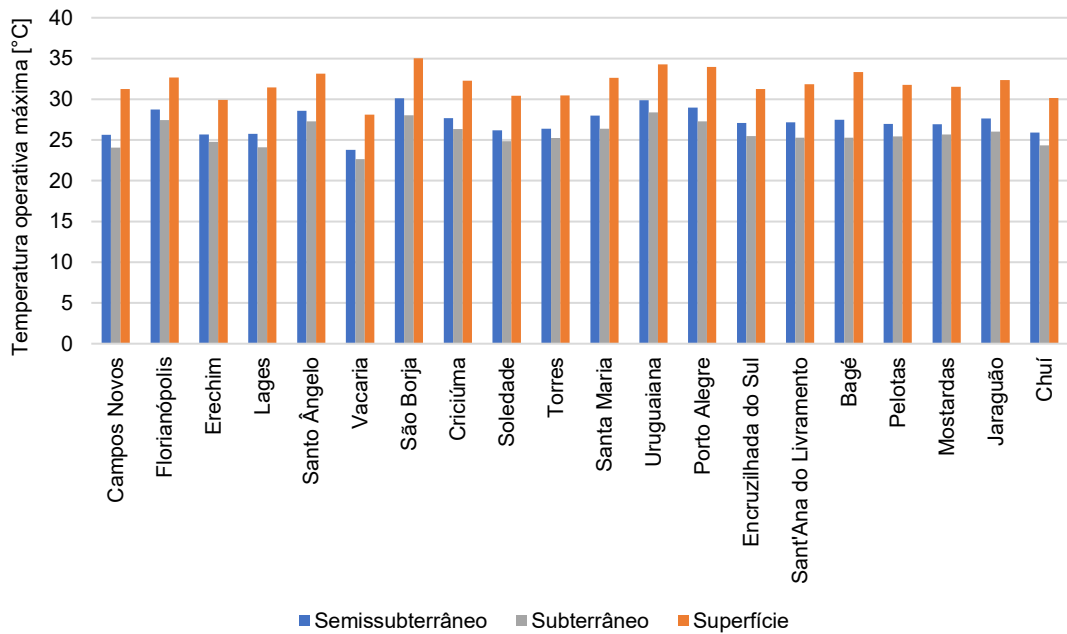


Figura 55 - Comparação entre a temperatura operativa mínima de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 27°24'50"S.

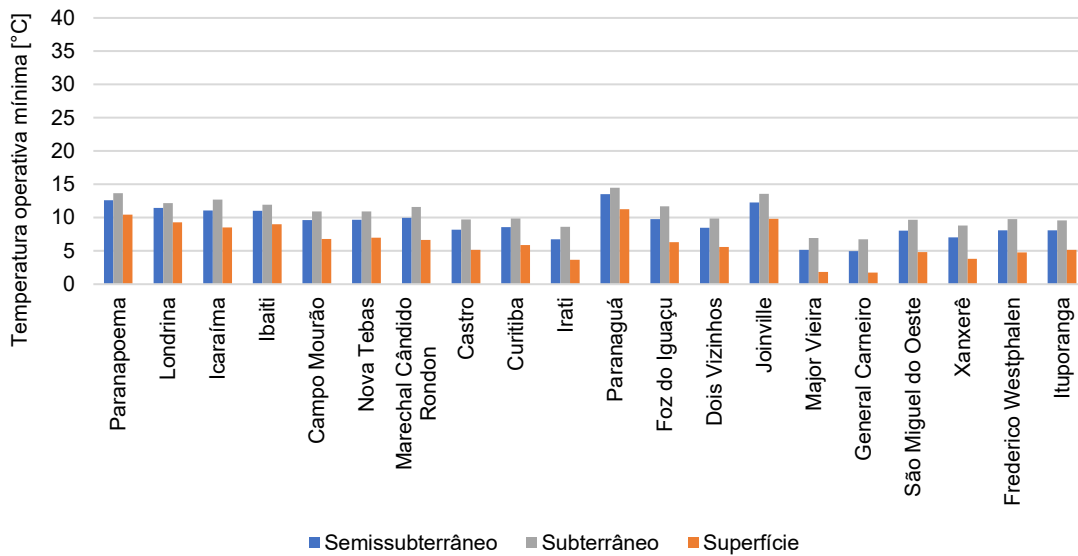
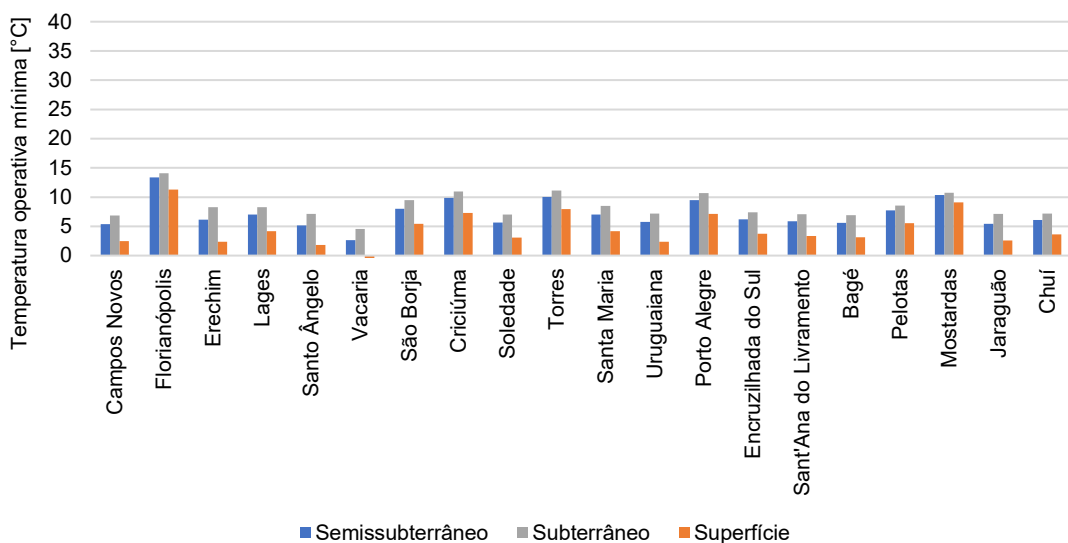


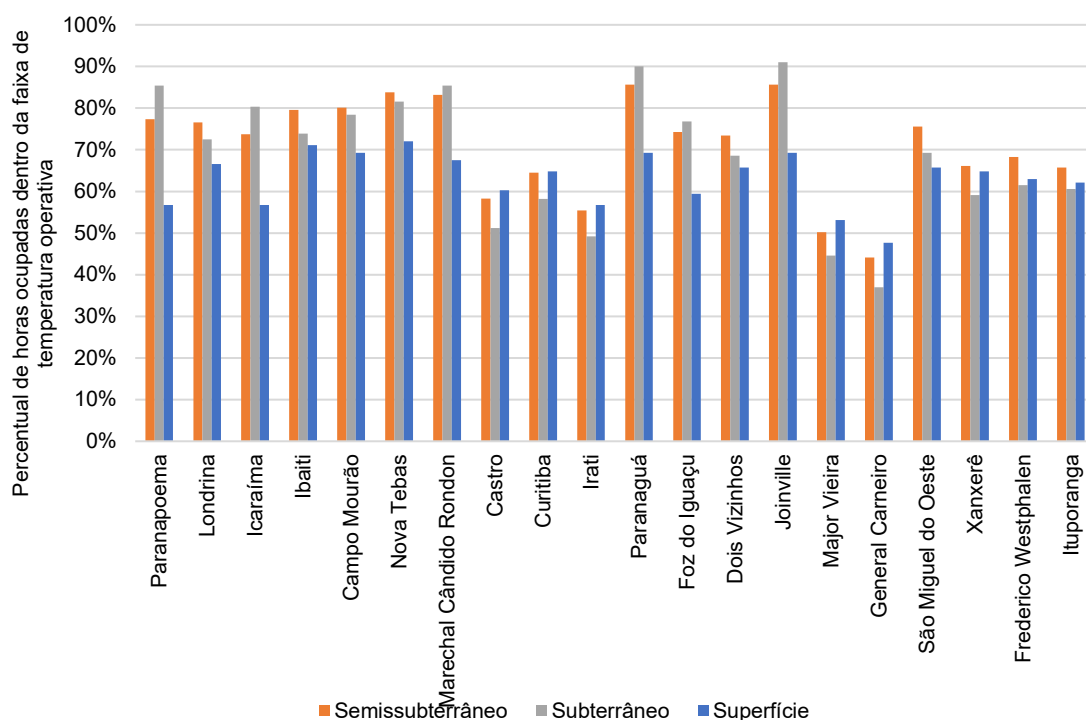
Figura 56 - Comparação entre a temperatura operativa mínima de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 33°41'27"S.



Todas as cidades atenderam aos requisitos mínimos tanto para as temperaturas operativas máximas quanto mínimas, tanto para as residências semissubterrâneas quanto para as residências subterrâneas. Portanto, o principal critério que determinou se as residências atingiram ou não atingiram o nível mínimo de desempenho térmico foi o PHFT. As Figuras 57 e 58 mostram a

comparação entre os percentuais de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT).

Figura 57 - Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) de cidades localizadas nas latitudes 22°38'2"S a 27°24'50"S.

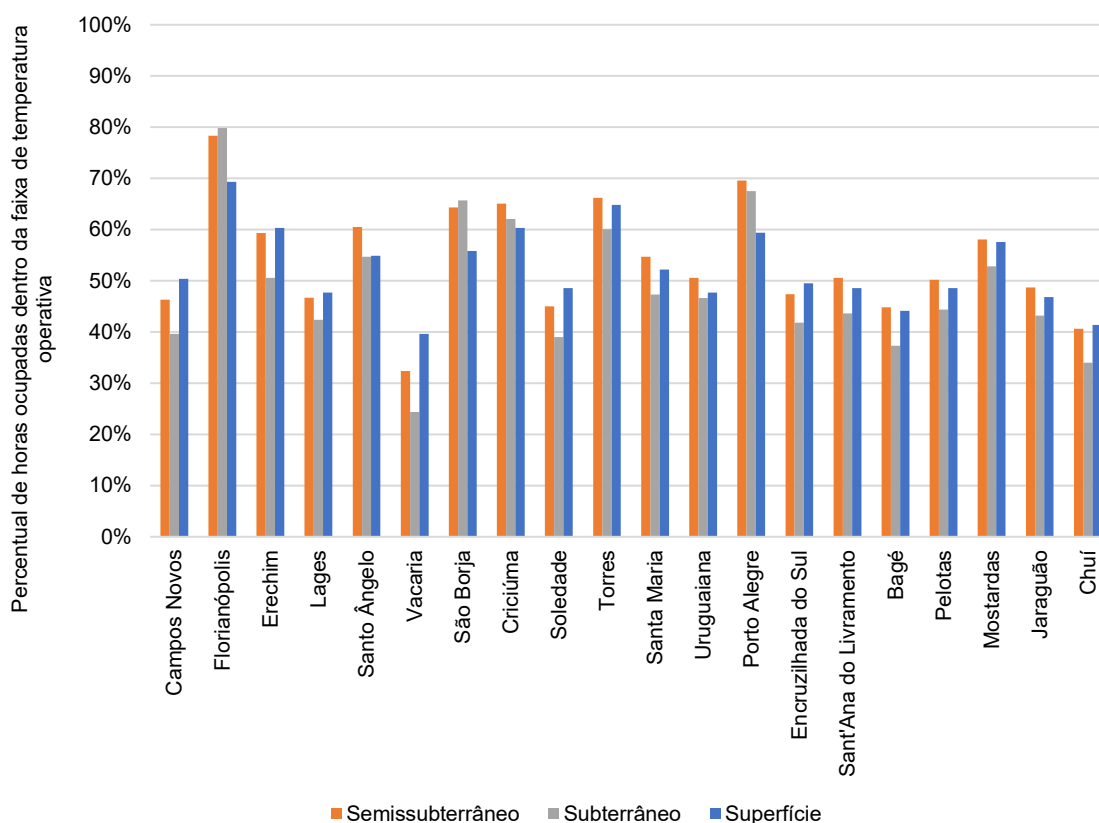


As residências semissubterrâneas e subterrâneas nas cidades de Paranapoema, Londrina, Icaraíma, Campo Mourão, Nova Tebas, Marechal Cândido Rondon, Paranaguá, Foz do Iguaçu, Dois Vizinhos, Joinville e São Miguel do Oeste cumpriram os critérios estabelecidos pela norma de desempenho e atingiram o nível mínimo de desempenho térmico. Nas cidades de Xanxerê, Frederico Westphalen e Ituporanga, apenas as residências semissubterrâneas satisfizeram os requisitos para o nível mínimo de desempenho térmico.

Entretanto, nas cidades de Castro, Curitiba, Irati, Major Vieira e General Carneiro, nenhuma das residências em contato com o solo alcançou um percentual superior ao das residências de superfície, onde não atingiram o nível mínimo de desempenho térmico. Notavelmente, a residência semissubterrânea

na cidade de Curitiba não atingiu o nível mínimo por uma diferença de apenas 0,3%.

Figura 58 - Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT) de cidades localizadas nas latitudes 27°24'7"S a 33°41'27"S.



As cidades de Florianópolis, São Borja, Criciúma e Porto Alegre atingiram o nível mínimo de desempenho térmico tanto para as residências semissubterrâneas quanto para as residências subterrâneas. Conforme mostram as Figuras 57 e 58, organizadas em ordem crescente de latitude, é possível notar diminuição no número de cidades com residências semissubterrâneas e subterrâneas que atingiram o nível mínimo.

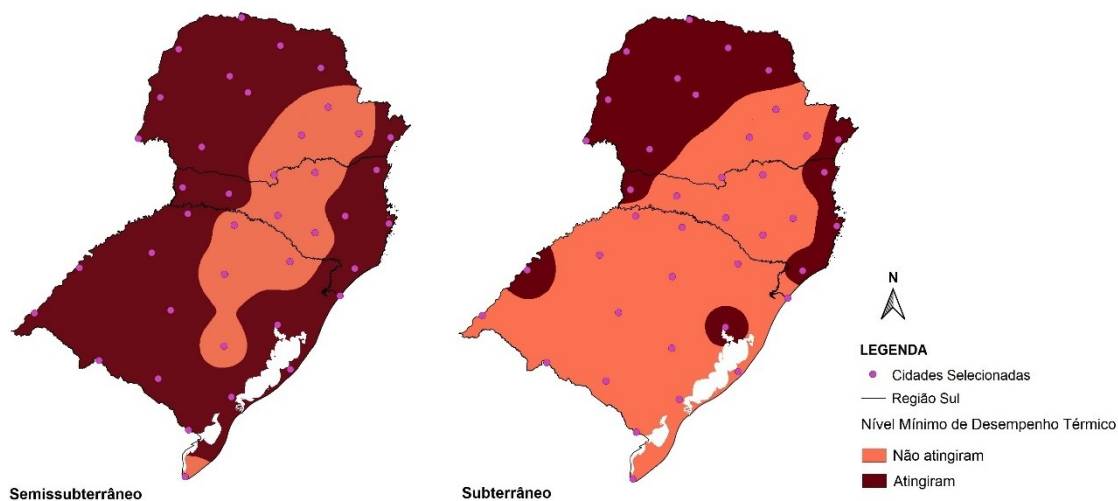
Apenas as residências semissubterrâneas das cidades de Santo Ângelo, Torres, Santa Maria, Uruguaiana, Santana do Livramento, Bagé, Pelotas, Mostardas e Jaraguão atingiram o nível mínimo de desempenho térmico. Por outro lado, as cidades de Campos Novos, Erechim, Lages, Vacaria, Soledade,

Encruzilhada do Sul e Chuí não tiveram nenhuma das residências em contato com o solo que atingiram o nível mínimo de desempenho.

Ao comparar a residência da superfície e semissubterrânea, constatou-se que a maioria das cidades que não atenderam aos critérios se encontra em altitudes elevadas, com exceção de Chuí e Encruzilhada do Sul. A altitude média das cidades que não atenderam aos critérios é de 775 metros. Nas residências da superfície e subterrânea, 24 cidades não cumpriram os critérios do nível mínimo de desempenho térmico, apresentando um percentual real menor que o percentual de referência. A maioria das cidades com latitudes mais elevadas não atingiram os critérios, com a exceção das cidades de Porto Alegre e São Borja, que cumpriram os critérios.

A Figura 59 mostra a distribuição das cidades que atingiram e não atingiram o nível mínimo de desempenho, conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021). No mapa à esquerda, relativo as residências semissubterrâneas, é possível observar que as cidades que não atingiram estão concentradas em regiões de elevada altitude, onde a temperatura média do ar permanece abaixo de 19°C e a temperatura média do solo não ultrapassa 20°C. No mapa à direita, referente as residências subterrâneas, nota-se mais cidades que não atingiram os critérios. As áreas que não alcançaram os critérios apresentam temperaturas médias do ar baixas, não ultrapassando 19,8°C. Além disso, as temperaturas do solo são mais elevadas, chegando a atingir até 21,1°C.

Figura 59 - Cidades onde as residências atingiram e não atingiram o nível mínimo de desempenho térmico.



Com isso, observou-se que, para as residências semissubterrâneas, a altitude e a menor temperatura média do ar foram fatores limitantes que impediram essas construções de alcançarem o nível mínimo de desempenho. No caso das residências subterrâneas, a altitude e a temperatura média do ar mais baixa representaram as limitações principais. Constatou-se que, à medida que a latitude aumentava, diminuía o número de residências que alcançaram o nível mínimo de desempenho. As residências localizadas nas cidades de Porto Alegre e São Borja conseguiram cumprir os critérios mínimos devido a uma temperatura média do ar e do solo mais elevada em comparação com as cidades da mesma região.

4.5. Nível intermediário de desempenho térmico

As residências que alcançaram o nível mínimo avançaram para a fase de avaliação no nível intermediário nas cidades em questão. A maioria dos valores do percentual de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa se situou abaixo de 70%, com exceção das cidades de Ibaiti e Nova Tebas, no Paraná, onde o percentual de referência ultrapassou 70%, resultando em um valor zero para o novo percentual mínimo ($\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$). Nas cidades com valores de o percentual de referência inferiores a 70%, que são unidades unifamiliares, o valor é determinado pelo cálculo do novo percentual mínimo ($\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$), definido pela Equação 3 (ABNT, 2021):

$$\Delta\text{PHFT}_{\text{min}} = 45 - 0,58 \cdot \text{PHFT de referência} \quad [3]$$

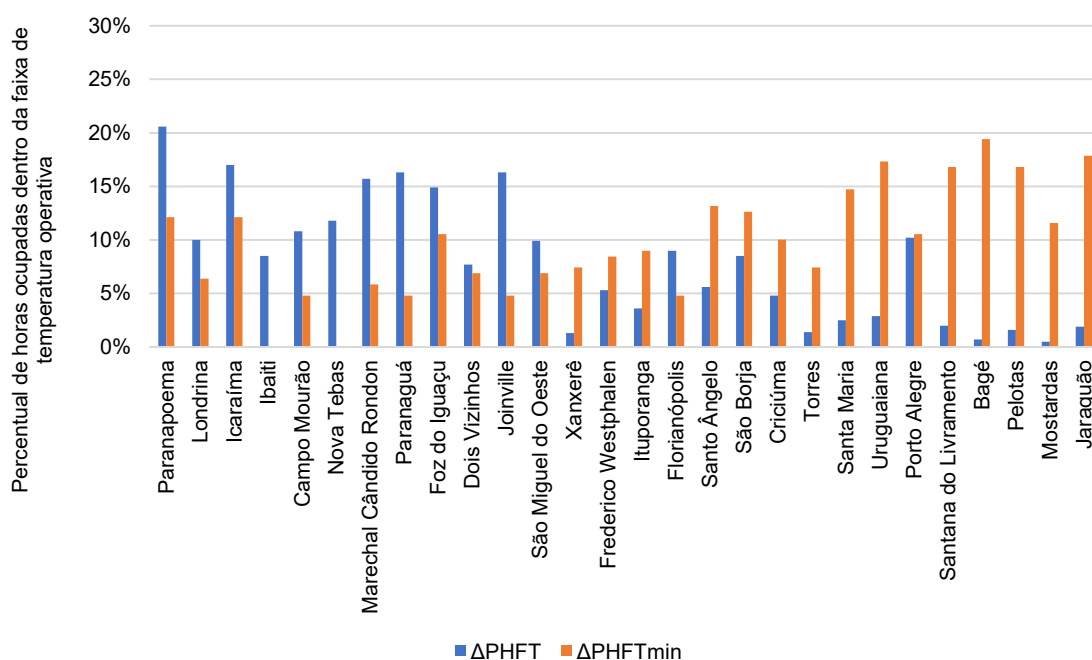
No nível intermediário, a NBR 15575-1 (ABNT, 2021) estabelece que o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa usado para a avaliação seja o percentual real (residência semissubterrânea ou subterrânea) menos o percentual da residência de referência, resultando em um novo percentual de horas ocupadas (ΔPHFT). A avaliação da temperatura operativa máxima e mínima segue os mesmos critérios do nível mínimo. Como todas as cidades cumpriram esse critério no nível anterior, o novo percentual de

ocupação ($\Delta PHFT$) e a redução da carga térmica total (RedCgTT) foram os critérios determinantes para as cidades que atingiram esse nível.

A Figura 60 mostra a comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($\Delta PHFT$) da residência semissubterrânea e o percentual mínimo ($\Delta PHFT_{min}$) estabelecido pela norma de desempenho. As cidades estão organizadas por latitude, e é notável que quanto maior a latitude, menor é o número de cidades que alcançaram o percentual mínimo. Florianópolis foi a cidade mais ao Sul que cumpriu os critérios da norma de desempenho.

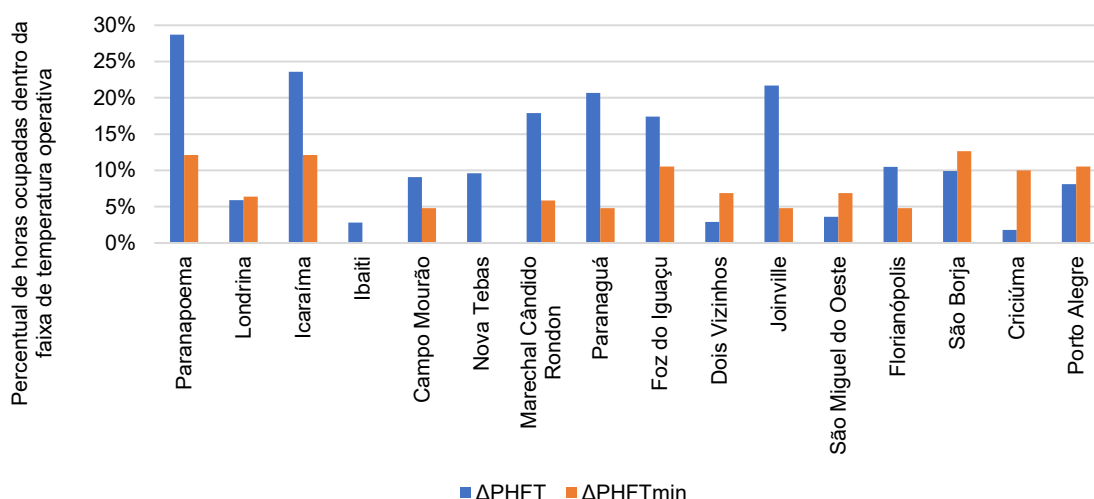
Ao analisar o $\Delta PHFT$, observa-se que quinze cidades não atingiram o nível intermediário na residência semissubterrânea. A maioria dessas cidades, ou seja, 80%, está localizada no Estado do Rio Grande do Sul, enquanto o restante se encontra em Santa Catarina. Esse resultado revela que nenhuma cidade do Rio Grande do Sul atingiu o nível intermediário. No Estado de Santa Catarina, apenas as cidades litorâneas ou próximas do litoral conseguiram alcançar o nível intermediário.

Figura 60 - Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($\Delta PHFT$) com o percentual mínimo ($\Delta PHFT_{min}$) das residências semissubterrâneas.



A Figura 61 mostra a comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (ΔPHFT) da residência subterrânea e o percentual mínimo ($\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$) estabelecido pela norma de desempenho. O número de residências subterrâneas avaliadas para o nível intermediário é menor em comparação com o número de residências semissubterrâneas. No entanto, é notável que as residências localizadas nas cidades de menor latitude alcançaram mais o percentual mínimo conforme a norma de desempenho.

Figura 61 - Comparação entre o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (ΔPHFT) com o percentual mínimo ($\Delta\text{PHFT}_{\text{min}}$) das residências subterrâneas.



O valor da redução de carga térmica total mínima ($\text{RedCgTT}_{\text{min}}$) na maioria das cidades obteve um valor de zero devido ao percentual de referência ser inferior a 70%. No entanto, nas duas cidades do Paraná, foi realizado o cálculo do consumo médio de energia por metro quadrado. Ibaiti registrou 24,9 kWh/(ano.m²), enquanto Nova Tebas obteve 22,2 kWh/(ano.m²). Como esses valores ficaram abaixo de 100 kWh/(ano.m²), a NBR 15575-1 estabelece que o valor utilizado para o $\text{RedCgTT}_{\text{min}}$ deve ser de 17%. Os resultados das análises de cada cidade, tanto para as residências semissubterrâneas (Tabela 24) quanto

para as residências subterrâneas (Tabela 25), estão disponíveis no Apêndice C, incluindo residências que atingiram os critérios e aqueles que não atingiram.

A Figura 62 mostra a comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências semissubterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT_{min}). As cidades estão organizadas por latitude. Nota-se que as residências localizadas em cidades com menores latitudes alcançaram as maiores reduções de carga térmica total. No entanto, embora a residência em Porto Alegre tenha atingido o critério de redução de carga térmica, ela não atendeu ao requisito do Δ PHFT. A Figura 63 mostra a comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências subterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT_{min}).

Figura 62 - Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências semissubterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT_{min}) do nível intermediário.

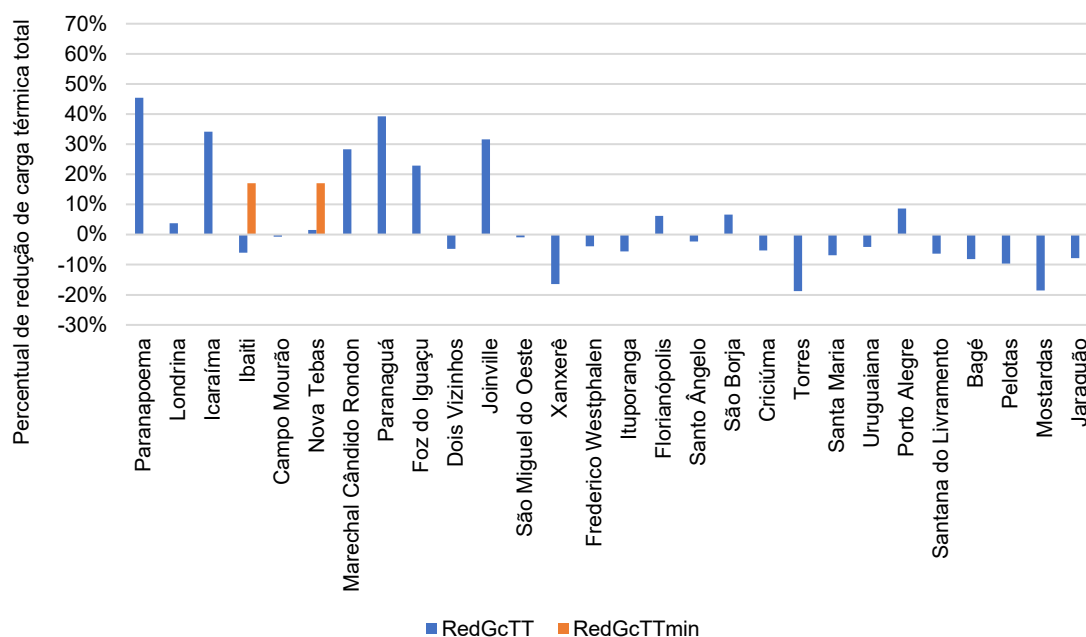
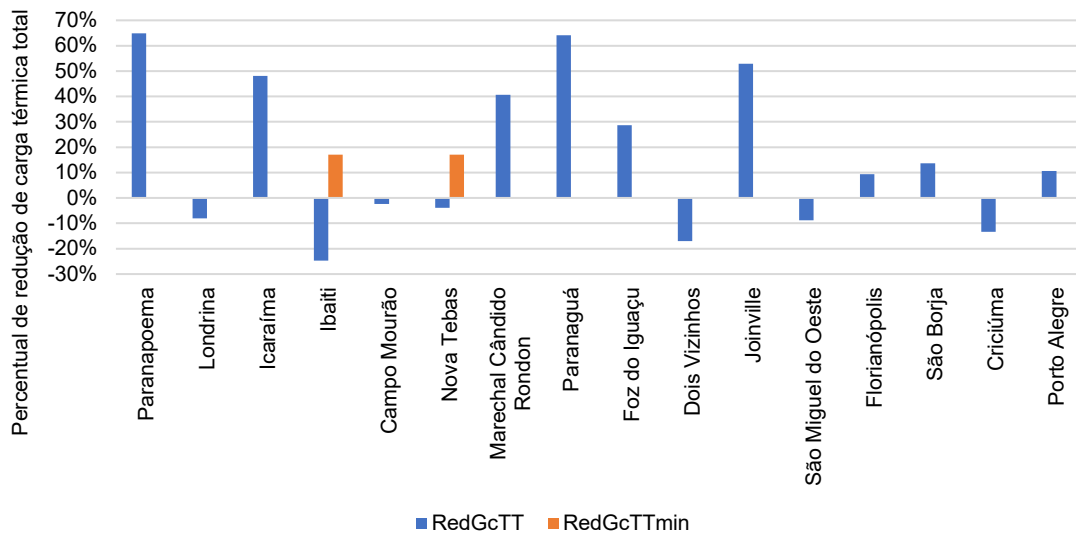


Figura 63 - Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências subterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT_{min}) do nível intermediário.



Ao comparar os resultados de redução de carga térmica total nas Figuras 62 e 63, observou-se que na cidade de Nova Tebas, a residência semissubterrânea reduziu a carga térmica, enquanto a residência subterrânea aumentou a carga térmica. No entanto, em ambos os casos, a redução não foi suficiente para cumprir o requisito do RedCgTT_{min}, que, neste cenário, estava estipulado em 17% devido ao alto PHFT de referência, superior a 70%. É importante destacar que a redução de carga térmica total nas residências subterrâneas alcançou maiores percentuais, chegando a quase 65% na residência da cidade de Paranapoema.

No contexto das residências subterrâneas, seis cidades não atingiram os critérios do nível intermediário, distribuídas igualmente entre os Estados da Região Sul. Notavelmente, cidades como Ibaiti, Nova Tebas e Campo Mourão conseguiram cumprir os critérios da $\Delta PHFT$ e $\Delta PHFT_{min}$, mas não atenderam os requisitos do RedCgTT.

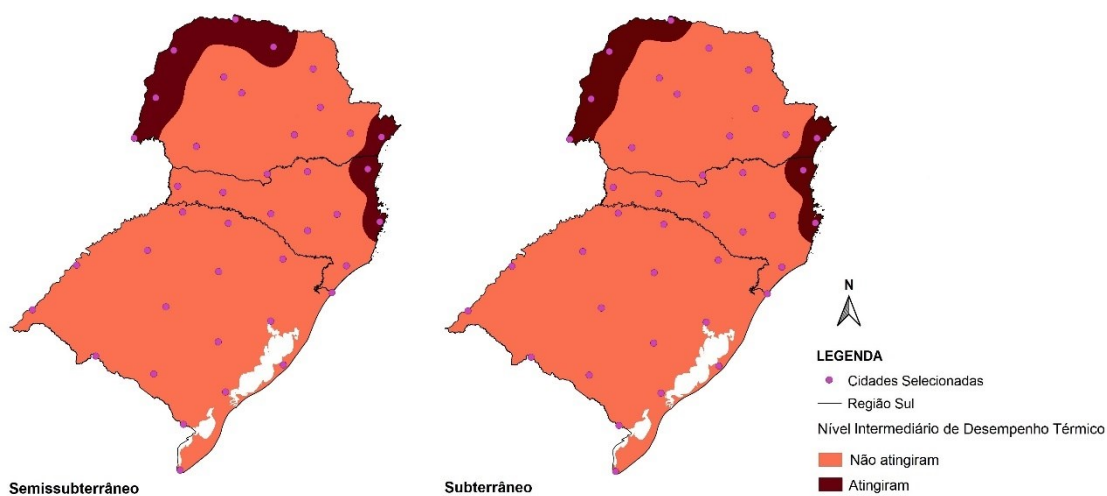
Muitas residências acabaram não atingindo o nível intermediário, uma vez que não conseguiram sequer atingir alguma redução de carga térmica, obtendo, na maioria dos casos, aumento de carga térmica. As Tabelas 14 e 15 do

Apêndice C fornecem informações detalhadas sobre o consumo de energia para as residências de referência, bem como as residências semissubterrâneas e subterrâneas. Além disso, ele apresenta dados relativos à redução da carga térmica e faz uma comparação com os valores mínimos exigidos.

A Figura 64 mostra as cidades que atingiram e não atingiram os critérios do nível intermediário de desempenho térmico. O primeiro mapa refere-se as residências semissubterrâneas, nos quais somente as cidades do norte, noroeste e litoral do Paraná, bem como as cidades da parte leste de Santa Catarina, cumpriram os critérios. Em Santa Catarina, isso incluiu Florianópolis e Joinville, enquanto no Paraná, englobou cidades como Paranaguá, Foz do Iguaçu, Icaraíma, Londrina, Marechal Cândido Rondon e Paranapoema.

O segundo mapa é referente as residências subterrâneas e inclui as mesmas cidades, com exceção de Londrina, que não conseguiu atender aos critérios do percentual mínimo ($\Delta PHFT_{min}$) e da redução de carga térmica mínima ($RedCgTT_{min}$). Nas regiões onde as construções atingiram o nível intermediário, independente do grau de contato com o solo, caracterizam-se por climas mais quentes, com temperaturas médias superiores na Região Sul. Nessas áreas, tanto as temperaturas médias anuais do ar quanto do solo excedem $21^{\circ}C$.

Figura 64 - Cidades onde as residências atingiram e não atingiram o nível intermediário de desempenho térmico.



Portanto, observou-se que as mesmas regiões apresentaram residências semissubterrâneas e subterrâneas que atenderam aos critérios do nível intermediário de desempenho térmico. Essas áreas incluem o litoral do Paraná e de Santa Catarina, bem como as regiões de baixa e média altitude no norte e noroeste do Paraná. Nessas regiões, as temperaturas médias do ar e do solo são mais elevadas em comparação com as áreas vizinhas.

4.6. Nível superior de desempenho térmico

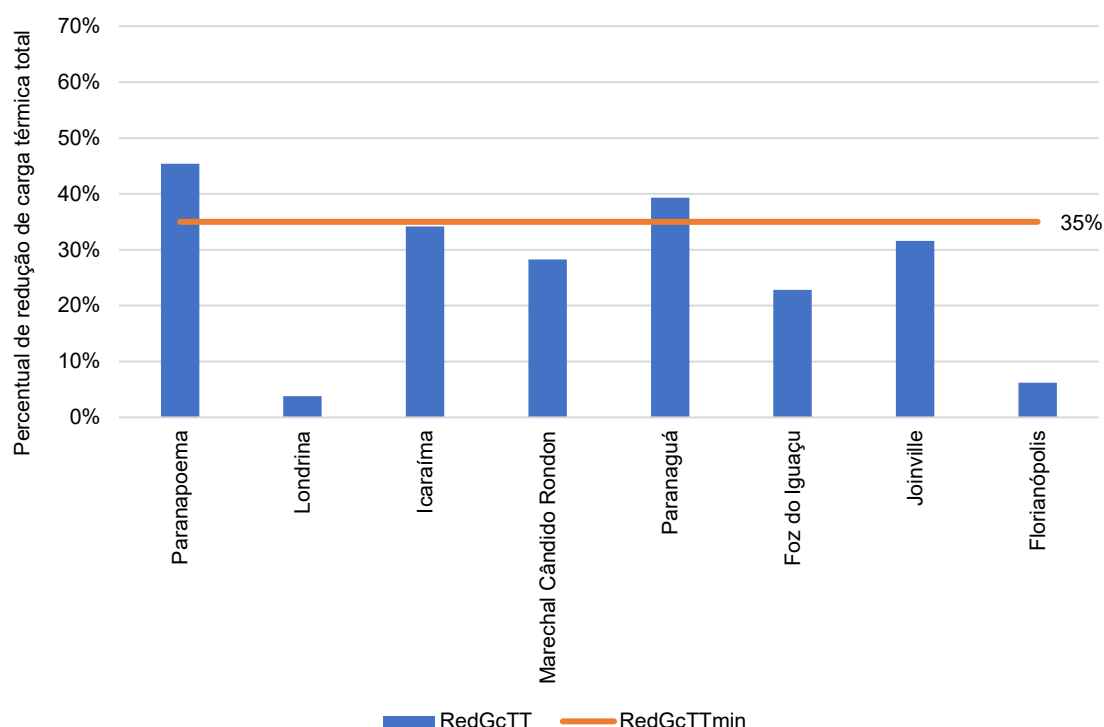
As residências que atingiram o nível intermediário avançaram para a avaliação no nível superior. A Tabela 7 mostra os resultados do primeiro critério para determinar a redução de carga térmica total, que envolve o cálculo de consumo anual por metro quadrado. Esses valores são idênticos para ambos os modelos, semissubterrâneo e subterrâneo, uma vez que se referem ao modelo de referência. No entanto, é importante observar que o resultado para a cidade de Londrina só é aplicável no cálculo do nível superior no modelo semissubterrâneo, uma vez que a cidade não atendeu ao critério do percentual mínimo ($\Delta PHFT_{min}$) no nível intermediário na residência subterrânea. Dado que os valores de todas as cidades estão abaixo de 100, a NBR 15575-1 definiu um critério mínimo de redução de carga térmica total em 35%.

Tabela 7 – Consumo anual de energia por metro quadrado da residência semissubterrânea e subterrânea.

| UF | Cidades | Carga térmica total da residência de referência / área do piso da residência (kWh/(ano.m ²)) |
|----|-------------------------|--|
| SC | Florianópolis | 21,6 |
| SC | Joinville | 21,3 |
| PR | Foz do Iguaçu | 39,5 |
| PR | Icaraíma | 33,8 |
| PR | Londrina | 27,2 |
| PR | Marechal Cândido Rondon | 25,0 |
| PR | Paranaguá | 21,3 |
| PR | Paranapoema | 33,4 |

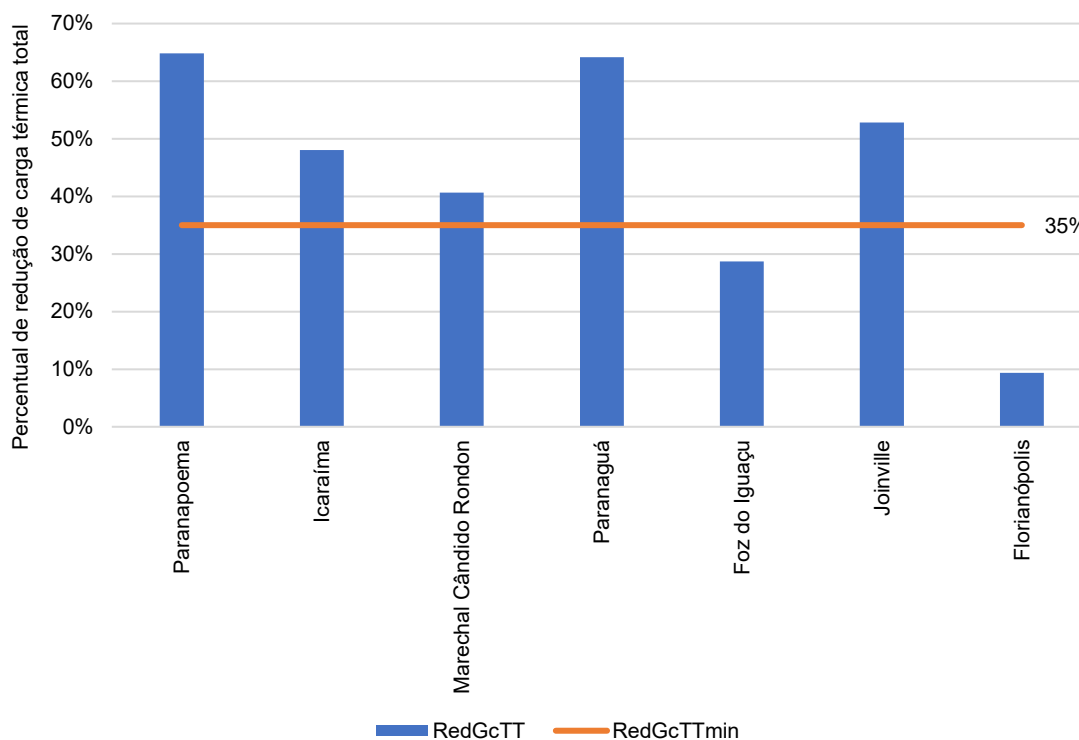
A Figura 65 mostra a redução de carga térmica total das residências semissubterrâneas comparada com a redução mínima de carga térmica total do nível superior. Apenas as residências das cidades de Paranapoema e Paranaguá atingiram os critérios do nível superior.

Figura 65 - Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências semissubterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT_{min}) do nível superior.



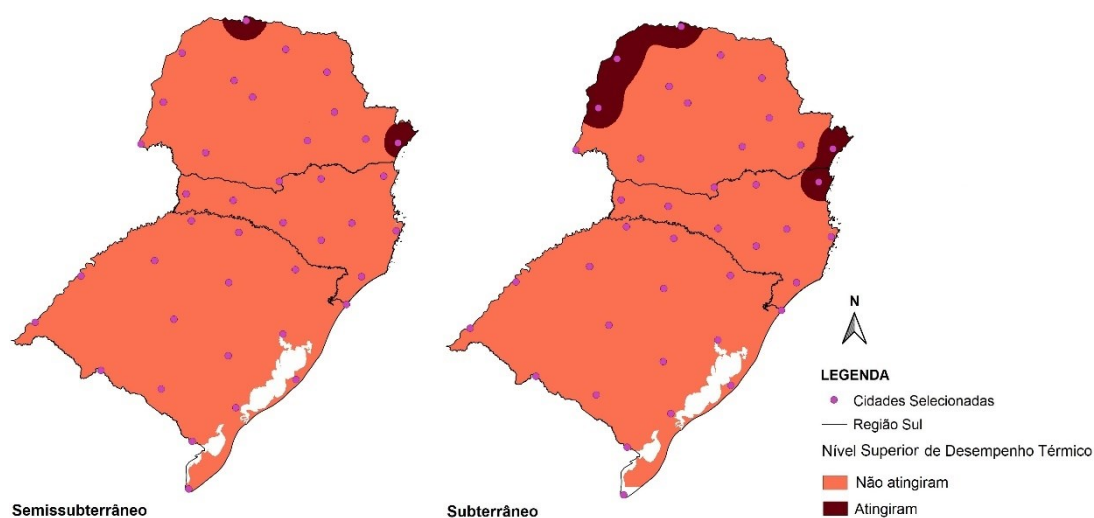
As cidades de Icaraíma e Joinville alcançaram reduções de carga térmica total de 34,2% e 31,6%, respectivamente, valores próximos ao percentual mínimo exigido para o nível superior de desempenho térmico, mas não atingiram esse nível. A Figura 66 mostra a comparação entre a redução de carga térmica total das residências subterrâneas e a redução mínima de carga térmica total estipulada para o nível superior. A maioria das cidades conseguiu atender ao critério mínimo de redução de carga térmica total em residências subterrâneas, com exceção de Foz do Iguaçu e Florianópolis. No caso de Florianópolis, sua redução ficou distante do mínimo exigido, enquanto Foz do Iguaçu se aproximou da redução necessária, mas não a alcançou.

Figura 66 – Comparação entre a redução de carga térmica total (RedCgTT) das residências subterrâneas e a redução de carga térmica mínima (RedCgTT_{min}) do nível superior.



Logo após a análise dos resultados, foi constatado que somente duas cidades foram aprovadas no modelo semissubterrâneo, enquanto no modelo subterrâneo, cinco cidades atenderam aos requisitos do nível superior de desempenho térmico. A Figura 67 mostra as cidades que atingiram e não atingiram o referido nível, e é possível observar que as regiões onde as cidades foram aprovadas são semelhantes, mas a residência subterrânea atingiu os critérios em mais cidades. O Apêndice D apresenta uma análise detalhada dos cálculos de todas as cidades avaliadas no nível superior dos modelos semissubterrâneos (Tabela 16) e subterrâneos (Tabela 17).

Figura 67 – Cidades onde as residências atingiram e não atingiram o nível superior de desempenho térmico.



No primeiro mapa, as residências que atingiram aos critérios do nível superior estão localizadas nas cidades de Paranaguá e Paranapoema. No segundo mapa, as cidades que atingiram os critérios são Joinville, Paranaguá, Icaraíma, Paranapoema e Marechal Cândido Rondon. A Tabela 8 mostra as características térmicas e geográficas das cidades que atingiram o nível superior de desempenho térmico. É perceptível que as cidades situadas no leste, próximas ao litoral, apresentam baixa altitude, temperaturas médias do ar mais baixas e maior condutividade térmica.

Tabela 8 – Propriedades térmicas e geográficas das cidades que atingiram o nível superior em desempenho térmico.

| UF | Cidades | Temperatura média anual do ar (°C) | Temperatura média anual do solo (°C) | Altitude (m) | Condutividade térmica do solo (W/m.K) | Região geográfica |
|----|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------|
| SC | Joinville | 21,1 | 22,6 | 4 | 2,7 | L |
| PR | Paranaguá | 21,6 | 22,9 | 5 | 2,8 | L |
| PR | Icaraíma | 23,7 | 23,4 | 369 | 2,5 | NO |
| PR | Paranapoema | 23,8 | 23,2 | 401 | 2,5 | N |
| PR | Marechal Cândido Rondon | 21,9 | 22,6 | 420 | 2,1 | O |

As cidades localizadas no norte e noroeste da região apresentam altitudes médias, bem como temperaturas médias do ar e do solo mais elevadas em comparação com as cidades do leste. Um exemplo disso é a cidade de Marechal Cândido Rondon, situada no oeste do Estado do Paraná, que possui temperaturas médias do ar e do solo semelhantes às de Paranaguá, que está na região oposta. A principal diferença reside na condutividade térmica do solo e na altitude, uma vez que a cidade do oeste paranaense possui uma condutividade de 2,1 W/m.K e uma altitude média de aproximadamente 420 metros.

Assim, tornou-se evidente que as residências subterrâneas alcançaram reduções mais significativas na carga térmica total, indicando que o contato maior com o solo desempenhou papel fundamental para atingir o nível superior de desempenho térmico. Além disso, as residências localizadas nessas regiões que alcançaram o nível superior tinham médias mais elevadas de temperatura do ar e do solo em comparação com o restante da Região Sul. Nas residências semissubterrâneas que atingiram o nível superior, as reduções na carga térmica total estavam abaixo de 50%, enquanto na maioria das residências subterrâneas que alcançaram esse nível, as reduções eram superiores a 50%.

4.7. Discussão

Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014) destacam que o subsolo emerge como um ambiente propício para abrigar espaços funcionais, caracterizando-se por um impacto ambiental reduzido. Este estudo, por meio de seus resultados, constata que a adaptação do subsolo para a construção de residências unifamiliares traz resultado térmicos e energéticos. Os resultados variam de acordo com o clima da região, podendo ser positivo ou negativo. Essa técnica evidencia que a utilização do solo proporciona mudanças significativas tanto em termos de desempenho térmico quanto energético.

O clima *Cfb* (subtropical oceânico), conforme a classificação de Köppen-Geiger, encontra-se no centro da Região Sul, caracterizado por maior altitude, e observa-se que as residências protegidas pelo solo nessa localidade não atingiram sequer o nível mínimo de desempenho térmico. A influência direta do clima na concepção de edifícios subterrâneos é respaldada por Van Dronkelaar *et al.* (2014), que enfatizam o papel predominante do clima no potencial de economia de energia proporcionado por essas construções. Os resultados das simulações na Região Sul do Brasil corroboram que o clima exerce impacto significativo na temperatura do solo e no potencial de economia de energia nas residências.

ProjetEEE (BRASIL, 2023b) salienta que a utilização da massa térmica do solo apresenta vantagens tanto no inverno quanto no verão, contribuindo para reduzir e atrasar oscilações de temperatura. É destacado que é essencial permitir que a massa da edificação seja exposta à radiação solar durante o inverno. Entretanto, nas regiões mais frias, as residências não alcançaram o nível mínimo de desempenho térmico. Nesta pesquisa, a proteção do solo no inverno resultou no aumento da temperatura operativa mínima, mesmo assim implicou em aumento no consumo de energia. Na casa subterrânea, o principal contato da residência com a radiação solar ocorre através da cobertura. Esse fato, ao se restringir apenas a essa área, pode explicar a frequência mais elevada de residências desse tipo que não alcançaram o nível mínimo de desempenho térmico.

A percepção em relação ao solo, apesar do conhecimento de sua elevada inércia térmica, pouco evoluiu desde a década de 70. Esta inércia térmica, que

pode contribuir para a redução do consumo de energia e o aprimoramento do desempenho térmico interno das residências, torna-se particularmente relevante em um contexto de mudanças climáticas crescentes.

Davies, Zoras e Adjali (2001) conduziram uma análise de edifícios com uma proporção considerável de área de piso em contato direto com o solo em relação ao volume total. No entanto, alertam sobre a necessidade de cautela ao avaliar o impacto desse contato com o solo no desempenho térmico das edificações, visto que o fluxo de calor proveniente do solo altera o balanço térmico dos ambientes. Este estudo evidencia que um maior contato com o solo, e conseqüentemente, um aumento no fluxo de calor, pode influenciar o balanço térmico da unidade habitacional, gerando resultados variados em termos de desempenho térmico e energético.

As regiões frias que utilizaram o solo em residências, como China, Canadá e Suíça (ANSELM, 2008; TARDIF, 2017; VILLA VALS, 2023), enfrentam invernos rigorosos, temperaturas negativas e precipitação de neve. Isso contrasta com o clima do Sul do Brasil, que apresenta casos isolados de neve e temperaturas abaixo de zero. As residências protegidas pelo solo nessas regiões obtiveram maior utilização e resultados mais expressivos em climas de temperatura negativa. Em países de regiões quentes, como Austrália, Irã, Líbia, Tunísia e Brasil (ALKAFF; SIM; EFZAN, 2016; ATTARIAN; NAJAR, 2019; MILANOVIC; FOLIC; FOLIC, 2018; GABRIL, 2014; WEIMER, 2012), os resultados foram mais destacados em locais com altas temperaturas. Esse padrão reflete no trabalho, onde as regiões mais quentes apresentaram residências com desempenho térmico superior.

Na análise de estudos que utilizaram simulação computacional, a maioria focou no desempenho térmico, como Anselm (2008), Callejas et al. (2021), Benardos, Athanasiadis e Katsoulakos (2014), Hebbal et al. (2021), Mirabi e Abarghie (2021) e Mukhtar, Ng e Yusoff (2018). Esses estudos, assim como este trabalho, observaram diminuição da temperatura interna no verão e aumento no inverno. Este fato ocorreu em todas as residências simuladas neste trabalho, mesmo assim não foi o suficiente para que as residências ficassem 100% de horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa.

5. CONCLUSÃO

A arquitetura subterrânea no Brasil representa uma fusão do conhecimento ancestral das populações indígenas com o esforço contemporâneo para minimizar o elevado consumo de energia associado ao aquecimento e resfriamento de edifícios. A técnica de proteção de residências por meio do contato com o solo promete vantagens substanciais ao mitigar as flutuações climáticas. A flexibilidade do uso do solo como aliado oferece um potencial significativo e, ao mesmo tempo, desafia os construtores em termos técnicos e de projeto. Enquanto chuvas frequentes em regiões tropicais e subtropicais podem representar um desafio em algumas áreas, a abordagem projetual precisa compreender essas variáveis para otimizar e avaliar a possibilidade da integração da edificação com o solo.

No processo de planejamento, a simulação auxilia na tomada de decisões relacionadas aos aspectos térmicos e energéticos do projeto. Dada a ampla variação nas propriedades do solo, as simulações constituem uma ferramenta fundamental que permite aos projetistas tomar decisões com parâmetros detalhados do desempenho térmico e energético da residência. A construção e manutenção desses espaços requerem um enfoque cuidadoso, com a execução precisa dos componentes de construção e uma adequada impermeabilização para evitar problemas futuros. Embora a intervenção inicial no solo possa acarretar impactos ambientais, os benefícios posteriores, como a redução no consumo de energia.

As residências que cumpriram os requisitos mínimos de desempenho térmico em configurações semissubterrâneas ou subterrâneas revelam uma ampla diversidade de locais onde o contato com o solo contribuiu para o controle térmico. No entanto, ao analisar os níveis intermediários e superiores, torna-se evidente que as regiões noroeste e leste do Paraná, bem como o nordeste de Santa Catarina, foram as áreas que mais se beneficiaram do contato com o solo. Nessas regiões, o contato com o solo reduziu a temperatura operativa presente no ambiente.

Os resultados demonstram que o clima das cidades exerce influência considerável no potencial de economia de energia, como também observado em um estudo de Van Dronkelaar *et al.* (2014). Cidades localizadas em regiões de

maior altitude, em sua maioria, não atingiram os níveis mínimo e intermediário. Essas áreas já desfrutam de temperaturas externas mais amenas, e o contato com o solo aumentou o número de horas em que a temperatura operativa fica abaixo da faixa definida pela norma de desempenho, exigindo carga térmica adicional para aquecimento. Nessas cidades, a temperatura do solo, mesmo servindo como uma "bateria térmica" não se mostrou suficiente para elevar a média da temperatura operativa. No entanto, observou-se o aumento da temperatura operativa mínima e a diminuição da temperatura operativa máxima em todas as cidades à medida que aumentava o contato com o solo.

Quanto aos níveis mínimo e intermediário, as residências semissubterrâneas obtiveram mais aprovações do que as residências subterrâneas, e a discrepância é particularmente expressiva no nível mínimo. No entanto, no nível superior, as residências com maior contato com o solo (55%) apresentaram uma proporção consideravelmente maior de aprovações, aproximadamente 250% a mais em comparação com as residências semissubterrâneas. Isso ocorre porque o nível superior exige redução mais substancial na carga térmica total, e, no caso dos modelos subterrâneos, várias cidades alcançaram quase 65% de redução na carga térmica total. Portanto, é evidente que o aumento do contato com o solo proporcionou resultados benéficos para a temperatura interna e o consumo de energia das residências.

O contato com o solo é comum em regiões com diversas faixas de temperatura, incluindo as mais frias. No entanto, na Região Sul do Brasil, as residências localizadas em cidades com temperaturas médias do ar mais baixas não apresentaram resultados favoráveis ao serem avaliados conforme os critérios da NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Isso pode ser atribuído a diversas razões, incluindo a utilização dessa técnica nessa região onde há pouco registro de temperaturas médias do ar abaixo de zero grau Celsius. Isso resulta em diferença relativamente pequena entre a temperatura do solo e a temperatura interna das residências. Os registros históricos de desempenho térmico em climas diversos introduz complexidades adicionais devido à diversidade das condições climáticas e aos critérios variáveis estabelecidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

O uso do contato com o solo na Região Sul do Brasil não revelou uma eficácia tão pronunciada quanto o esperado. Apenas 5% dos modelos semissubterrâneos alcançaram aprovação no nível superior de desempenho térmico, enquanto no caso dos modelos subterrâneos, essa porcentagem foi de apenas 12,5%. Devido ao clima temperado da região, outras estratégias passivas podem apresentar vantagens mais substanciais. No entanto, é notável que regiões com temperaturas mais elevadas aproveitaram melhor essa técnica, o que sugere sua aplicabilidade a outras áreas do Brasil caracterizadas por climas mais quentes.

5.1. Limitações do trabalho

As limitações desta pesquisa estão relacionadas principalmente aos seguintes aspectos:

- as propriedades térmicas do solo de cada região exibem características únicas devido à presença de minerais, matéria orgânica, água e outros elementos. Para obter resultados mais precisos, seria fundamental realizar medições diretas desses dados (temperatura do ar e do solo, tipo do solo, condutividade térmica do solo, densidade do solo, calor específico do solo) em cada localidade;
- foram analisadas 40 cidades na Região Sul para a obtenção dos resultados cartográficos. No entanto, destaca-se que a inclusão de mais cidades na simulação seria importante para a obtenção de um mapa mais detalhado e preciso, permitindo uma definição mais abrangente das regiões que atendem aos critérios estabelecidos pela norma de desempenho.
- a utilização do solo caracterizado como sem vegetação e úmido como parâmetro nas simulações de temperatura do solo pode introduzir variações nos resultados. Identificar as características específicas do solo em cada cidade seria fundamental para obter resultados mais precisos e fidedignos nas análises de temperatura do solo.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros sobre a aplicabilidade do solo como estratégia bioclimática passiva:

- investigar a relação entre os tipos de solo e o desempenho térmico e energético de edifícios residenciais protegidos pelo solo;
- investigar edifícios protegidos pelo solo com diferentes ocupações, como comercial e industrial;
- investigar a utilização de residências protegidas pelo solo nas Regiões Centro-Oeste, Sudeste, Nordeste e Norte.

REFERÊNCIAS

- ALKAFF, S. A.; SIM, S. C.; EFZAN, M. N. E.; A review of underground buildings towards thermal energy efficiency and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 692–713, 2016.
- ALLEN, R.G.; WALTER, I.A.; ELLIOTT, R.L.; HOWELL, T.A.; ITENFISU, D.; JENSEN, M.E.; SNYDER, R.L.; **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2005.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 140: Standard Method of Test for The Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**, Atlanta, GA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, Atlanta, GA, 2013.
- ANSELM, A. J. Passive annual heat storage principles in earth sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing. **Energy and Buildings**, v. 40, p. 1214–1219, 2008.
- ARBOIT, N. K. S.; DECEZARO, S. T.; AMARAL, G. M.; LIBERALESSO, T.; MAYER, V. M.; KEMERICH, P. D. C. Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil - Uma revisão de literatura. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade de São Paulo, v. 26, p. 155–168, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

- ATTARIAN, K.; NAJAR, B. S. A. “Vernacular And Historic Underground Urban Facilities and Sustainability of Cities Case Study: Infrastructures of Dezful”, **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, n. 1, v. 9, p. 2–23, 2019.
- BADACHE, M. ESLAMI-NEJAD, P. OUZZANE, M. AIDOUN, Z. LAMARCHE, L. A new modeling approach for improved ground Temperature profile determination. **Renewable Energy**, v. 85, p. 436–444, 2016.
- BAKOOSH, H. M. M.; ARSLANGAZI, H.; ASILSOY, B. Comparion of Temperature and humidity among traditional underground and modern house in Gharyan, Libya. **International Journal of Advanced and Applied Sciences**, v. 8, e. 3, p. 1–11, 2021.
- BAVARESCO, M. V.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. **CB3E Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações**. Florianópolis, 2017.
- BENARDOS, A.; ATHANASIADIS, I.; KATSOULAKOS, N. Modern Earth Sheltered Constructions: A Paradigm of Green Engineering. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 41, p. 46–52, 2014.
- BENSEMRA, Z. **Tunisia’s Underground House**. 2018. 1 Fotografia. 1230x820 pixels. Disponível em: <https://widerimage.reuters.com/story/last-residents-hold-on-in-tunisia-underground-houses>. Acesso em: 29 mar. 2023.
- BERNARDES, J. A.; FERREIRA, F. P. M. Sociedade e Natureza. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **A Questão Ambiental: Diferentes abordagens**. 5ª Ed. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2009.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Programa Minha Casa, Minha Vida**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/programa-minha-casa-minha-vida>. Acesso em: 15 ago. 2023c.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN): base ano de 2022**. Brasília, 2023a.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica 030/2018: Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial**

Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Brasília, 2018.

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **ProjetEEE**, 2023b. Plataforma para influenciar e desenvolver o mercado de eficiência energética em edificações comerciais e públicas. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/implementacao/edificacoes-semienterradas/?cod=ita>. Acesso em: 18/05/2023.
- CALLEJAS, I. J. A.; APOLONIO, R. M.; DA GUARDA, E. L. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. de A. C.; ROSETA, F.; DO AMARANTE, L. M. Bermed Earth-sheltered wall for low-income house: Thermal and energy measure to face climate change in tropical region. **Applied Sciences**, v. 11, p. 1–22. 2021.
- CLARK, S. P. **Estrutura da Terra**; tradução de Yociteru Hasui. São Paulo, Editora Edgard Blucher, Universidade de São Paulo, 1973.
- COPÉ, S. M. **Les grands constructeurs précoloniaux du plateau du sud du Brésil: étude de paysages archéologiques à Bom Jesus, Rio Grande do Sul, Brésil.** 2006. Tese (Doutorado em Arqueologia) — Curso de Arqueologia — Universidade de Paris I Sorbonne, Paris, França, 2006.
- COSTA, J. B. Caracterização e constituição do solo. **Caracterização e constituição do solo.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004.
- COSTA, V. A. C.; RORIZ, V.F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in EnergyPlus Simulation program. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 117–135, 2017.
- D'ANGELIS, W. R.; VEIGA, J. Habitação e Acampamentos Kaingang hoje e no passado. **Revista Cadernos do CEOM.** Chapecó: Unochapecó/Argos, n. 18, p. 213–242, 2003.
- DAVIES, M.; ZORAS, S.; ADJALI, M. H. Improving the efficiency of the numerical modeling of built Environment earth-contact heat transfers. **Applied Energy**, v. 68, p. 31–42, 2001.
- DOMINGOS, Charles Sidarta Machado. 50 anos da Crise dos Mísseis: horror nuclear em tempos presentes. **Historiæ**, Rio Grande, v. 4, n. 2: 79–90, 2013.
- ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; MACHADO, R. M. S.; MAZZAFERRO, L.; MENDES, L. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Análise de Sensibilidade e Incertezas**

dos Parâmetros Relacionados à Modelagem do Contato do Piso com o Solo no Programa EnergyPlus. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, XV ENCAC/XI ELACAC, 2019, João Pessoa (PB), Brasil, 2019.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference**. U. S. Department of Energy. 2022. Disponível em: [http://](http://energyplus.net/) <https://energyplus.net/>.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference**. U. S. Department of Energy. 2021. Disponível em: [http://](http://energyplus.net/) <https://energyplus.net/>.

ENGLISH, P. W.; MAYFIELD, R. C. The cultural landscape. In: English, P.W.; Mayfield, R. C. (orgs.). **Man, Space, and Environment. Concepts in Contemporary human geography**. New York, London, Toronto: Oxford University Press, p.3-9, 1972.

FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G. -K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3-21, 2012.

FRIEDLINGSTEIN, P. *et al.* **Global Carbon Budget 2022**. Earth System Science Data, v. 14, n. 11, p. 4811-4900, 2022.

GABRIL, N.M.S. **Thermal Comfort and Building Design Strategies for Low Energy Houses in Libya, Lessons from the Vernacular Architecture**. 2014. Tese (Doutorado em Filosofia) — University of Westminster. 2014.

GARRETT, Bradley. Doomsday preppers and the architecture of dread. **Geoforum**, v. 127, p. 401–411, 2021.

GEIGER, R. **Manual de Microclimatologia: O clima da Camada de Ar Junto ao Solo**. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn. Verlag, 4^a ed., 1961.

GOMES, A. J. L. **Avaliação de Recursos Geotermiais da Bacia do Paraná**. 2009. Tese (Doutorado em Geofísica) – Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2009.

- GRIMM, A. M. – Clima da Região Sul do Brasil, p. 260 – 275. CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. organizadores. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- HAIT, J. Passive Annual Heat Storage: Improving the Design of Earth Sheltered Homes. **Mother Earth News**, 1985. Disponível em: <https://www.motherearthnews.com/renewable-energy/passive-annual-heat-storage-zmaz85zsie>. Acesso em 22 abr. 2022.
- HAUSMANN, G. **Underground Schwankungen der Erdbodentemp in 1m bis 12m tiefe**. Z. F, Met. 4, p. 363-372, 1950.
- HAZBEI, M.; NEMATOLLAHI, O. BEHNIA, M.; ADIB, Z. Reduction of Energy Consumption Using Passive Architecture in Hot and Humid Climates. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 47, p. 16–27, 2015.
- HEBBAL, B.; MARIF, Y.; HAMDANI, M.; BELHADJ, M. M.; BOUGUETTAIA, H.; BECHKI, D. The geothermal potential of underground buildings in hot climates: Cases of Southern Algeria. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, p. 101422, 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **GEOFTP Mapa Político da Região Sul 2017**, 2023. Plataforma de mapas do Brasil. Disponível em: <https://geofpt.ibge.gov.br/>. Acesso em: 19/05/2023.
- ISO, EN. 13790; Energy Performance of Buildings—Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling. **International Organization for Standardization**: Milan, Italy, 2008.
- JARDIM, C. H. A “Crise Hídrica” no Sudeste do Brasil: Aspectos Climáticos e Repercussões Ambientais, **Revista Tamoios**, v. 11, n. 2, p. 67–83, 2015.
- KANG, X.; YAN, DA; XIE, X.; NA, J.; LIU, Z. Co-simulation of dynamic underground heat transfer with building energy modeling based on equivalent slab method. **Energy and Building**, v. 256, p. 111728, 2022.
- KRZEMIŃSKA, A.; ZARĘBA, A.; DZIKOWSKA, A. Bioarchitecture—a new vision of energy sustainable cities. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 91, 2017.

- KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. **Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States**, ASHRAE Transactions 71(1), p. 61-75, 1965.
- LA SALVIA, Fernando. **A habitação subterrânea: uma adaptação ecológica**. In: WEIBER, Günter (org.). A arquitetura no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Mercado Aberto, 1983.
- LAMB, W. F.; WIEDMANN, T.; PONGRATZ, J.; ANDREW, R.; CRIPPA, M.; OLIVIER, J. G. J.; WIEDENHOFER, D.; MATTIOLI, G.; KHOURDAJIE, A. A.; HOUSE, J.; PACHAURI, S.; FIGUEROA, M.; SAHEB, Y.; SLADE, R.; HUBACEK, K.; SUN, L.; RIBEIRO, S. K.; KHENNAS, S.; CAN, S. R.; CHAPUNGU, L.; DAVIS, S. J.; BASHMAKOV, I.; DAI, H.; DHAKAL, S.; TAN, X.; GENG, Y.; GU, B.; MINX, J. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 7, p. 73005, 2021.
- MARQUE, L. M.; BRINO, A. C.; KREUTZ, M. R.; FIEGENBAUM, J.; MACHADO, N. G. Native Architecture: A Study on the Coverage Structure of the Underground Houses of Southern Jê People, Brazil. **Archaeologies**, v. 16, e. 2, p. 364–395, 2020.
- MILANOVIC, A. R.; FOLIC, N. K.; FOLIC, R. Earth-Sheltered House: A case study of a dobraca house near Kragujevac, Serbia. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3629, 2018.
- MIRABI, E.; ABARGHUIE, F. A. Investigating the climate-adaptive design Strategies of residential earth-sheltered building in Iran. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, ISSN: 2398-4708, 2021.
- MIRREZAEI, Seyedeh Ayed. **An Ecological Study on Earth Sheltered Housing in Different Climates**. 2015. Dissertação (Mestre em Arquitetura) - Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, 2015.
- MIZBEJABBERS, D. J. Why we don't like our underground house. **Dengarden**. 2012. Disponível em: <https://dengarden.com/misc/The-Pitfalls-of-an-Underground-House>. Acesso em: 18 abr. 2023.
- MORSELLI, T. B. G. A. **Biologia do Solo**. Pelotas, Editora e Gráfica Universitária PREC/UFPel, 2009.
- MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel, 5ª ed., 1981.

- MUKHTAR, A.; NG, K. C.; YUSOFF, M. Z. Passive thermal performance prediction and multi-objective optimization of naturally-ventilated underground shelter in Malaysia. **Renewable Energy**, v. 123, p. 342–352, 2018.
- NORDESTE REGISTRA EM JULHO DEZ RECORDES DE ENERGIA RENOVÁVEL. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. 4 ago. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210804-nordeste-registra-em-julho-dez-recordes-de-geracao-renovavel.aspx>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- OEHLER, Mike. **\$50 and up underground house book**. 1981.
- OLIVIER, J. G. J.; PETERS, J. A. H. W.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; MUNTEAN, M. **Trends in global CO₂ emissions: 2013 report**. Netherlands: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2013.
- PARKER, H. W.; LONNERMARK, A.; INGASON, H. **Security of tunnels and underground space: challenges and opportunitites, keynote lecture**. *In: International Tunnelling Symposium on Tunnel Safety and Security*, n. 3, 2008, Stockholm. Anais. Stockholm, 2008, p. 51-61.
- PERREIRA, L. M. Casa Monte na Comporta, Portugal. *In: TUNDREA, H.; MAXINEASE, S. G.; SIMON, I. M.; TARANU, N.; BUDESCU, M.; GAVRILESCU, M.* 2009. Disponível em: <http://www.thecoolhunter.com.au/article/detail/1459/casa-monte-na-comporta-portugal>.
- PINEL, P & BEAUSOLEIL-MORRISON, I. **Coupling soil heat and mass transfer models to foundation models in whole-building simulation packages**. *In: Proceedings of eSim, Halifax, Canada, 2012*.
- POKORSHA-SILVA, I.; KADELA, M.; ORLIK-KOZDON, B.; FEDOROWICZ, L. Calculation of building heat losses through slab-on-ground structures based on soil Temperature measure in situ. **Energies**, v. 15, n. 1, p. 114, 2022.
- POPP, J. H. **Geologia Geral**. Livros Técnicos Científicos, p. 49-51, 1998.
- POPULAÇÃO MUNDIAL ATINGE 8 BILHÕES DE PESSOAS. **ONU NEWS**, 15 nov. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805342>. Acesso em 28 jun. 2023.

- PORTO, A. H. H.; DURANTE, L. C.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; CALLEJAS, I. J. A.; BUTTNER, S. B. **Habitação de Interesse Social em Mato Grosso: Contribuições Científicas**. Cáceres – MT: Editora UNEMAT, 2018. p. 188.
- QGIS. **Documentação para QGIS 3.10**. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.10/pt_BR/docs/index.html#. Acesso em: 26 set. 2023.
- QIAO, Y. K.; PENG, F. L.; SABRI, S.; RAJABIFARD, A. Socio-environmental costs of underground space use for urban sustainability. **Sustainable Cities and Society**, v. 51, p. 101757, 2019.
- REES, S. W.; ZHOU, Z.; THOMAS, H. D. The influence of soil moisture content variations on heat losses from earth-contact structures: an initial assessment. **Building and Environment**, v. 36, e. 2, p. 157–165, 2001.
- REIS, José Alberione. **Para uma arqueologia dos Buracos de Bugre: do sistematizar, do problematizar, do propor**. 1997. Tese (Mestrado em Filosofia e Ciências Humanas) — Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- RESENDE, B. C.; SOUZA, H. A. de; GOMES, A. P. Modelagem de Transferência de Calor de Ambientes Subterrâneos no Programa de Simulação EnergyPlus. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 161-180, 2019.
- RIBEIRO, F. N.; TEIXEIRA, M. C. V. A ocupação das áreas livres e a transformação da paisagem: da Serra do Curral ao Belvedere (2009). In: Tângari, V.R.; Andrade, R.; Schlee, M. B. (Org.) **Sistemas de espaços livres: o cotidiano, apropriações e ausências**. Rio de Janeiro: Proarq. p. 93-97.
- ROBERT, A.; KUMMERT, M. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. **Building and Environment**, v. 55, p. 150-158, set. 2012.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Edição. Brasília: Embrapa, 2018.
- SANTOS, M. **Atlas nacional do Brasil**. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.

- SCHMIDT, A.; PARIS, L. P. El concepto de la naturaleza en Marx. **Ideas y Valores**, n. 51-52, p. 128-132, 1978.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (Coords.). **Geologia do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1984.
- SHETA, S. A. **Attributes of Indoor Environmental Quality to Earth-Sheltered Building Design**. *In: International Conference Enhanced Building Operations*, n. 10, 2010, Kuwait. Anais. Energy Systems Laboratory; Texas A&M University. 2010.
- SHINZATO, E.; FILHO, A. C.; TEIXEIRA, W. G. Solos Tropicais. in: SILVA, C. R. **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.
- SILVA, S. B. D. **Etnoarqueologia dos Grafismos Kaingang: um modelo para a compreensão das sociedades Proto-Jê meridionais**. 2001. Tese (Doutorado em Antropologia Social) — Curso de Antropologia — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- SOLTANI, M.; KASHKOOLI, F.; M.; DEGHANI-SANIJ, A. R.; KAZEMI, A. R.; BORDBAR, N.; FARSHCHI, M. J.; ELMI, M.; GHARALI, K.; B. DUSSEAULT M. A comprehensive study of geothermal Heating and Cooling systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, p. 793–818, 2019.
- SONG, Y. L.; DARANI, K. S.; KHDAR, A. I.; ABU-RUMMAN, G.; KALBASI, R. A Review No Conventional Passive Cooling Methods Applicable to Arid and Warm Climates Considering Economic Cost and Efficiency Analysis in Resource-Based Cities. **Energy Reports**, v. 7, p. 2784 – 2820, 2021.
- SOUZA, H. A.; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 113-128, 2011.
- STERLING, R.; ADMIRAAL, H.; BOBYLEV, N.; PARKER, H.; GODARD, J. P.; VÄHÄÄHO, I.; ROGERS, C. D. F.; SHI, X.; HANAMURA, T. Sustainability issues for underground space in urban areas. **Urban Design and Planning**, e. 4, v. 165, p. 241-254, 2012.

- SZASZ, A. **Shopping our way to safety: How we changed from protecting the environment to protecting ourselves**. University of Minnesota Press, 2007.
- TAN, Z.; ROBERTS, A. C.; CHRISTOPOULOS, G. I.; KWOK, K. -W; CAR, J.; LI, X.; SOH, C. -K. Working in underground spaces: Architectural parameters, perceptions and thermal comfort measurements. **Tunneling and Underground Space Technology**, v. 71, p. 428 – 439, 2018.
- TARDIF, A. **The Beautiful, Mysterious and Confusing Montréal Underground City**: a book about the Montréal Underground City. Montréal: Editora Montréal Underground City, 2017.
- TISSIER, J.-L. Paysage. *In*: LEVY, J.; LUSSAULT, M. (orgs.). **Dictionnaire de la géo gra phie et de l'es pa ce des so cié té s**. Paris: Belin, p. 697-701, 2003.
- TUNDREA, H.; MAXINEASE, S. G.; SIMON, I. M.; TARANU, N.; BUDESCU, M.; GAVRILESCU, M. Environmental impact assessment and thermal performances of modern earth sheltered house. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 13, e.9, p. 2363–2369, 2014.
- U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. **Earth-sheltered Houses**, National Renewable Energy Laboratory, February 1997. DOE/GO — 10 097–373, FS 120.
- ÜRGE-VORSATZ, D.; PETRICHENKO, K.; STANIEC, M.; EOM, J. Energy use in buildings in a long-term perspective. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 5, p. 141–151, 2013.
- VAKILINEZHAD, R.; MEHDIZADEH, S. F.; MOFIDI, S. S. M. Principles of passive cooling systems in vernacular architectural elements of Iran. **Journal Iranian Architecture and Urbanism**, n. 5, p. 147–159, 2013.
- VAN DRONKELAAR, C.; CÓSTOLA, D.; MANGKUTO, R. A.; HENSEN, J. L. M. Heating and cooling energy demand in underground building: potential for saving in various climates and functions. **Energy and Buildings**, v. 71, p. 129–136, 2014.
- VILLA VALS. **Villa Vals**, 2023. A plataforma apresenta o projeto, relação com o local e realiza reservas. Disponível em: <https://www.villavals.ch/>. Acesso em 16 mar. 23.

- WAGNER, E.; SCHUBERT-WELLER, C. Earth and Cave Architecture - Peter Ventsch. *In*: TUNDREA, H.; MAXINEASE, S. G.; SIMON, I. M.; TARANU, N.; BUDESCU, M.; GAVRILESCU, M. **Niggli Verlag**, Sluden, Switzerland, 1994.
- WEIMER, G. **Arquitetura**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2006.
- WEIMER, Günter. **Arquitetura popular brasileira**. 2. ed. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2012.
- WELLS, M. **The Earth-Sheltered House: An Architect's Sketchbook**, **Chelsea Green Publishing Company**. *In*: TUNDREA, H.; MAXINEASE, S. G.; SIMON, I. M.; TARANU, N.; BUDESCU, M.; GAVRILESCU, M. White River Junction, Vermont, USA, 1998.
- WRIGHT, Aimee. **Underground Architecture: connections between ground-level public space and below-ground buildings**. 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Curso de Arquitetura – Universidade Victoria de Wellington, Nova Zelândia, 2012.