

Estudo de estratégias bioclimáticas para adaptabilidade das edificações ao clima no Mato Grosso

Study of bioclimatic strategies for climate adaptability of buildings in Mato Grosso

*Estudio de estrategias bioclimáticas para la adaptabilidad de edificios al clima en Mato
Grosso*

Ana Flávia de Oliveira Soares

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, UNIVAG, Brasil.
anaf_soares@hotmail.com

André Luís de Araujo

Professor Doutor, FAUeD UFU, Brasil.
andre.araujo@ufu.br

Maíra Vieira Dias

Professora Doutora, UNIVAG, Brasil.
mairavd@yahoo.com.br

RESUMO

O desempenho termoenergético das edificações está intimamente relacionado ao clima local, logo, é preciso alinhar o espaço arquitetônico ao clima e às necessidades humanas. O Estado do Mato Grosso apresenta temperaturas elevadas nos meses mais quentes e grande parte das edificações não reflete as condições climáticas existentes, portanto, faz-se primordial estudar o clima local e as estratégias bioclimáticas mais apropriadas para cada município, para estabelecer diretrizes projetuais visando adaptabilidade climática das edificações. Assim, este trabalho teve como objetivo identificar as estratégias bioclimáticas e propor diretrizes projetuais para adaptabilidade das edificações ao clima para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, a partir da caracterização climática dos municípios e estudo das diretrizes construtivas indicadas na norma ABNT NBR 15220-3. Para tanto, fez-se a análise climática das cidades por meio da ferramenta CBE Clima Tool. Com a plotagem das cartas psicrométricas no *software* Climate Consultant 6.0 obteve-se a indicação das estratégias bioclimáticas mais relevantes e, por fim, fez-se o levantamento das diretrizes construtivas recomendadas pela norma. Apesar de Água Boa e Campo Verde estarem na mesma zona bioclimática e possuírem o mesmo clima, os resultados mostraram que o perfil climático de Campo Verde é mais próximo ao de Comodoro. Identificou-se algumas diferenças entre as recomendações projetuais estabelecidas pelo *software* e pela norma, que influenciam na porcentagem de horas em que o condicionamento ativo é requerido. Com base nisso, elaborou-se um quadro com as diretrizes construtivas mais indicadas para cada município, visando o conforto térmico dos usuários e um melhor desempenho térmico das edificações.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto térmico. Estratégias passivas. Diretrizes projetuais.

SUMMARY

The thermo-energetic performance of buildings is closely related to the local climate, making it necessary to align the architectural space with the climate and human needs. The State of Mato Grosso has high temperatures in the hottest months, and most buildings don't reflect the existing climatic conditions. Therefore, it's essential to study the local climate and the most appropriate bioclimatic strategies for each municipality to establish design guidelines aimed at the adaptability climate of buildings. Thus, this work aimed to identify bioclimatic strategies and propose design guidelines for climate adaptability of buildings for Água Boa, Campo Verde, and Comodoro, based on the climatic characterization of the municipalities and study of the construction guidelines indicated in the ABNT NBR 15220-3 standard. To this end, the cities' climate analysis was carried out using the CBE Climate Tool. Plotting the psychrometric charts in the Climate Consultant 6.0 software showed the most relevant bioclimatic strategies. Finally, we verified the design guidelines recommended by the standard. Although Água Boa and Campo Verde are in the same bioclimatic zone and have the same climate, the results showed that Campo Verde's climate profile is closer to Comodoro. We identified some differences between the design recommendations established by the software and the standard, which influence the percentage of hours in which we need active conditioning of the environment. Based on this, we create a table with the most suitable construction guidelines for each municipality, aiming at the thermal comfort of users and better thermal performance of buildings.

KEYWORDS: Thermal comfort. Passive strategies. Design guidelines.

RESUMEN

El desempeño termoenergético de los edificios está estrechamente relacionado con el clima local, por lo tanto, es necesario alinear el espacio arquitectónico con el clima y las necesidades humanas. El Estado de Mato Grosso tiene altas temperaturas en los meses más calurosos y la mayoría de las edificaciones no reflejan las condiciones climáticas existentes, como resultado, es fundamental estudiar el clima local y las estrategias bioclimáticas más adecuadas para cada municipio, para establecer pautas de diseño encaminadas a la adaptabilidad climática de los edificios. Así, este trabajo tuvo como objetivo identificar estrategias bioclimáticas y proponer pautas de diseño para la adaptabilidad de las edificaciones al clima para Água Boa, Campo Verde y Comodoro, a partir de la caracterización climática de los municipios y el estudio de las pautas de construcción indicadas en la norma ABNT NBR 15220-3. Para ello, se realizó el análisis climático de las ciudades mediante la herramienta CBE Climate Tool. Mediante el trazado de las cartas psicrométricas en el software Climate Consultant 6.0, se indicaron las estrategias bioclimáticas más relevantes y, finalmente, se relevaron los lineamientos constructivos recomendados por la norma. Aunque Água Boa y Campo Verde están en la misma zona bioclimática y tienen el mismo clima, los resultados mostraron que el perfil climático de Campo Verde es más cercano al de Comodoro. Se identificaron algunas diferencias entre las recomendaciones de diseño establecidas por el software y el estándar, que influyen en el porcentaje de horas en las que se requiere acondicionamiento activo. Con base en esto, se creó una tabla con los lineamientos constructivos más adecuados para cada municipio, buscando el confort térmico de los usuarios y un mejor desempeño térmico de las edificaciones.

PALABRAS CLAVE: Confort térmico. Estrategias pasivas. Lineamientos de diseño.

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1960, a Região Centro-Oeste passou por uma rápida e crescente expansão demográfica impulsionada pela construção de Brasília e a implantação de rodovias, a ampliação das fronteiras agrícolas e pelos programas de desenvolvimento do agronegócio (ZAVATTINI, 2009). Esse cenário gerou uma agressão sem precedentes ao meio ambiente, visto que as áreas vegetadas presentes no espaço urbano foram substituídas por áreas construídas.

O grande volume de construções, aliado à escassa vegetação urbana, contribui para elevar a temperatura e diminuir a umidade relativa do ar (UR), comprometendo a qualidade de vida da população. O Estado do Mato Grosso (MT) possui duas estações bem definidas, com inverno e primavera secos e verão e outono quentes e chuvosos, com temperaturas que podem ultrapassar 40°C nos meses mais quentes (SOUZA et al., 2013). Conforme classificação climática de Köppen-Geiger, o clima Am (tropical úmido de monção) vai do Norte ao Sudoeste do Estado e o clima Aw (tropical com inverno seco) é encontrado na parte central (ALVARES et al., 2013).

O MT engloba os biomas Pantanal, Cerrado e Amazônia, que contribuem para grande diversidade ecológica (COUTINHO, 2005) e detêm parcela significativa dos recursos naturais globais, exercendo papel basilar no ciclo do carbono e na regulação do clima global (ASSAD, 2016). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apontou um aumento de 1,5°C na temperatura média da superfície terrestre (MASSON-DELMOTTE et al., 2018) e, caso as emissões de gases do efeito estufa (GEE) não reduzam nos próximos anos, o aquecimento global provocará o aumento generalizado da temperatura em todo o país. Projeções para o final do século mostram que a Região Centro-Oeste pode registrar o maior aumento na temperatura e ter uma maior incidência de ondas de calor (MASSON-DELMOTTE et al., 2021). Frente a essa realidade, relatório internacional (OCHA; IFRC; RCCC, 2022) publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2022 aponta a necessidade de ações para evitar que as ondas de calor extremas intensificadas pela crise climática se tornem recorrentes. Como os países mais pobres já experienciam aumentos desproporcionais da temperatura, é primordial apoiar as pessoas mais vulneráveis às ondas de calor, pois as previsões indicam o agravamento da situação nas próximas décadas, com ondas de calor excedendo os limites fisiológicos e sociais humanos.

Ao avaliar o impacto das mudanças climáticas em habitações unifamiliares a partir de cenários de prospecção de aquecimento global em Cuiabá-MT, Guarda, Durante e Callejas (2020) reportaram aumento de 5,75°C nas temperaturas médias e 15,40% de redução na UR para o cenário 2080 (2071-2100), cujas temperaturas médias anuais ultrapassaram 31°C e a UR atingiu valores inferiores a 67%. Neste contexto, Guarda et al. (2020) evidenciam o aumento do consumo dos aparelhos condicionadores de ar para garantir o conforto térmico nas edificações, todavia, estes aparelhos serão os principais responsáveis pelo consumo de energia elétrica.

Tais fatos demonstram os impactos das mudanças climáticas e mostram como o desempenho termoenergético das edificações está intimamente relacionado ao clima local, evidenciando, portanto, a necessidade de se considerar critérios e condicionantes ao projeto arquitetônico que contemplem a relação homem-natureza. Segundo Gonçalves e Duarte (2006), são as exigências humanas, os usos, as condições climáticas e urbanas locais e as possibilidades construtivas que determinarão o grau de independência da edificação em relação aos sistemas ativos de climatização. Ambientes ocupados apresentam maiores temperatura e UR devido às

trocas de calor dos ocupantes, animais, plantas e equipamentos, logo, cabe à arquitetura oferecer condições térmicas compatíveis ao conforto térmico humano no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas externas (FROTA; SCHIFFER, 2001).

O conceito de projeto bioclimático abordado por Olgyay (1963) busca relacionar as características climáticas locais com a arquitetura, por meio da adoção de estratégias passivas específicas para cada região, a fim de minimizar o consumo energético e o impacto ambiental, melhorar o desempenho das edificações e fornecer um ambiente confortável para os usuários. Assim, o envelope da construção deve ser encarado como uma membrana reguladora entre o ambiente interno e o externo (CORBELLA; CORNER, 2011), atuando como um mecanismo de controle das variáveis do meio através da envoltória, do entorno e do aproveitamento dos elementos e fatores do clima para melhor controle da ventilação natural e da radiação solar (FROTA; SCHIFFER, 2001; CUNHA, 2006; CORBELLA; CORNER, 2011; ROMERO, 2013).

Em 1999, Roriz, Ghisi e Lamberts publicaram uma proposta de norma técnica que definia requisitos mínimos aceitáveis de desempenho térmico para habitações de interesse social, a partir da divisão do território brasileiro em 8 zonas bioclimáticas (ZBs) (RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999). A proposta deu origem à ABNT NBR 15220-3 Desempenho térmico de edificações. Parte 3 Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005). Além do Zoneamento Bioclimático Brasileiro, a normativa traz diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, visando a adequação das edificações ao clima local e a melhoria do conforto térmico. Atualmente a norma passa por revisão, devido à imprecisão na caracterização climática das cidades.

Callejas et al. (2021) apontam que um projeto sensível ao clima pode contribuir para o aumento da capacidade de adaptação através de um melhor desempenho energético da edificação. Para os autores, o uso de estratégias construtivas tradicionais na envoltória e a geometria e a orientação do edifício podem ser insuficientes para promover desempenho termoenergético adequado. Assim, a adoção de estratégias bioclimáticas passivas torna-se um importante instrumento para a obtenção do conforto térmico (NICO-RODRIGUES et al., 2015). Destaca-se ainda que a alteração das condições ambientais externas devido ao aquecimento global influencia na qualidade do ambiente interno (CASAGRANDE; ALVAREZ, 2013), logo, deve-se manter o ambiente interno sob condições capazes de fornecer conforto e segurança aos usuários (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Em locais com temperaturas elevadas, como o MT, tal questão tem maior relevância e requer medidas efetivas para reduzir a carga de resfriamento das edificações, já que um maior uso de equipamentos condicionadores de ar aumenta significativamente o consumo de energia (NICO-RODRIGUES et al., 2015). Tendo em mente que grande parte das edificações projetadas no MT não reflete a realidade climática local e o fato do Estado possuir cidades em diferentes ZBs (3, 5, 6, 7 e 8) (ABNT, 2005), torna-se primordial o estudo do clima local e das estratégias bioclimáticas passivas mais apropriadas para cada município, a fim de estabelecer diretrizes projetuais e indicar estratégias construtivas visando a adequação das edificações ao clima.

2 OBJETIVO

Identificar as estratégias bioclimáticas e propor diretrizes projetuais para adaptabilidade das edificações ao clima para três cidades do Mato Grosso, sendo elas Água Boa,

Campo Verde e Comodoro, a partir da caracterização climática de cada município e do estudo das diretrizes construtivas indicadas na norma ABNT NBR 15220-3.

3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos adotados foram divididos em quatro etapas, compreendendo: seleção da amostra, com definição das cidades a serem analisadas; obtenção, tratamento e análise dos dados climáticos de cada município; levantamento das estratégias bioclimáticas e; síntese dos dados e definição das diretrizes projetuais conforme o clima local.

3.1 Seleção da amostra

Para a seleção das cidades a serem analisadas, verificou-se a disponibilidade de dados a partir de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e quais cidades possuem estações automáticas (que coletam dados horários) operantes. Elaborou-se uma planilha no Excel com as cidades e suas respectivas ZBs, que foram identificadas por meio do *software* ZBBR (UFSCAR, 2004). Na sequência, agrupou-se as cidades em função das ZBs e analisou-se suas localizações geográficas, tipos de clima e altitudes, dando preferência àquelas que não apresentavam, até o início da pesquisa, estudos voltados para a bioclimatologia e a recomendação de diretrizes construtivas de acordo com o clima local.

3.2 Análise climática

A análise climática das cidades selecionadas ocorreu, primeiramente, com base na classificação climática de Köppen-Geiger. Na sequência, fez-se o levantamento dos dados meteorológicos de cada município no formato EPW (*EnergyPlus Weather Data*), por meio de arquivos climáticos *Typical Meteorological Year* (Ano Meteorológico Típico - TMY) criados por Lawrie e Crawley (2022) a partir de dados climáticos do INMET, disponíveis no repositório de dados climáticos para simulação de desempenho de edifícios Climate.OneBuilding. Os arquivos EPW foram inseridos na ferramenta *online* CBE Clima Tool (BETTI et al., 2022) desenvolvida pelo *Center for Built Environment* (CBE) da *University of California*, em Berkeley, para a visualização e análise do clima por meio de gráficos de temperatura de bulbo seco (TBS) e UR, do diagrama de rosa dos ventos e dados de estresse térmico.

3.3 Levantamento das estratégias bioclimáticas

Fez-se a plotagem das cartas psicrométricas com o auxílio do *software* gratuito Climate Consultant 6.0 (UCLA ENERGY DESIGN TOOLS GROUP, 2021), pela leitura dos arquivos EPW. Para tanto, selecionou-se a tipologia “Residencial” e o Modelo de Conforto Adaptativo ASHRAE Standard 55-2010, que contempla ambientes naturalmente ventilados onde os ocupantes têm autonomia para abrir e fechar as janelas e suas respostas térmicas irão depender, em parte, do

clima externo. O Modelo assume ainda que os ocupantes adaptam suas vestimentas às condições de conforto e realizam tarefas cuja energia produzida corresponde a 1.0-1.3 met¹.

Ao gerar as cartas psicrométricas, fez-se necessária a adição do Modelo ASHRAE Standard 55 como parâmetro de análise para obter o relatório com as porcentagens de horas do ano para cada zona definida e a indicação das estratégias mais recomendadas de acordo com o clima. Posteriormente, verificou-se a influência dessas estratégias na porcentagem de horas de conforto térmico por meio de classificação supervisionada, que corresponde à seleção manual de estratégias dentre àquelas apontadas como mais relevantes pelo *software*.

Fez-se ainda o levantamento das diretrizes construtivas recomendadas pela ABNT 15220-3 (ABNT, 2005) para as ZBs das cidades analisadas.

3.4 Síntese dos dados e definição das diretrizes projetuais

Após a análise dos dados climáticos e das cartas psicrométricas e diretrizes construtivas recomendadas pelo Climate Consultant e pela ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005), identificou-se as estratégias bioclimáticas prioritárias a serem adotadas para cada cidade e criou-se um quadro com as diretrizes construtivas mais indicadas, tendo como base as diretrizes de projeto propostas pelo *software*.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização climática

Para o presente estudo selecionou-se as cidades de Água Boa, Campo Verde e Comodoro, sendo as duas primeiras pertencentes à ZB 6 e a última à ZB 5. Água Boa situa-se na porção Nordeste do MT (14°05'S; 52°16'W), em uma formação conhecida como Serra do Roncador, a 430 m de altitude. Com 7.544,308 Km² de território, engloba os biomas Cerrado e Amazônia. Campo Verde localiza-se no Sudoeste do Estado, abrangendo o bioma Cerrado. A cidade possui uma extensão territorial de 4.770,631 km² e está 736 m acima do nível do mar. Já Comodoro possui 21.485,018 km² de território e situa-se no Norte Mato-grossense, a 600 m de altitude, compreendendo os biomas Cerrado e Amazônia (Figura 1) (IBGE, ©2023).

¹ met é a unidade de metabolismo e representa o valor de metabolismo de uma pessoa em repouso, em que a energia produzida por unidade de área é de 1 met e equivalente a 58W/m² (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA; 2014).

Figura 1 - Localização das cidades analisadas.



Fonte: Os autores, adaptado de Abreu, 2006.

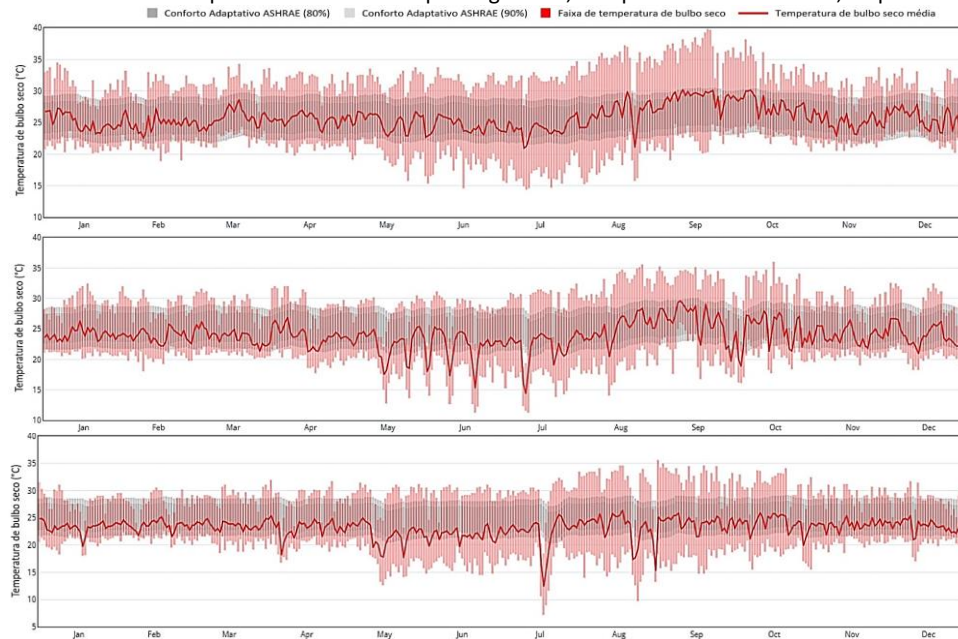
Água Boa e Campo Verde possuem clima Aw, tropical com inverno seco, com duas estações bem definidas (verão chuvoso e inverno seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C e as precipitações são superiores a 750 mm anuais, podendo atingir 1.800 mm. Comodoro, por sua vez, encontra-se no clima Am, tropical úmido de monção, que além de apresentar temperatura média do mês mais frio superior a 18°C possui estação seca de curta duração, que é compensada pelos altos índices de precipitação (KOTTEK et al., 2006).

Tais características são observadas nos gráficos de TBS e UR gerados na CBE Clima Tool. Os gráficos de temperatura fornecem as TBSs mínimas e máximas, a TBS média anual e duas faixas de conforto calculadas conforme o Modelo Adaptativo da ASHRAE (80 e 90%). Em Água Boa, a TBS média anual é de 25,73°C, com média máxima de 28,87°C em setembro e média mínima de 24,05°C em julho. A TBS média diária ultrapassa os limites mínimos da faixa de conforto em julho e agosto, mas se mantém próxima a 21°C. Apenas em agosto a TBS média diária excede os limites máximos dessa faixa, atingindo cerca de 30°C. As TBSs mais altas são verificadas no período de seca, de agosto a outubro, e as mais baixas no inverno (Figura 2).

Em Campo Verde, de modo geral, as TBSs são mais baixas que as de Água Boa, contudo, há maior oscilação nesse registro. A TBS média anual é de 23,89°C, com média máxima de 26,37°C em setembro e média mínima de 22,14°C em julho. A TBS média diária extrapola os limites mínimos da faixa de conforto em vários momentos, chegando a 14,33°C em julho. As TBSs mais altas também ocorrem no período seco e a partir de maio há diminuição no registro, com picos que ultrapassam a faixa mínima de conforto (Figura 2).

Comodoro tem TBS média anual de 23,21°C, com média máxima de 24,19°C em setembro e média mínima de 21,08°C em junho. As TBSs médias são muito próximas dos limites mínimos de conforto e sofrem um ligeiro aumento de agosto a outubro, indicando que os reflexos da estação seca são quase imperceptíveis nas temperaturas. De janeiro a julho as TBSs médias são similares às de Campo Verde e, apesar dos picos abaixo da faixa de conforto, é a cidade que apresenta uma maior estabilidade no registro das TBSs (Figura 2).

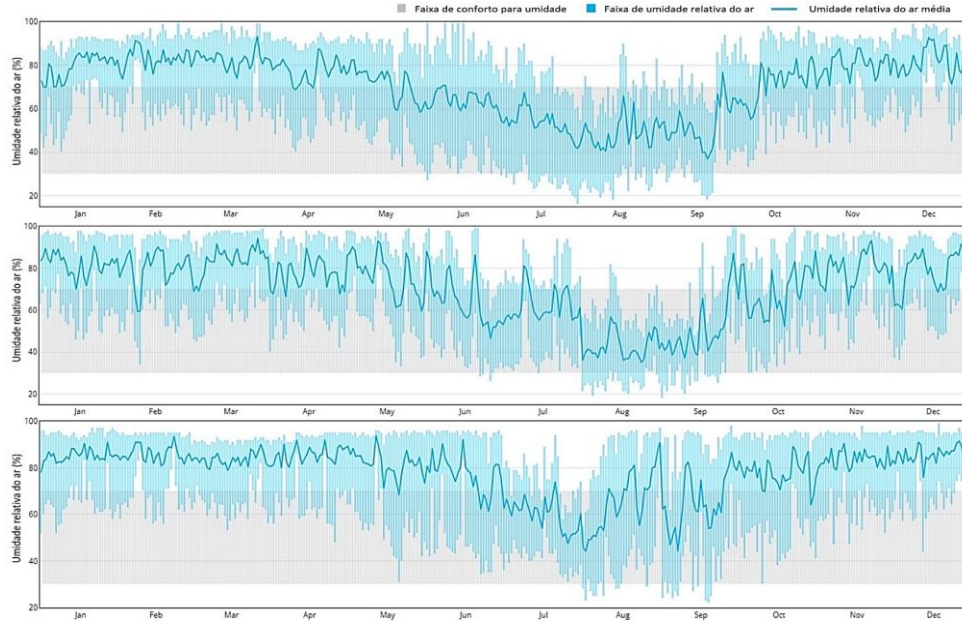
Figura 2 - Gráficos de temperatura média anual para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, respectivamente.



Fonte: Os autores, 2023.

Os gráficos de UR também contam com faixa de conforto de umidade sobreposta, cujo intervalo entre 30-70% é tido como confortável. A UR média anual em Água Boa é de 70,32%, com máxima de 83,11% em fevereiro e mínima de 48,5% em agosto. Apenas de maio a outubro a UR se mantém na faixa de conforto e as menores médias diárias ocorrem entre julho e setembro, período com menor índice de precipitação (Figura 3). Campo Verde tem UR média anual de 70,42%, com máxima de 83,48% em março e mínima de 42,65% em agosto. Apesar dos registros semelhantes aos de Água Boa, há maior oscilação nas médias diárias (Figura 3). Já Comodoro tem um perfil distinto em relação à UR, que é característico do clima Am, com estação seca de curta duração e altos índices de precipitação. A UR média anual é de 77,99%, com máxima de 85,96% em fevereiro e mínima de 60,11% em julho. Verifica-se as menores médias mensais de julho a setembro, mas ainda assim são superiores a 60% (Figura 3).

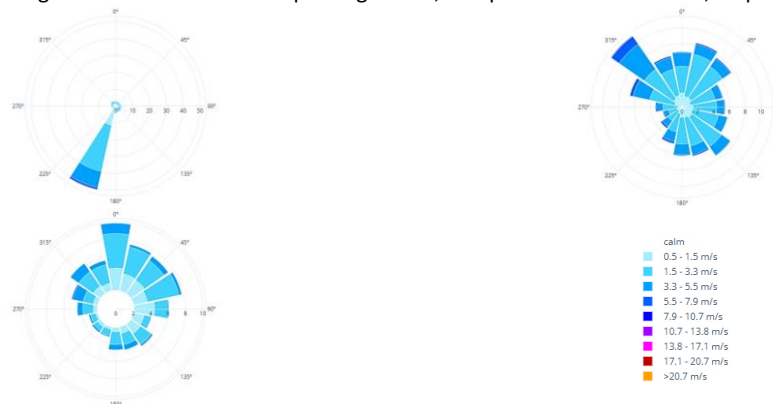
Figura 3 - Gráficos de umidade relativa média anual para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, respectivamente.



Fonte: Os autores, 2023.

Observa-se pelo diagrama de rosa dos ventos anual de Água Boa que os ventos dominantes sopram a Sudoeste e esta é praticamente a única direção dos ventos. Em quase 28% do tempo os ventos sopram com velocidade entre 1,5-3,3 m/s. Em Campo Verde, os ventos dominantes sopram a Noroeste com velocidade entre 1,5-3,3 m/s em 4,53% do tempo, mas há ventos consideráveis vindos do Nordeste e do Sudoeste. Assim como Campo Verde, a cidade de Comodoro apresenta ventos soprando de várias direções. Os ventos dominantes sopram a Norte e em 3,95% do tempo possuem velocidade entre 1,5-3,3 m/s (Figura 4).

Figura 4 - Diagrama de rosa dos ventos para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, respectivamente.



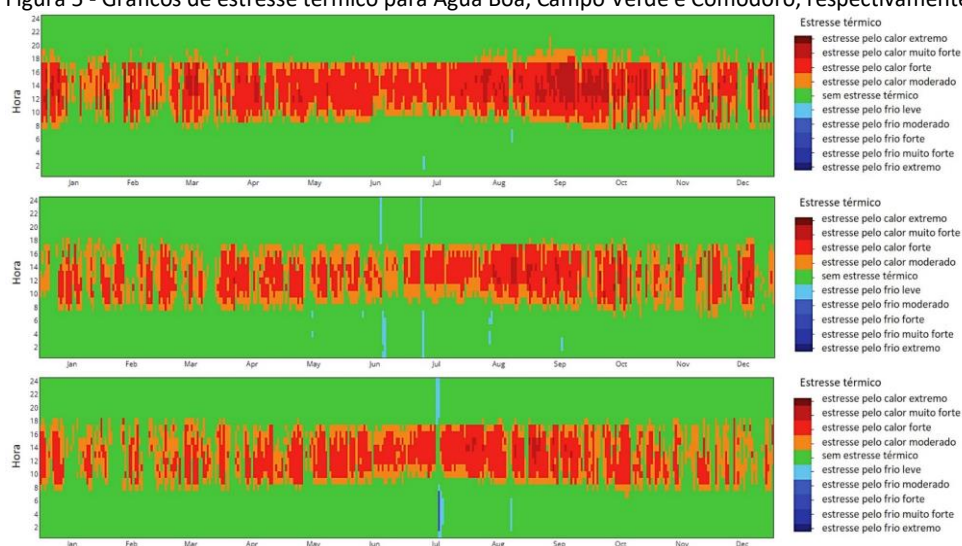
Fonte: Os autores, 2023.

Também obteve-se gráficos de estresse térmico baseados no *Universal Thermal Climate Index* (Índice Termoclimático Universal - UTCI), que avalia a resposta fisiológica do corpo humano às condições térmicas de ambientes externos (Figura 5) (ROSSI; KRÜGER; BRÖDE, 2012). Para o cálculo do UTCI, a CBE Clima Tool considera a TBS, a temperatura radiante média, a velocidade do vento, a UR, a vestimenta e o metabolismo e classifica os valores de UTCI de

acordo com o grau de estresse térmico, seja pelo calor ou pelo frio. Para o presente estudo, analisou-se o conforto térmico externo com base na presença de sol e vento.

Em Água Boa, os indivíduos poderão sentir estresse térmico extremo pelo calor principalmente em setembro e outubro. O estresse pelo calor moderado ocorre durante todo o ano, mas tende a ser maior em março, outubro e dezembro, podendo durar até às 20h. A ausência de estresse térmico é sentida, de modo geral, durante a noite (após às 18h) e início da manhã (até às 8h), e pode ser sentida fora desse horário em novembro (Figura 5). Em Campo Verde quase não se observa o estresse térmico extremo pelo calor, que apresenta índices menores que 3% em agosto, setembro e outubro. O leve desconforto pelo frio pode vir a ser percebido no inverno, durante a noite e início da manhã. A faixa sem estresse térmico em Campo Verde é maior que em Água Boa e pode vir a ser sentida durante o dia ao longo do ano, exceto de julho a setembro (Figura 5). O gráfico de Comodoro tem um perfil similar ao de Campo Verde, com praticamente nenhuma incidência de estresse térmico extremo pelo calor e com uma ampla faixa com ausência de estresse térmico. Tem-se ainda que a ausência de estresse térmico durante o dia é mais recorrente. Em julho pode vir a ocorrer estresse pelo frio moderado durante a madrugada e início da manhã (Figura 5).

Figura 5 - Gráficos de estresse térmico para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, respectivamente.



Fonte: Os autores, 2023.

Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2014), os limites para prover o conforto térmico em ambientes internos incluem TBSs entre 18°C e 29°C e URs entre 20% e 80%. Para TBS interna próxima a 18°C, aconselha-se evitar o impacto do vento, que pode gerar desconforto térmico pelo frio. Quando a TBS for próxima a 29°C, deve-se controlar a incidência da radiação solar direta e o ganho excessivo de calor. Se a TBS interna e a UR excederem os limites definidos, a ventilação pode contribuir para melhorar a sensação térmica. Ressalta-se apenas que a ventilação deixa de ser desejável se a TBS externa ultrapassar 32°C, pois contribuirá para o aumento do ganho de calor no interior das edificações.

Nas três cidades analisadas as TBSs diárias são superiores a 32°C no período seco e os maiores registros ocorrem em Água Boa. Nesse período, o resfriamento passivo interno pela ventilação natural é indicado somente se forem adotadas estratégias complementares para

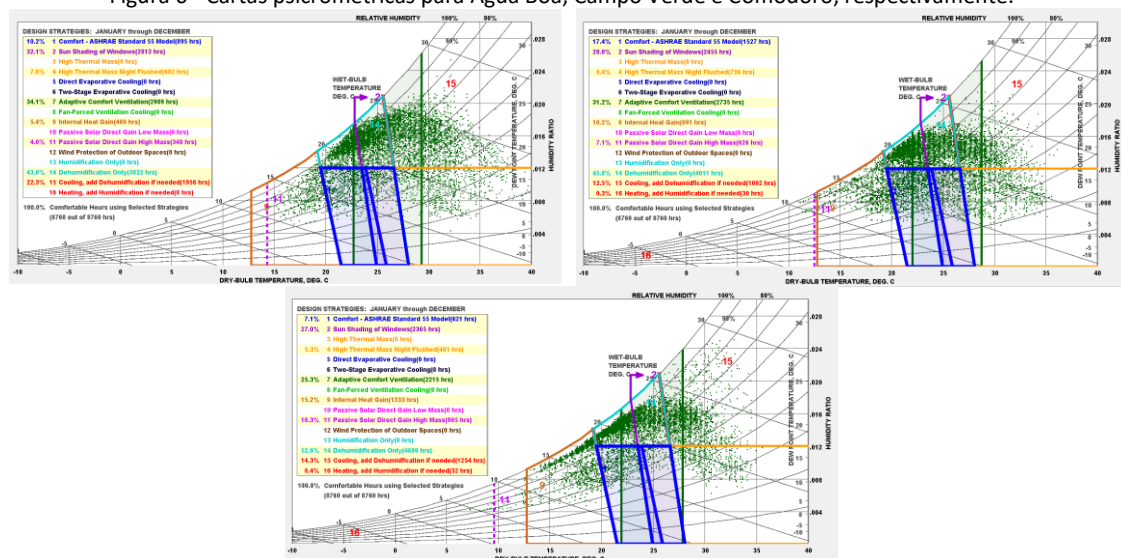
diminuir a TBS externa. Entre as três cidades, Água Boa possui a maior porcentagem de TBSs diárias acima de 29°C, podendo levar ao desconforto térmico pelo calor (Figuras 2 e 5). Já Comodoro possui o maior registro de TBSs diárias inferiores a 18°C e ventos que sopram de diferentes direções. Tal fato deve ser considerado durante o planejamento das edificações, para que a ventilação natural não provoque desconforto pelo frio (Figuras 2, 4 e 5). Apesar disso, Comodoro e Campo Verde possuem a maior porcentagem de TBSs diárias entre 18°C e 29°C, em que não há estresse térmico (Figuras 2 e 5).

Cabe ainda destacar que Água Boa e Campo Verde pertencem à ZB 6 e possuem clima Aw, todavia, as TBSs médias mensais em alguns períodos do ano e a porcentagem de registros de TBSs nos limites da zona de conforto térmico e desconforto pelo calor e pelo frio de Campo Verde se assemelham aos Comodoro, que está localizada na ZB 5 e possui clima Am.

4.2 Estratégias bioclimáticas

Ao plotar as cartas psicrométricas obteve-se a porcentagem e o número de horas em que o conforto térmico será alcançado mediante a adoção de estratégias passivas de ventilação. Ventilar naturalmente os ambientes fornecerá uma taxa de conforto de 34% (2.989 horas das 8.760 horas do ano) em Água Boa, 31% (2.735 horas) em Campo Verde e 25% (2.215 horas) em Comodoro, sendo a ventilação natural necessária em 34,1%, 31,2% e 25,3% do tempo, respectivamente. Ao adicionar o Modelo ASHRAE Standard 55 como parâmetro de análise junto ao Modelo Adaptativo, o Climate Consultant indica automaticamente quais estratégias mais relevantes a serem implementadas para ampliar a taxa de conforto para 100% (Figura 6).

Figura 6 - Cartas psicrométricas para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, respectivamente.



Fonte: Os autores, 2023.

A indicação de estratégias passivas complementares não altera as porcentagens da estratégia de ventilação natural. O *software* também sugere duas estratégias como facultativas, sendo elas resfriamento e desumidificação e aquecimento e umidificação. A Tabela 1 contém as estratégias bioclimáticas mais relevantes sugeridas pelo Climate Consultant para cada cidade:

Tabela 1 - Estratégias bioclimáticas mais relevantes e porcentagem de horas por ano para as cidades analisadas.

Estratégias Bioclimáticas	Porcentagem de horas no ano (%)		
	Água Boa (ZB6)	Campo Verde (ZB6)	Comodoro (ZB5)
Conforto térmico	10,2	17,4	7,1
Sombreamento das aberturas	32,1	28,0	27,0
Massa térmica para resfriamento noturno	7,8	8,4	5,3
Ventilação natural	34,1	31,2	25,3
Aquecimento solar passivo	5,4	10,2	15,2
Massa térmica de aquecimento	4,0	7,1	10,3
Somente desumidificação	43,6	45,8	52,6
Resfriamento e desumidificação, se necessário	22,3	12,5	14,3
Aquecimento e umidificação, se necessário	-	0,3	0,4

Fonte: Os autores, adaptado de UCLA Energy Design Tools Group, 2021.

A ABNT 15220-3 (ABNT, 2005) recomenda prover o conforto térmico pela ventilação cruzada no verão para a ZB 5 e para a ZB 6 a ventilação natural deve ser seletiva, para não elevar a carga térmica interna. As altas temperaturas demandam ainda resfriamento evaporativo e paredes externas de alta massa térmica, para armazenar o calor durante o dia e liberá-lo à noite, quando a temperatura externa for menor. No inverno, para ambas as ZBs, paredes internas de alta massa térmica manterão as temperaturas internas maiores que as externas (Quadro 1).

Quadro 1 - Diretrizes construtivas indicadas pela ABNT NBR 15220-3 para as zonas bioclimáticas 5 e 6.

Cidade (ZB)	Estratégias					
	Aberturas	Sombreamento	Paredes	Cobertura	Verão	Inverno
Água Boa (ZB 6)	Médias (15% < A < 25%)	Sombrear	Pesadas	Leves isoladas	Resfriamento evaporativo	Paredes internas pesadas
Campo Verde (ZB 6)					Massa térmica para resfriamento	
Comodoro (ZB 5)			Leve refletora		Ventilação cruzada	

*A: Área do piso, em porcentagem (%).

Fonte: Os autores, adaptado de ABNT, 2005.

Tanto a norma como o Climate Consultant sugerem incorporar massa térmica de aquecimento no inverno em Água Boa, contudo, o *software* também prevê o aquecimento solar passivo. Classificação supervisionada atendendo o descrito na norma (adotando apenas a massa térmica de aquecimento, sem o aquecimento solar passivo), indicou redução na taxa de conforto térmico de 100% (8.760 horas) para 97,7% (8.562 horas). A norma não indica o uso de aparelhos condicionadores de ar no verão, mas, apesar de ser considerada facultativa pelo *software*, essa estratégia ativa pode proporcionar conforto térmico em mais de 20% do tempo (Figura 6; Tabela 1). Isso pode ser corroborado pelas TBSs diárias do município, que atingem cerca de 35°C em janeiro e 40°C no período seco (Figura 2). Ao verificar a taxa de conforto sem massa térmica de resfriamento, condição de grande parte das edificações no MT, o número de horas em que o condicionamento ativo é requerido aumenta. A ausência de estratégias de desumidificação reduz o conforto térmico para 75,8% (6.637 horas), visto que a UR média é inferior a 70% apenas no período seco (Figura 3). Classificação supervisionada somente com o previsto na norma para o verão e o inverno (Quadro 1) fornece taxa de conforto térmico de 75,4% (6.606 horas).


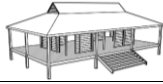

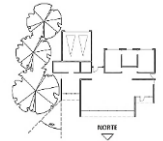
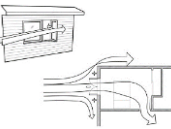

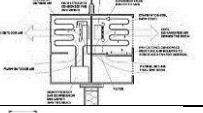
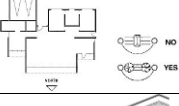
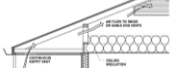
Assim como Água Boa, Campo Verde requer estratégias de desumidificação em mais de 40% do tempo (Figura 6; Tabela 1). As TBSs diárias próximas a 35°C no período seco (Figura 2) comprometem o uso da ventilação natural no resfriamento interno sem que seja adotada estratégia passiva complementar para reduzir a temperatura do ar externo antes deste adentrar na edificação. Classificação supervisionada indicou que não condicionar ativamente o ambiente nos meses mais quentes, como sugerido pela norma, reduz a taxa de conforto para 87,5% (7.668 horas). Por outro lado, o *software* recomenda aquecimento solar passivo no inverno em 10,2% (891 horas) do tempo para manter o conforto (Figura 6; Tabela 1). Classificação supervisionada sem essa estratégia mostrou que a taxa de 100% de conforto permanecerá inalterada, mas haverá maior necessidade de aquecer ativamente o ambiente. Tal fato pode ser comprovado pelas TBSs diárias mínimas, que atingem de 10°C a 15°C entre maio e julho (Figura 2).

Comodoro tem os maiores índices de UR ao longo do ano, com médias mensais mínimas superiores a 60% (Figura 3). O Climate Consultant prevê a desumidificação em mais de 50% do tempo (Figura 6; Tabela 1) e a norma recomenda a ventilação cruzada no verão (Quadro 1). Em classificação supervisionada tem-se que a falta de desumidificação reduz a taxa de conforto para 68% (5.960 horas). A massa térmica de resfriamento não é indicada pela norma, mas o *software* aponta sua necessidade em 5,3% (461 horas) do tempo, logo, constatou-se que a ausência da estratégia eleva o uso de aparelhos de ar condicionado para 19,5% (1.705 horas). Para o inverno, a norma sugere massa térmica de aquecimento (Quadro 1) e o *software* indica ainda o aquecimento solar passivo em 15,2% (1.333 horas) do tempo (Figura 6; Tabela 1). Ao verificar a influência dessa estratégia na taxa de conforto pela classificação supervisionada, tem-se que a falta de aquecimento solar passivo eleva a necessidade de aquecimento ativo para 7,1% (620 horas). Classificação supervisionada considerando apenas o descrito na norma (Quadro 1) para o verão e o inverno fornece uma taxa de conforto de 73,5% (6.435 horas). Ao adicionar o aquecimento solar passivo essa taxa aumenta para 80,3% (7.031 horas).

4.3 Diretrizes projetuais

Com base na análise dos dados obtidos, elaborou-se um quadro com as diretrizes construtivas mais indicadas para Água Boa, Campo Verde e Comodoro, visando o conforto térmico dos usuários e um melhor desempenho das edificações (Quadro 2). A cor cinza refere-se à adoção da diretriz e a cor branca indica que a mesma não é necessária para a cidade em questão. Tais diretrizes baseiam-se nas diretrizes de projeto sugeridas pelo Climate Consultant.

Quadro 2 - Diretrizes projetuais recomendadas para Água Boa (AB), Campo Verde (CV) e Comodoro (CD).

Diretriz Projetual	Exemplo	Cidades		
		AB	CV	CD
Em climas quentes, varandas e pátios podem auxiliar no resfriamento passivo por meio de ventilação				
Em climas quentes e úmidos recomenda-se construções leves, com paredes operáveis/móveis e varandas externas sombreadas, elevadas acima do solo				
A edificação deve ser alongada no sentido Leste-Oeste e com cores claras na cobertura. É preciso sombrear as faces Leste e Oeste, todas as aberturas envidraçadas e os espaços ao ar livre				
Em climas quentes e úmidos indica-se tetos altos e janelas altas operáveis protegidas por marquises, varandas ou brises. Dispositivos de proteção bloqueiam a radiação solar direta indesejada nos meses mais quentes, reduzindo ou eliminando o uso de ar condicionado				
Use vegetação, especialmente no oeste, para minimizar o ganho de calor. As árvores e a vegetação sombreiam edifícios e superfícies, enquanto a evapotranspiração das folhas reduz a temperatura do ar próximo. Recomenda-se o plantio de árvores nos lados leste, oeste, nordeste e noroeste				
A ventilação natural pode reduzir ou eliminar o uso de ar condicionado se as janelas forem bem sombreadas e perpendiculares aos ventos dominantes. Para ventilação cruzada, as aberturas de saída devem estar localizadas no lado oposto, com igual metragem ou maiores que as aberturas de entrada				
Para este clima, o ar condicionado será sempre necessário, mas pode ser reduzido significativamente se o planejamento do edifício minimizar o sobreaquecimento				
Deve-se priorizar o uso de equipamentos de ar condicionado de alta eficiência para obter uma boa relação custo-benefício				
Para aquecimento solar passivo, a maior parte da área envidraçada deve estar voltada para o Norte para maximizar a exposição ao sol no inverno, mas deve-se prever o sombreamento total no verão				
Em climas úmidos, coberturas bem ventiladas com telhados inclinados ajudam a repelir a chuva e podem ser ampliadas para proteger entradas, varandas e áreas de trabalho externas				

Fonte: Os autores, adaptado e traduzido de UCLA Energy Design Tools Group, 2021.

5 CONCLUSÃO

A análise climática das três cidades selecionadas para o estudo mostrou que, apesar de Água Boa e Campo Verde pertencerem à ZB 6 e terem clima Aw, as TBS médias mensais e o nível de estresse térmico em Campo Verde se assemelham aos de Comodoro, localizada na ZB 5 e com clima Am. Água Boa é o município com as TBS diárias mais altas, que chegam a 40°C no período seco, enquanto esse registro é de 35°C em Campo Verde e Comodoro.

Pelas cartas psicrométricas tem-se que contar apenas com estratégias de ventilação natural para prover o conforto térmico interno é insuficiente, já que a porcentagem de horas de desconforto é de 66% para Água Boa, 69% para Campo Verde e 75% para Comodoro. Assim, o estudo das estratégias bioclimáticas mais relevantes apontadas pelo Climate Consultant, aliado

às classificações supervisionadas e recomendações da ABNT NBR 15220-3, permitiu elencar as diretrizes projetuais mais indicadas para cada cidade, para aumentar a porcentagem de horas de conforto térmico por meio de estratégias passivas de condicionamento.

Recomenda-se, para as três cidades, sombrear as aberturas nos meses mais quentes; uso de vegetação nas faces mais expostas à radiação solar e como elemento de sombreamento; aberturas perpendiculares aos ventos dominantes e que permitam ventilação cruzada, para assistir no resfriamento passivo interno e; telhados inclinados e com beirais proeminentes para repelir a chuva e sombrear. Para Água Boa e Campo Verde indica-se materiais construtivos de alta inércia térmica para fornecer conforto térmico no verão, contudo, em Campo Verde e Comodoro deve-se prever aberturas voltadas para o Norte para exposição ao sol nos meses mais frios para elevar o ganho de calor, mas que sejam totalmente sombreadas no verão. Como em Comodoro as TBSs ultrapassam os limites mínimos da faixa de conforto em alguns meses, sugere-se orientar as fachadas maiores no sentido Leste-Oeste para maximizar a exposição ao sol no inverno e sombrear as faces e aberturas Leste e Oeste para prover o conforto térmico no verão. Em Água Boa o uso de ar condicionado será necessário nos períodos mais quentes, mas seu uso pode ser minimizado com a adoção das estratégias passivas apontadas.

O tratamento dos dados climáticos de Água Boa, Campo Verde e Comodoro poderá auxiliar projetistas, pesquisadores, arquitetos e engenheiros dentre outros, na compreensão das condições ambientais dessas cidades. As diretrizes projetuais e os exemplos de aplicação facilitam a adoção de estratégias bioclimáticas visando edificações responsivas ao clima, com melhores condições de conforto interno e melhor desempenho termoenergético.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABREU, R. L. **Map of Mato Grosso state**. [2006]. 1 imagem, color. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MatoGrosso_MesoMicroMunicip.svg. Acesso em: 04 out. 2023.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v.22, n.6, p.711-728, 2013. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507

ASSAD, E. **Amazônia legal**: propostas para uma exploração agrícola sustentável (Relatório Completo). São Paulo: FGV/EESP, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BETTI, G.; TARTARINI, F.; NGUYEN, C.; SCHIAVON, S. **CBE Clima Tool**: a free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. Version: 0.8.10. Berkeley: UC Berkeley, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.04609>

CALLEJAS, I. J. A.; APOLONIO, R. M.; GUARDA, E. L. A. da; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. de A. C.; ROSETA, F.; AMARANTE, L. M. do. Bermed Earth-Sheltered Wall for Low-Income House: Thermal and Energy Measure to Face Climate Change in Tropical Region. *Applied Sciences*, Basel, v.11, n.1, p.420, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010420>

CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. de. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.13, n.4, p.173-187, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000400012>

CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual de arquitetura bioclimática tropical**: para redução do consumo energético. Rio de Janeiro: Revan, 2011.

COUTINHO, A. C. **Dinâmica das queimadas no estado do Mato Grosso e suas relações com as atividades antrópicas e a economia local**. 308 p. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental). Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.90.2005.tde-24042008-103602>

CUNHA, E. G. **Elementos de arquitetura de climatização natural**: método de projeto buscando a eficiência nas edificações. 2. ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2006.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81, 2006.

GUARDA, E. L. A. da; DOMINGOS, R. M. A.; JORGE, S. H. M.; DURANTE, L. C.; SANCHES, J. C. M.; LEÃO, M.; CALLEJAS, I. J. A. The influence of climate change on renewable energy systems designed to achieve zero energy buildings in the present: a case study in the Brazilian Savannah. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v.52, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101843>

GUARDA, E. L. A. da; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Impacto das mudanças climáticas no ambiente térmico interno de habitação unifamiliar em Cuiabá-MT. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 11, p. e020031, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8657188>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados do Brasil**. Rio de Janeiro, ©2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 set. 2023.

KOTTEK, M.; Grieser, J.; Beck, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, n.15, p.259-263, 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F; O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. São Paulo: PW Editores, 2014.

LAWRIE, L. K., CRAWLEY, D. B. **Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)**. Climate.OneBuilding, 2022. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org>. Acesso em: 05 abr. 2023.

MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.). **IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI:10.1017/9781009157896

MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOK, R.; CONNORS, S. L.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T. K.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (eds.). **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. DOI: 10.1017/9781009157940.003.

NICO-RODRIGUES, E. A.; ALVAREZ, C. E. de; SANTO, A. D.; PIDERIT, M. B. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.15, n.2, p.7-23, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000200011>

OLGYAY, V. **Design with climate**: bioclimatic approach to architectural regionalism. New Jersey: Princeton University Press, 1963.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo/Brasília: SciELO-Editora UnB, 2013.

RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 1999.

ROSSI, F. A.; KRÜGER, E. L.; BRÖDE, P. Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços abertos em Curitiba, PR, com o índice UTCI. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.12, p.41-59, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000100004>

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v.1, n.1, p.34-43, 2013.

UCLA ENERGY DESIGN TOOLS GROUP. **Climate Consultant 6.0**. Los Angeles: UCLA, 2021.

UNITED NATIONS OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS (OCHA); INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES (IFRC); RED CROSS RED CRESCENT CLIMATE CENTRE (RCCC). **Extreme heat: Preparing for the heat waves of the future**. New York: OCHA, 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCAR). **ZBBR**. São Carlos: UFSCAR, 2004.

ZAVATTINI, J. A. A importância dos estudos climáticos na região Centro-Oeste. In: ZAVATTINI, J. A. **As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul: estudo geográfico com vista à regionalização climática** [online]. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.