

Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Ciências Humanas - IH
Departamento de Geografia - GEA
Programa de Pós-Graduação em Geografia

CLIMA URBANO DE ÁGUAS CLARAS - DF: INFLUÊNCIA DA VERTICALIZAÇÃO SOBRE O CANAL TERMODINÂMICO

Thiago Almeida de Lima

Dissertação de Mestrado

Brasília/DF

2025

Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Ciências Humanas - IH
Departamento de Geografia - GEA
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Thiago Almeida de Lima

CLIMA URBANO DE ÁGUAS CLARAS - DF: INFLUÊNCIA DA VERTICALIZAÇÃO SOBRE O CANAL TERMODINÂMICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília (UnB) como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Rodrigues da Franca.

Brasília/DF

2025

Ao meu PAI
(in memoriam),

Tua força é o vento que dissipa as nuvens em mim e faz renascer o sol sobre o que persiste.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus guias espirituais pela luz, proteção e direção ao longo de todo este percurso. Em cada desafio, encontrei neles a serenidade necessária para seguir em frente e a força para transformar incertezas em aprendizado.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Rafael, pela acolhida generosa, pela paciência e pela confiança que depositou em mim. Sua orientação ultrapassou os limites da academia, revelando-se também um gesto de humanidade, compreensão e incentivo nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha família e ao meu meu pai, que mesmo em seus últimos dias continuou sendo fonte de inspiração e coragem. Sua força permanece viva em mim como guia e herança.

Agradeço ao Leandro pela presença constante e pela força nos momentos de fraqueza e ao Marcos pelo apoio prestado nos campos e pela força nos momentos de dificuldade.

Agradeço ao Carlos Guilherme pelo companheirismo, paciência e apoio inabalável durante toda esta jornada.

Sou grato aos amigos e colegas pela amizade, pela escuta e pelo incentivo que tornaram o caminho mais leve e significativo.

Aos meus alunos, que me ensinaram diariamente o valor da persistência. Entre o ensinar e o aprender, encontrei em cada um deles um motivo para continuar acreditando na educação e no poder transformador do conhecimento.

Agradeço à Universidade de Brasília, ao Departamento de Geografia e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pela oportunidade de aprendizado, pela formação sólida e pelo ambiente intelectual que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, deixo aqui minha mais sincera gratidão.

RESUMO

Os estudos climatológicos urbanos têm ganhado relevância crescente em virtude dos problemas socioambientais associados à rápida expansão urbana e à intensificação das mudanças climáticas. No contexto brasileiro, o adensamento populacional e a verticalização das cidades acentuam as desigualdades térmicas e a degradação ambiental, especialmente em regiões de clima tropical. Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto das características urbanísticas, com destaque para a verticalização e a morfologia dos cânions urbanos, na dinâmica climática noturna da Região Administrativa de Águas Claras, Distrito Federal. A pesquisa baseia-se na metodologia do Sistema Clima Urbano (S.C.U.), proposta por Monteiro, com enfoque no subsistema termodinâmico, e integra análises sinóticas, levantamentos de campo e dados empíricos obtidos por transectos móveis noturnos. Foram realizadas doze campanhas entre setembro e novembro de 2024, período que abrange a transição entre a estação seca e o início do regime úmido. Os resultados indicaram diferenças térmicas superiores a 4 °C entre áreas densamente verticalizadas e setores mais abertos e vegetados, confirmando o efeito da rugosidade urbana e da baixa ventilação na manutenção do calor durante a noite. Verificou-se também que a presença de vegetação, aliada a maior abertura do céu, favorece a dissipação térmica e o aumento da umidade relativa, contribuindo para o conforto ambiental. Conclui-se que a forma urbana exerce papel determinante na regulação do clima noturno, sendo essencial ao planejamento urbano a incorporação de estratégias baseadas em infraestrutura verde e ventilação natural.

Palavras-chave: Clima urbano. Verticalização. Conforto térmico. Águas Claras. Sistema Clima Urbano.

ABSTRACT

Urban climatological studies have gained increasing relevance due to the socio-environmental challenges resulting from rapid urban expansion and the intensification of climate change. In Brazil, population densification and vertical growth have heightened thermal disparities and environmental degradation, especially in tropical regions. This research aimed to assess the impact of urban characteristics—particularly verticalization and the morphology of urban canyons—on the nocturnal climatic dynamics of Águas Claras, Federal District. The study was based on the Urban Climate System (U.C.S.) methodology proposed by Monteiro, focusing on the thermodynamic subsystem, and combined synoptic analyses, field surveys, and empirical data collected through nocturnal mobile transects. Twelve field campaigns were carried out between September and November 2024, covering the transition from the dry season to the early rainy period. Results indicated thermal contrasts exceeding 4 °C between densely verticalized sectors and more open, vegetated areas, confirming the influence of urban roughness and low ventilation on nighttime heat retention. The presence of vegetation, together with higher sky view factors, favored heat dissipation and increased relative humidity, contributing to improved thermal comfort. The findings demonstrate that urban form plays a decisive role in regulating nocturnal climate, highlighting the need for urban planning strategies based on green infrastructure and natural ventilation to mitigate thermal discomfort and enhance urban resilience.

Keywords: Urban climate. Verticalization. Thermal comfort. Águas Claras. Urban Climate System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama básico do Sistema Clima Urbano ……24

Figura 2 - Mapa de localização da Área de Estudo……35

Figura 3 - Mapa de localização dos pontos……..…36

Figura 4 - Esquema FVC……49

Figura 5 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo I) - Águas Claras……....79

Figura 6 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo II) - Águas Claras……...83

Figura 7 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo III) - Águas Claras……..86

Figura 8 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo IV) - Águas Claras…….89

Figura 9 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo V) - Águas Claras……....92

Figura 10 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo VI) - Águas Claras……...96

Figura 11 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo VII) - Águas Claras……..99

Figura 12 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo VIII) - Águas Claras…..….102

Figura 13 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo IX) - Águas Claras…..……...105

Figura 14 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo X) - Águas Claras……..…108

Figura 15 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo XI) - Águas Claras…….111

Figura 16 - Mapa de Temperatura e Umidade (Campo XII) - Águas Claras…….....114

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1: ponto 1 …….....38

Foto 2: ponto 2 39

Foto 3: ponto 3 40

Foto 4: ponto 4 41

Foto 5: ponto 5 42

Foto 6: ponto 6 43

Foto 7: Transecto Móvel (arquivo pessoal).....46

Foto 8: Abrigo do transecto (arquivo pessoal).....46

Foto 9: Lente olho de peixe de 180°…….49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Sistema Clima Urbano: articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção…….26

Tabela 2-Análise de setembro……58

Tabela 3-Análise de outubro……...61

Tabela 4-Análise de Novembro……..64

Tabela 5 - Fator de Visão do Céu……..67

Tabela 6: Número e proporção de observações por ponto fixo……68

Tabela 7: Resumo estatístico da Temperatura por Ponto de Coleta……...69

Tabela 8: Resumo estatístico da Umidade por Ponto de Coleta……..70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição da Temperatura por Ponto de Coleta……..…70

Gráfico 2 - Distribuição da Umidade por Ponto de Coleta……71

Gráfico 3 - Correlação entre Temperatura e Umidade……..…71

Gráfico 4 - Correlação entre variáveis ambientais e climáticas……...…72

Gráfico 5 - Distribuição da Temperatura por Ponto de Coleta……75

Gráfico 6 - Média de Temperatura e Intervalo de Confiança (95%)……....76

Gráfico 7 - Média de Umidade e Intervalo de Confiança (95%) 77

Gráfico 8 - Mapa de Significância (Tukey HSD - Temperatura) 77

Gráfico 9 - Mapa de Significância (Tukey HSD - Umidade) 78

Gráfico 10 - Distribuição da Temperatura e Umidade por Ponto de Coleta 79

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ASAS - Alta Subtropical do Atlântico Sul

CAUMA - Conselho de Arquitetura e Meio Ambiente

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DF - Distrito Federal

FVC - Fator de Visão do Céu

H/W - Relação Altura/Largura

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - Inverse Distance Weighting (Ponderação pelo Inverso da Distância)

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

mPa - Massa Polar Atlântica

mTa - Massa Tropical Atlântica

PEOT - Plano Estrutural de Organização Territorial do DF

POUSO - Plano de Ocupação e Uso do Solo

QGIS - Quantum Geographic Information System

SCU - Sistema Clima Urbano

SIRGAS 2000 - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

UTC - Coordinated Universal Time (Tempo Universal Coordenado)

UR - Umidade Relativa

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Carta Sinótica (08/09/2024 – 00Z).....131
Anexo 2 – Carta Sinótica (08/09/2024 – 12Z).....132
Anexo 3 – Carta Sinótica (15/09/2024 – 00Z).....133
Anexo 4 – Carta Sinótica (15/09/2024 – 12Z).....134
Anexo 5 – Carta Sinótica (22/09/2024 – 00Z).....135
Anexo 6 – Carta Sinótica (22/09/2024 – 12Z).....136
Anexo 7 – Carta Sinótica (29/09/2024 – 00Z).....137
Anexo 8 – Carta Sinótica (29/09/2024 – 12Z).....138
Anexo 9 – Carta Sinótica (06/10/2024 – 00Z).....139
Anexo 10 – Carta Sinótica (06/10/2024 – 12Z).....140
Anexo 11 – Carta Sinótica (13/10/2024 – 00Z).....141
Anexo 12 – Carta Sinótica (13/10/2024 – 12Z).....142
Anexo 13 – Carta Sinótica (20/10/2024 – 00Z).....143
Anexo 14 – Carta Sinótica (20/10/2024 – 12Z).....144
Anexo 15 – Carta Sinótica (27/10/2024 - 00z).....145
Anexo 16 – Carta Sinótica (27/10/2024 - 12z).....146
Anexo 17 – Carta Sinótica (03/11/2024 - 00z).....147
Anexo 18 – Carta Sinótica (03/11/2024 - 12z).....148
Anexo 19 – Carta Sinótica (10/11/2024 - 00z).....149
Anexo 20 – Carta Sinótica (10/11/2024 - 12z).....150
Anexo 21 – Carta Sinótica (17/11/2024 - 00z).....151
Anexo 22 – Carta Sinótica (17/11/2024 - 12z).....152
Anexo 23 – Carta Sinótica (24/11/2024 - 00z).....153
Anexo 24 – Carta Sinótica (24/11/2024 - 12z).....154
Anexo 25 – GOES 16 - Canal 08 (02/09/2024).....155
Anexo 26 – GOES 16 - Canal 13 (02/09/2024).....156
Anexo 27 – GOES 16 - Canal 14 (02/09/2024).....157
Anexo 28 – GOES 16 - Canal 08 (09/09/2024).....158

Anexo 29 – GOES 16 - Canal 13 (09/09/2024).....159
Anexo 30 – GOES 16 - Canal 14 (09/09/2024).....160
Anexo 31 – GOES 16 - Canal 08 (16/09/2024).....161
Anexo 32 – GOES 16 - Canal 13 (16/09/2024).....162
Anexo 33 – GOES 16 - Canal 14 (16/09/2024).....163
Anexo 34 – GOES 16 - Canal 08 (23/09/2024).....164
Anexo 35 – GOES 16 - Canal 13 (23/09/2024).....165
Anexo 36 – GOES 16 - Canal 14 (23/09/2024).....166
Anexo 37 – GOES 16 - Canal 08 (30/09/2024).....167
Anexo 38 – GOES 16 - Canal 13 (30/09/2024).....168
Anexo 39 – GOES 16 - Canal 14 (30/09/2024).....169
Anexo 40 – GOES 16 - Canal 08 (14/10/2024).....170
Anexo 41 – GOES 16 - Canal 13 (14/10/2024).....171
Anexo 42 – GOES 16 - Canal 14 (14/10/2024).....172
Anexo 43 – GOES 16 - Canal 08 (21/10/2024).....173
Anexo 44 – GOES 16 - Canal 13 (21/10/2024).....174
Anexo 45 – GOES 16 - Canal 14 (21/10/2024).....175
Anexo 46 – GOES 16 - Canal 13 (28/10/2024).....176
Anexo 47 – GOES 16 - Canal 14 (28/10/2024).....177
Anexo 48 – GOES 16 - Canal 08 (28/10/2024).....178
Anexo 49 – GOES 16 - Canal 13 (04/11/2024).....179
Anexo 50 – GOES 16 - Canal 14 (04/11/2024).....180
Anexo 51 – GOES 16 - Canal 08 (04/11/2024).....181
Anexo 52 – GOES 16 - Canal 08 (11/11/2024).....182
Anexo 53 – GOES 16 - Canal 13 (11/11/2024).....183
Anexo 54 – GOES 16 - Canal 14 (11/11/2024).....184

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... 15
2. REFERENCIAL TEÓRICO..... 18
2.1. O Clima Urbano..... 18
2.2. O Sistema Clima Urbano..... 23
2.2.1. Subsistema Termodinâmico..... 29
2.3. Conforto Térmico..... 30
3. MATERIAIS E MÉTODOS..... 33
3.1. Área de Estudo - Águas Claras..... 33
3.1.1. Descrição dos pontos durante a medição..... 36
3.2. Transecto Móvel..... 45
3.3. Fator de Visão do Céu (FVC) e Relação H/W..... 47
3.4. Delineamento e Análises..... 49
3.5. Elaboração do Mapa de Distribuição Espacial a partir de Dados Pontuais..... 52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 54
4.1. Análise Sinótica..... 54
4.1.1. Análise de Setembro..... 54
4.1.2. Análise de Outubro..... 59
4.1.3. Análise de Novembro..... 62
4.3. Transecto Móvel..... 68
4.4. Integração Mapas-Sinótica..... 79
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 118
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 123

1. INTRODUÇÃO

O estudo do clima urbano tem adquirido importância crescente na Geografia contemporânea, sobretudo diante dos impactos ambientais e sociais decorrentes da urbanização acelerada. Monteiro (1976) já apontava que o clima das cidades, enquanto componente essencial da qualidade ambiental, constitui um dos principais indicadores das transformações impostas pelo desenvolvimento urbano.

O processo de expansão das cidades, particularmente em países tropicais e em desenvolvimento, tem sido acompanhado por desequilíbrios ambientais que comprometem o bem-estar da população e a sustentabilidade das áreas urbanizadas (Sant'Anna Neto, 2011; Araújo; Galvani, 2022).

O adensamento populacional e construtivo, aliado à falta de planejamento, altera o balanço energético local, intensifica a impermeabilização do solo e reduz a ventilação natural, favorecendo o acúmulo de calor e a concentração de poluentes (Lombardo, 1985; Zhou et al., 2019).

Esses processos não apenas modificam a paisagem urbana, mas também interferem diretamente na dinâmica atmosférica, ampliando os contrastes térmicos e os episódios de desconforto higrotérmico (Gonçalves, 2013). Em cidades tropicais, a variação entre áreas densamente edificadas e espaços vegetados origina microclimas contrastantes, em que diferenças de temperatura e umidade refletem a morfologia, os materiais de construção e o padrão de ocupação (Mendonça, 2015; Lemos; Júnior; Mendonça, 2022).

Monteiro e Mendonça (2003) defendem que o clima urbano deve ser interpretado como um sistema resultante da interação entre processos naturais e sociais. Essa perspectiva evidencia que a atmosfera urbana não é apenas reflexo das condições meteorológicas regionais, mas também um produto direto das formas de uso e ocupação do solo. Condições atmosféricas semelhantes podem gerar respostas desiguais em função das diferenças estruturais entre os espaços urbanos, o que reforça o caráter social do clima.

Estudos recentes, como os de Zhou et al. (2019) e Niamir e Pachauri (2023), ampliam esse entendimento ao demonstrar que os impactos climáticos se

distribuem de maneira desigual, atingindo com maior intensidade as populações que habitam áreas densas, carentes de vegetação e infraestrutura.

No contexto brasileiro, a urbanização acelerada e desordenada agrava a exposição das cidades a eventos climáticos extremos, como ondas de calor, estiagens e precipitações intensas (Prieto, 2022). Essa realidade tem estimulado o avanço de pesquisas que buscam compreender o comportamento microclimático das cidades e propor estratégias para mitigar os impactos da urbanização no clima local (Monteiro, 1976; Moreira et al., 2024).

Estudos como os de Nazareth, Freitas e Pisani (2021) e Brandão et al. (2023) demonstram que a verticalização, associada à redução da vegetação e à utilização de materiais de alta absorção térmica, intensifica o desconforto térmico e potencializa a formação de ilhas de calor. Pesquisas recentes também indicam que as desigualdades microclimáticas refletem diretamente desigualdades sociais (Moreira et al., 2023), reforçando a importância de análises que integrem variáveis urbanísticas e ambientais.

A Teoria do Sistema Clima Urbano (S.C.U.), proposta por Monteiro (1976), oferece uma estrutura conceitual que permite compreender o clima urbano como um sistema aberto, dinâmico e interdependente. Nesse modelo, a atmosfera atua como operadora do sistema, enquanto o tecido urbano e seus elementos sociais e físicos constituem o operando. O S.C.U. é dividido em três subsistemas: o termodinâmico, o físico-químico e o hidrometeórico, que se relacionam diretamente com o conforto térmico, a qualidade do ar e os fenômenos atmosféricos de impacto. Neste trabalho, o enfoque recai sobre o subsistema termodinâmico, por sua relevância na análise das trocas de energia entre o ambiente construído e a atmosfera.

Águas Claras, região administrativa do Distrito Federal, representa um exemplo expressivo das transformações microclimáticas associadas à verticalização intensa. Planejada inicialmente como um bairro de média densidade, a localidade passou, nas últimas décadas, por um processo acelerado de adensamento, com a construção de edifícios residenciais e comerciais de grande porte (Campanhoni, 2011; Serrano, 2010; Pereira; Cruz, 2021). Essa morfologia urbana, marcada pela predominância de superfícies impermeáveis, ruas estreitas e fachadas contínuas,

favorece a formação de cânions urbanos, reduzindo a ventilação e ampliando o acúmulo de calor noturno (Aguiar et al., 2017; Amorim, 2019). Tais condições resultam em ilhas de calor persistentes, cujos efeitos são mais perceptíveis durante o período noturno, quando a perda radiativa é limitada e o ar quente tende a ficar retido entre as edificações.

Diante desse contexto, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar o impacto da verticalização sobre a dinâmica climática noturna em Águas Claras, com ênfase na formação de ilhas de calor e nos efeitos associados aos cânions urbanos. Para atingir esse propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos: identificar e mapear, por meio de medições em campo e imagens orbitais, as áreas mais sujeitas à formação de ilhas de calor noturnas; analisar a variação termo-higrométrica entre os diferentes setores urbanos, correlacionando-a com características morfológicas como relação altura/largura (H/W) e cobertura vegetal; calcular o Fator de Visão do Céu (FVC) e avaliar sua influência sobre a ventilação e a dissipação de calor nos cânions urbanos; e discutir os resultados à luz do Sistema Clima Urbano, considerando a influência do uso do solo, da forma urbana e da rugosidade superficial na modulação térmica noturna.

A metodologia adotada combina técnicas de observação direta e análise espacial. Foram realizados transectos móveis noturnos, percorrendo os principais eixos de Águas Claras para o registro da temperatura e da umidade relativa do ar com o uso de termo-higrômetros digitais. As medições foram associadas a variáveis morfológicas obtidas por sensoriamento remoto e análise de campo, incluindo FVC, H/W e cobertura vegetal. Essa abordagem permitiu correlacionar os padrões térmicos observados com as características estruturais da cidade, contribuindo para uma leitura integrada do microclima urbano.

A dissertação está organizada em três capítulos principais. O primeiro apresenta o referencial teórico, discutindo o Sistema Clima Urbano e a literatura sobre verticalização e cânions urbanos. O segundo descreve a área de estudo e os procedimentos metodológicos empregados, detalhando os instrumentos, técnicas e critérios de análise. O terceiro reúne os resultados e a discussão, articulando os dados empíricos às condições sinóticas observadas e à literatura especializada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O Clima Urbano

O clima sempre foi um tema de grande interesse e debate, dada a sua influência direta e indireta no cotidiano das pessoas. Da segunda metade do século XX até a atualidade, os estudos sobre o clima urbano têm ganhado destaque na comunidade científica (Monteiro, 1976; Oke, 1984; Marengo, 2007; Gartland, 2010; Sant'Anna Neto, 2011; Lima, 2022; Zhang, 2024; Smith et al., 2025).

Esse aumento de interesse está fortemente ligado às preocupações com as mudanças climáticas globais e aos impactos diretos na população. Pesquisas recentes reforçam que compreender o clima urbano é essencial não apenas para a análise ambiental, mas também para a formulação de políticas públicas que enfrentem desigualdades e promovam a sustentabilidade nas cidades (Moreira, 2024).

De acordo com Gartland (2010), os primeiros estudos associados ao clima urbano remontam ao século XIX, durante a Primeira Revolução Industrial na Inglaterra, com Luke Howard. O meteorologista observou uma elevação significativa da temperatura na cidade em comparação com o campo e atribuiu esse aumento de calor à presença de pessoas e animais, além de diversas formas de aquecimento no inverno por combustão, à maior absorção de radiação solar pelas superfícies verticais urbanas e à falta de umidade disponível para evaporação.

O autor também destaca os trabalhos do meteorologista Émilien Renou, durante a segunda metade do século XIX, com descobertas semelhantes às de Howard em Paris, enquanto Wilhelm Schmidt encontrou condições equivalentes em Viena no início do século XX (Gartland, 2010).

Na contemporaneidade, os estudos climatológicos urbanos ganharam ainda mais força. Pascoalino e Marandola (2021) observa que a análise do clima urbano envolve a difícil tarefa de compreender a interação entre processos atmosféricos e a infraestrutura urbana, o que demanda abordagens interdisciplinares e metodologias inovadoras.

Essa complexidade se intensifica em função das diferentes escalas de análise, que precisam ser articuladas para revelar como os sistemas atmosféricos influenciam e são influenciados pelas cidades. Pesquisas recentes reforçam esse caráter interdisciplinar e apontam para uma crescente integração entre climatologia, urbanismo e justiça socioambiental (Huang et al., 2024; Lau et al., 2019).

Essa complexidade multiescalar exige, então, uma compreensão teórica capaz de distinguir os diferentes níveis de atuação dos processos climáticos. Nesse contexto, a definição e a hierarquização das escalas climáticas tornam-se fundamentais para interpretar a influência urbana sobre o ambiente (Ribeiro, 1993).

É necessário compreender a relação entre os agentes atmosféricos em múltiplas dimensões espaciais e temporais, o que amplia a precisão das análises locais. Oke (1984, p. 19), em seu clássico, aponta essa diferenciação em dois campos principais: a Meteorologia Urbana, voltada aos processos imediatos que modificam a atmosfera, e a Climatologia Urbana, que busca entender os estados atmosféricos recorrentes.

O autor ressalta que fenômenos contínuos e difusos exigem conceitos e terminologias precisas, aspecto que permanece atual e tem sido aprofundado em estudos recentes que incorporam tecnologias de monitoramento de alta resolução, sensores móveis e modelagem computacional (Middel et. al, 2022).

Para Ribeiro (1993) a análise climática exige uma abordagem meticulosa que leve em consideração tanto a extensão espacial quanto a duração temporal dos fenômenos atmosféricos. A compreensão e a definição de variáveis climáticas, como intensidade e frequência, dependem da adequação entre a escala de análise e as técnicas metodológicas empregadas.

O clima é resultado de um complexo conjunto de fenômenos que interagem no espaço e no tempo, e sua investigação requer uma escala taxonômica que facilite a análise e a apresentação dos dados (Ribeiro, 1993). A interdependência das trocas energéticas e materiais, massa e movimento entre a atmosfera e a superfície terrestre demanda uma metodologia capaz de capturar essas dinâmicas, garantindo uma representação precisa dos estados climáticos e suas variações (Landsberg, 1981; Ribeiro, 1993; Andrade 2005).

Ribeiro (2003), apresenta seis critérios orientadores do sistema taxonômico para o fenômeno climático:

> a) São consideradas escalas superiores aquelas mais próximas do nível planetário e escalas inferiores aquelas mais próximas dos indivíduos habitantes da superfície da Terra;
>
> b) As combinações de processos físicos interativos numa escala superior resultam em modificações sucessivas no comportamento da atmosfera nas escalas inferiores;
>
> c) As combinações particulares de processos físicos nas escalas inferiores possuem limitada repercussão nas escalas superiores;
>
> d) O grau de dependências da radiação extraterrestre na definição climática é maior nas escalas superiores, enquanto que a influência dos elementos da superfície, inclusive a ação antrópica, vai-se tornando mais pronunciada na medida em que se atingem as escalas inferiores;
>
> e) Quanto mais extenso o resultado de determinada combinação, maior será o tempo de sua permanência, sendo o inverso igualmente verdadeiro;
>
> f) A extensão de uma determinada combinação na atmosfera resulta num atributo tridimensional sendo, portanto, volumétrica a noção de extensão, em Climatologia, e tendo como limite superior o próprio limite da atmosfera terrestre.

Ribeiro (2003) considera três níveis interativos principais que fundamentam uma proposta taxonômica: o nível macroclimático, que envolve a interação entre a radiação solar, a curvatura da Terra e seus movimentos de rotação e translação, abrangendo grandes áreas e movimentos atmosféricos em larga escala; o nível mesoclimático, que examina a interação entre a energia disponível e as características do meio terrestre em áreas de 10 a 100 quilômetros, como o clima urbano e fenômenos locais intensos; e o nível microclimático, que se concentra na interação dos sistemas ambientais próximos à superfície em áreas menores que

100 metros, focando em como esses sistemas modificam fluxos de energia e umidade. Essa estrutura mantém sua relevância ao relacionar diretamente os efeitos locais do aquecimento urbano aos padrões climáticos regionais e globais (Liu et al., 2024).

Nos impactos da urbanização sobre o clima, o modelo vertical de Oke (1984; 1987), amplamente aceito atualmente (Andrade, 2022), identificou duas camadas atmosféricas resultantes da urbanização: a Urban Boundary Layer (UBL), que representa o limite superior da influência urbana, e a Urban Canopy Layer (UCL), situada abaixo da UBL e caracterizada pelos processos microclimáticos entre edificações e árvores. Estudos recentes confirmam essa divisão, destacando que a UCL é o espaço de maior variabilidade térmica e de maior relevância para o conforto térmico humano (Zhang et al., 2024; Esposito et al., 2024).

Para Oke (1984), o clima urbano resulta da interação entre o ar atmosférico e a infraestrutura urbana, influenciado pela configuração espacial, rugosidade da superfície, ocupação do solo, permeabilidade e propriedades térmicas dos materiais. Ambas as camadas, UBL e UCL, são locais e suas características são moldadas pela urbanização, afetando diretamente o conforto térmico dos pedestres e o desempenho térmico e energético das edificações.

Monteiro (2015), no entanto, contrasta a abordagem de Oke ao enfatizar que essa concepção, embora fundamental, concentra-se mais nos fenômenos atmosféricos do que na intervenção humana nas áreas urbanas. Andrade (2022) reforça essa visão, apontando que o processo climático urbano é resultado da interação contínua entre fatores naturais e antrópicos No Brasil, Moreira et al. (2024) associa essa visão com a verticalização e a impermeabilização à intensificação térmica e à desigualdade ambiental nas cidades brasileiras

Landsberg (1981) já afirmava que as intervenções humanas na superfície urbana provocam mudanças microclimáticas que resultam no aquecimento das superfícies terrestres. Essas alterações modificam o balanço de energia e radiação nas zonas urbanas, evidenciando a conexão entre as transformações urbanísticas e as variações climáticas locais. Ramachandra et al. (2025) mostrou que a densificação e a morfologia urbana atuam como fatores determinantes na amplificação térmica noturna em cidades de médio e grande porte.

Freitas (2019) complementa que o clima urbano pode ser caracterizado como um sistema complexo, dotado de diversas variáveis que influenciam direta e indiretamente o ambiente, nas quais as saídas do sistema nem sempre correspondem às suas entradas, devido às transformações internas e interações entre múltiplos subsistemas. O autor afirma que:

> O clima urbano pode ser caracterizado como um sistema complexo dotado de diversas variáveis que influenciam direta e indiretamente o ambiente, onde a soma das partes pode não ser o todo, além do que, as saídas (outputs) não são necessariamente provenientes das entradas (inputs) dentro do sistema, ou seja, as variáveis diretas no sistema nem sempre correspondem às variáveis de saída, devido às transformações e mudanças ao longo do processos dentro deste sistema complexo (Freitas, p. 263, 2018).

Essa visão sistêmica busca integrar dados empíricos, modelagem e planejamento urbano em interpretações mais dinâmicas e integradas do ambiente térmico (Middel et al., 2022).

No Brasil, as discussões acerca do clima urbano aprimoraram-se a partir da década de 1970 com a teoria e metodologia criada por Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro para analisar o clima das cidades como um sistema complexo e aberto (Monteiro; Lima 2024), quando o processo de urbanização intensificou-se e o crescimento da população urbana já superava o da população total (Santos, 1993).

Monteiro (1976; 2003) considera o clima urbano um sistema que inclui tanto o clima local quanto os impactos da urbanização, demonstrando que as alterações climáticas afetam áreas urbanas de todos os tamanhos. Para compreender esse sistema, o autor propôs uma abordagem teórica e técnica intitulada Sistema Clima Urbano (S.C.U.), baseada na Teoria Geral dos Sistemas de Ludwig von Bertalanffy (1973). O S.C.U. é um sistema aberto e pragmático, composto por três canais de percepção: o conforto térmico, a qualidade do ar e o impacto meteórico.

Com o passar das décadas, novos trabalhos aprimoraram a teoria do clima urbano (Monteiro, 1990; 2003; Sant'Anna Neto, 2011; Amorim, 2013), destacando

os efeitos das transformações antrópicas e da expansão do espaço urbano sobre o ambiente. Estudos mais recentes, como os de Ramachandra et al. (2025) e Cunha et al. (2025), reforçam essa discussão ao evidenciar que as mudanças climáticas nas cidades estão diretamente ligadas a processos de vulnerabilidade social e injustiça ambiental.

Os centros urbanos, sobretudo em países em desenvolvimento, tornaram-se espaços de intensas contradições socioambientais, marcados pela coexistência de verticalização, impermeabilização e desigualdade territorial (Santos, 1993; Huang et al., 2025; Moreira et al., 2024).

2.2. O Sistema Clima Urbano

O Sistema de Clima Urbano (S.C.U.) foi formulado por Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro em 1976, durante sua tese de livre-docência. Fundamentado na Teoria Geral dos Sistemas (T.G.S.), proposta por Ludwig von Bertalanffy em 1950, o modelo foi incorporado por Monteiro por sua capacidade de compreender o clima urbano como um fenômeno complexo, dinâmico e interativo.

Essa estrutura teórica permite interpretar as realidades urbanas em múltiplos contextos, articulando fundamentos científicos e aplicações práticas voltadas ao planejamento ambiental e à gestão das cidades (Lima, Pinheiro e Mendonça, 2012; Moreira et al., 2023).

Essa fundamentação teórica aproxima o S.C.U. da T.G.S. por compartilhar características comuns, pois, é empirista, pois se apoia na observação e na verificação; é modelista, por empregar mapeamentos, diagramas e fluxos; e mantém coerência entre a indução e a dedução, entre o local e o global. Essa arquitetura garante equilíbrio entre o nomotético, que representa os princípios gerais do clima urbano, e o idiográfico, que expressa as particularidades de cada cidade. Essa concepção, ainda hoje, orienta estudos contemporâneos no Brasil, especialmente quando se integram levantamentos de campo, leitura morfológica e diagnósticos de vulnerabilidade socioambiental (Ferreira, 2022; Moreira et al., 2023).

Monteiro (1976, 2003) afirma que, embora complexo, o S.C.U. é pragmático, pois aceita perguntas e devolve respostas operacionais; é dinâmico, refletindo tanto

a variabilidade atmosférica quanto o metabolismo urbano; e é consistente, por abarcar desde fenômenos amplos até processos locais. Estudos recentes que retomam a base monteiriana têm confirmado a utilidade desse enquadramento em cidades médias e grandes, especialmente pela análise integrada do conforto térmico, da qualidade do ar e dos meteoros de impacto (Mendonça, 2015).

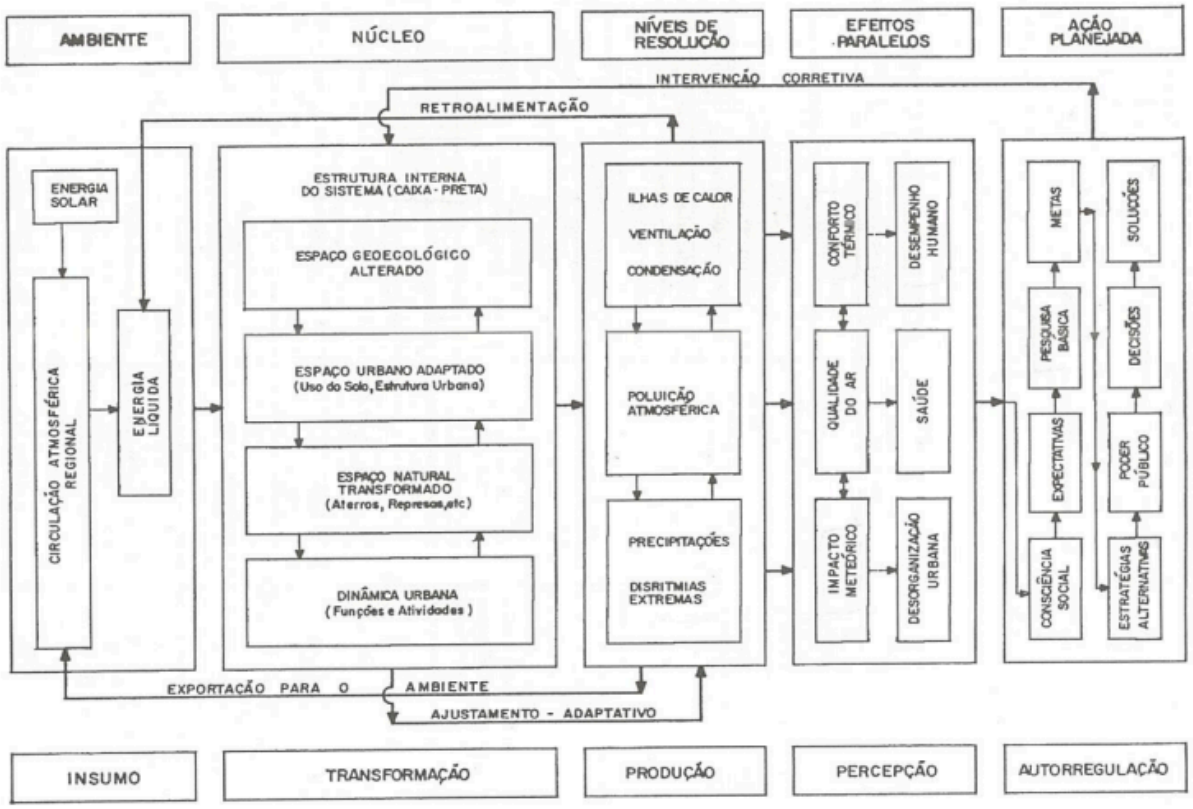


Figura 1 - Diagrama básico do Sistema Clima Urbano.
Fonte: adaptado de Mendonça; Monteiro (2013, p. 45)

Nesse sistema, a atmosfera atua como o operador, responsável pela ação direta sobre o ambiente urbano, enquanto os elementos não atmosféricos, que vão do tecido construído à vegetação e aos grupos sociais, compõem o operando. É dessa interação que emerge os atributos específicos do clima urbano. Essa relação, central na proposta de Monteiro, explica como a estrutura física da cidade e as práticas humanas moldam os processos climáticos locais (Monteiro, 1976, 2003).

A partir da interação entre os processos ecológicos naturais e a urbanização, forma-se o complexo sobre o qual o agente atmosférico atua. Essa organização envolve edificações, vias, vegetação, fluxos de energia e as próprias atividades humanas, que se integram em um sistema de partes interativas. Tal

estrutura é essencial para a análise da morfologia urbana, do uso do solo e das observações em campo, permitindo compreender os contrastes termo-higrométricos entre diferentes setores da cidade (Ferreira, 2022).

Assim, esse conjunto dinâmico expressa a essência do S.C.U., um sistema em que o ser humano atua como mediador entre a atmosfera e o ambiente construído, modificando fluxos energéticos e reorganizando a estrutura térmica e higrométrica do espaço urbano (Monteiro, 1976)

Os insumos de energia que penetram no S.C.U. são aqueles dirigidos diretamente à atmosfera que envolve a cidade. O homem, como elemento ativo do sistema, exerce papel decisivo na transformação dessa energia e nas modificações da estrutura urbana. O crescimento populacional, a verticalização e a motorização intensiva são fatores que alteram a dinâmica interna do sistema, reforçando sua natureza aberta e adaptativa.

Na estrutura do S.C.U., devem ser considerados os vetores e seus componentes, bem como a influência de fatores sobre eles. O conjunto-produto do sistema inclui elementos que revelam a participação urbana em seu funcionamento, como ilhas de calor, poluição do ar e eventos hidrometeorológicos. Diante da heterogeneidade dessas manifestações, Monteiro propõe uma classificação baseada nos canais de percepção humana, que permitem identificar os impactos do clima sobre a vida urbana e compreender como a cidade responde a eles.

Os três canais perceptivos estruturam o S.C.U. em subsistemas interdependentes: o termodinâmico (conforto térmico), o físico-químico (qualidade do ar) e o hidrometeórico (meteoros de impacto). Os principais aspectos de cada um estão sintetizados na Tabela 01, que apresenta suas fontes, mecanismos de ação, produtos e efeitos diretos sobre o ambiente urbano.

Tabela 01 – Sistema Clima Urbano: articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção

Subsistemas canais / Caracterização	I. Termodinâmico – Conforto Térmico	II. Físico–Químico – Qualidade do Ar	III. Hidrometeórico – Impacto Meteórico
Fonte	Atmosfera, Radiação, Circulação Horizontal	Atividade urbana, Veículos automotores, Indústrias, Obras – Limpeza	Atmosfera, Estados especiais (Desvios Rítmicos)
Trânsito no Sistema	Intercâmbio de Operador e Operando	De operando ao operador	Do operador ao operando
Mecanismo de Ação	Transformação no Sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação Núcleo – Ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódico (eventual)
Observação	Meteorológica Especial (técnicas de campo)	Sanitária e Meteorológica Especial	Meteorológica e Hidrológica (técnicas de campo)
Correlações Disciplinares e Tecnológicas	Bioclimatologia, Arquitetura, Urbanismo	Engenharia Sanitária	Engenharia Sanitária e Infraestrutura Urbana
Produtos	“Ilha de calor”, Ventilação, Aumento de Precipitação	Poluição do Ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos Diretos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas Sanitários, Doenças Respiratórias e Oftalmológicas etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem Adaptativa	Controle do uso do solo, Tecnologia de conforto habitacional	Vigilância e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infraestrutura urbana e regularização fluvial – uso do solo
Responsabilidade	Natureza e Homem	Homem	Natureza

Fonte: Monteiro (1975, p. 161).

O conforto térmico é o canal perceptivo mais direto do S.C.U., pois representa a interação entre calor, ventilação e umidade no ambiente construído. Esses elementos determinam o grau de bem-estar dos habitantes e influenciam o desempenho humano, o uso dos espaços e a eficiência energética das edificações. O estudo do conforto térmico tem ganhado relevância tanto na climatologia médica quanto na arquitetura e no urbanismo, revelando a importância da forma urbana na regulação térmica local.

A qualidade do ar é outro componente essencial, relacionada ao canal físico-químico. A poluição atmosférica, somada às demais formas de degradação ambiental, constitui um dos maiores desafios das cidades contemporâneas. Suas causas estão ligadas ao transporte, à indústria e à impermeabilização do solo, e seus efeitos comprometem a saúde pública e a qualidade ambiental. A compreensão da relação entre as fontes emissoras, a morfologia urbana e a capacidade de dispersão atmosférica é indispensável para orientar políticas de mitigação e gestão ambiental eficazes.

O canal hidrometeórico abrange os chamados meteoros de impacto, como chuvas intensas, nevoeiros, vendavais e tempestades. Esses fenômenos, quando intensificados pelas alterações urbanas, provocam danos materiais, afetam a mobilidade e expõem a população a riscos crescentes. A análise desses eventos dentro do S.C.U. permite compreender de que modo a urbanização interfere nos processos naturais, exigindo planejamento integrado entre climatologia, engenharia urbana e gestão de riscos.

O Sistema Clima Urbano também se sustenta em três princípios teóricos que estruturam sua concepção. O primeiro trata da ordem de grandeza e dos graus de organização, definindo a hierarquia de unidades climáticas: zonais, regionais, locais, mesoclimas, topoclimas e microclimas. O conceito de táxon expressa as relações hierárquicas entre as partes do sistema, enquanto o conceito de hólon, inspirado em Arthur Koestler, descreve a organização interna de cada nível, combinando estabilidade e dinamismo. Essa perspectiva assegura uma leitura articulada das escalas climáticas e das relações entre o global e o local.

O segundo princípio refere-se aos padrões de comportamento e à autorregulação do sistema. O clima urbano é entendido como um organismo vivo, em constante transformação. O planejamento urbano, nesse contexto, tem papel decisivo, pois as decisões sobre o uso do solo e a estrutura da cidade influenciam diretamente o equilíbrio climático. Monteiro destaca que o sistema é capaz de ajustar-se por meio de mecanismos internos de retroalimentação, garantindo sua adaptação às mudanças externas sem comprometer a coerência estrutural.

O terceiro princípio analisa a relação entre o núcleo e o ambiente. Monteiro diferencia a visão mecanicista, em que o ambiente determina as respostas do núcleo urbano, da visão organísmica, na qual o núcleo é ativo e interage com o meio, adaptando-se e, por vezes, transformando-o. O S.C.U. adota essa última abordagem, reconhecendo a cidade como um sistema dinâmico que modifica o próprio ambiente. A transmissão de energia atmosférica e as trocas entre os componentes urbanos envolvem tanto processos físicos quanto respostas sociais e tecnológicas, assegurando a continuidade e a autorregulação do sistema.

Os canais de percepção urbana formam uma estrutura complexa e integrada. Compreender o funcionamento do S.C.U. exige considerar as interações entre múltiplos níveis e escalas, que não podem ser analisados isoladamente. Embora seja possível estudar separadamente elementos como temperatura, poluição ou precipitação, Monteiro enfatiza que essas variáveis estão interligadas e que sua análise deve considerar as relações e interdependências entre elas. O clima urbano, portanto, deve ser entendido como o resultado da interação contínua entre seus subsistemas.

Esses canais também se relacionam à experiência humana, pois é por meio da percepção que o clima se manifesta como conforto, desconforto ou impacto. O S.C.U. amplia, assim, a análise física do clima urbano para incluir suas dimensões sociais e sensoriais. A cidade é, ao mesmo tempo, produto e agente do clima, e essa reciprocidade permite compreender como os processos atmosféricos se refletem nas dinâmicas sociais e espaciais.

O conforto térmico, a qualidade do ar e os meteoros de impacto não atuam de forma isolada, mas interagem continuamente, trocando energia, matéria e informação. A

compreensão dessa interdependência é essencial para planejar cidades mais equilibradas e resilientes. O S.C.U. propõe uma estrutura de análise que integra essas dimensões, oferecendo um instrumento teórico e metodológico para a leitura total e coerente do clima urbano.

Monteiro aponta que

> "O S.C.U pressupõe um nível de resolução geral que é o próprio clima da cidade, mas pressupõe níveis de resolução intermediários que caracterizam os subsistemas nele contidos. Minha proposição de três canais de percepção humana reflete, por mais arbitrária que possa parecer, uma filiação com os níveis de resolução termodinâmica, hídrica e físico-química subjacentes no processo climático da cidade" (p. 155).

O S.C.U., ao integrar essas dimensões, consolida-se como um marco teórico da climatologia urbana brasileira, unindo rigor científico e aplicabilidade prática no estudo do ambiente urbano.

2.2.1. Subsistema Termodinâmico

As componentes termodinâmicas do clima não apenas estabelecem o referencial básico para o conforto térmico urbano, mas também constituem o nível fundamental de resolução climática onde convergem e se associam outras componentes. Dentro do esquema do S.C.U., este canal permeia toda a estrutura, servindo como insumo primordial que é transformado e produzido pela cidade. O uso do solo, a morfologia urbana e suas funções desempenham papéis cruciais nesse processo de transformação e produção.

É essencial reconhecer a interconexão entre as componentes térmicas e os aspectos barométricos, de ventilação, condensação e precipitação restritas ao núcleo do S.C.U. A formação de ilhas de calor, por exemplo, influencia diretamente a ventilação urbana, que por sua vez interage com o contexto geoecológico local e a circulação regional mais ampla. Esta complexidade demanda observações meteorológicas específicas que complementem as observações padronizadas, proporcionando uma compreensão mais profunda e contextualizada.

A pesquisa climática urbana requer observações contínuas e sistemáticas, além de trabalhos de campo que incluem observações móveis e episódicas. Segundo Monteiro (1975):

> “A pesquisa do clima da cidade implica obrigatoriamente em observação complementar fixa permanente, bem como trabalho de campo com observações móveis e episódicas. As técnicas modernas de sensoriamento remoto, principalmente pela aplicação do infravermelho, estão aí para subsidiar o mapeamento térmico das cidades, ponto de partida para outros fenômenos do clima urbano.” (1975, p.163)

2.3. Conforto Térmico

O conforto térmico constitui uma das expressões mais evidentes do Sistema de Clima Urbano, pois traduz a forma como o ser humano percebe e reage às condições atmosféricas produzidas pela interação entre os elementos naturais e o espaço construído (Monteiro; Lima, 2024). Essa percepção resulta de um conjunto de fatores físicos, fisiológicos e culturais, que determinam o equilíbrio entre o corpo e o ambiente. De maneira geral, o conforto térmico pode ser compreendido como a sensação de bem-estar proporcionada pela combinação adequada entre temperatura do ar, umidade relativa, temperatura radiante média e velocidade do vento (Gobo, 2013).

Nas cidades, essa condição de equilíbrio tende a ser rompida em virtude da intensa modificação da paisagem e da substituição das superfícies naturais por materiais impermeáveis, como o asfalto e o concreto. Tais materiais alteram o balanço energético local, reduzem a evapotranspiração e ampliam o armazenamento de calor, elevando a temperatura do ar e dificultando o resfriamento noturno (Oke, 1987; Mendonça; Danni-Oliveira, 2013; Amorim, 2019). A configuração morfológica das áreas urbanas, marcada pela verticalização, pela densidade construtiva e pela orientação das vias, também interfere na ventilação e na distribuição da radiação solar, intensificando o desconforto térmico (Zhang et al., 2024; Benziada et al., 2025).

Segundo Lamberts (2010), o conforto térmico não se restringe ao controle da temperatura, mas expressa um estado mental de satisfação com o ambiente térmico, condicionado pelas percepções individuais e pelo contexto social. Essa concepção amplia o entendimento do fenômeno, que passa a incluir dimensões psicofisiológicas e socioclimáticas. Castelhano (2020) acrescenta que o conforto térmico pode ser interpretado sob duas abordagens complementares: a pessoal, que diz respeito à resposta individual às condições térmicas, e a ambiental, que analisa a capacidade de determinado espaço em oferecer conforto aos seus ocupantes.

No contexto das cidades atuais, o desconforto térmico relaciona-se à produção desigual do espaço urbano e às vulnerabilidades socioambientais (Monteiro; Lima, 2024). A distribuição irregular das áreas verdes, a diversidade de materiais construtivos e as diferenças na densidade edificada fazem com que distintos grupos sociais vivenciem o clima urbano de maneiras diversas. A percepção de calor ou frescor está diretamente ligada à ventilação, ao sombreamento e à refletância das superfícies, fatores que moldam os microclimas e revelam contrastes significativos dentro de um mesmo espaço urbano.

A teoria bioclimática elaborada por Victor Olgyay (1963) fundamenta parte importante dos estudos sobre o tema. O autor definiu a existência de uma zona de conforto bioclimática, na qual a temperatura e a umidade se equilibram em níveis que mantêm o organismo humano em neutralidade térmica. Nas cidades, contudo, esse equilíbrio é frequentemente deslocado, já que a radiação solar, a limitação dos ventos e a compactação das edificações produzem microclimas diversos e complexos.

Compreender o conforto térmico urbano requer uma análise integrada dos fatores físicos, construtivos e comportamentais. Pesquisas de Hui Li (2016) demonstram que o tipo de pavimento e sua capacidade de refletir a radiação solar influenciam diretamente as temperaturas superficiais e o conforto dos pedestres. Superfícies de baixo albedo, como o asfalto, absorvem grande quantidade de radiação solar e liberam calor lentamente durante a noite, o que eleva a temperatura e intensifica o desconforto (Mendonça; Oliveira, 2007).

Essas condições provocam consequências que ultrapassam a dimensão térmica. O aumento da temperatura nas áreas urbanas eleva o consumo de energia elétrica, compromete a qualidade das águas pluviais, acelera o desgaste de pavimentos e favorece o surgimento de doenças respiratórias e cardiovasculares (Hui Li, 2016). Esses efeitos evidenciam a importância de incorporar critérios climáticos ao planejamento urbano, de modo que o clima oriente a configuração das cidades, conforme sugerem Zhang et al. (2024).

O conforto térmico deve ser entendido como uma condição dinâmica, resultante da interação contínua entre o corpo humano e o meio ambiente. Quando as condições locais, como ventilação e umidade, ultrapassam os limites de tolerância fisiológica, o organismo precisa ajustar seus mecanismos de equilíbrio, o que exige maior esforço metabólico e reduz a sensação de bem-estar (Zhang et al., 2024). A investigação sobre o conforto térmico urbano, portanto, ultrapassa o campo físico e técnico, alcançando dimensões sociais, ambientais e perceptivas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo - Águas Claras

Brasília, ao longo de sua história, desenvolveu polinucleamentos urbanos que divergiram dos planos originais de seus idealizadores. O crescimento do Plano Piloto, mesmo antes de sua inauguração, e diversas contingências abriram caminho para a expansão de Taguatinga, a primeira das oito cidades satélites (Paviani, 2010).

No entanto, ao contrário das demais regiões do Distrito Federal, que surgiram de ocupações irregulares posteriormente legalizadas pelo governo (Campanhoni, 2011), Águas Claras foi concebida como um projeto urbanístico integrado a iniciativas governamentais destinadas a políticas de controle territorial e redução de déficits habitacionais (Gouvêa, 1995).

Situada entre dois grandes complexos urbanos, a área representava um vazio territorial com elevados custos para a expansão de serviços. Esses espaços urbanos subutilizados geralmente são ocupados de forma irregular (Panerai 2006 apud Campanhoni 2011), configurando-se como uma zona com potencial para expansão e suscetível à ocupação desordenada devido à sua ociosidade. Este cenário foi agravado com a implementação da rede de metrô que atravessa a área (Campanhoni, 2011).

O Plano Estrutural de Organização Territorial do DF (PEOT) de 1977 reflete a preocupação com a organização socioespacial de Brasília, sugerindo estratégias de descentralização para evitar a superlotação dos centros. Contudo, o PEOT de 1977 não previa o uso residencial significativo; os edifícios deveriam, no máximo, ter três pavimentos e serem destinados a atividades de serviços como gráficas, restaurantes, e escolas, entre outros do setor terciário e quaternário (Campanhoni, 2013).

Segundo Campanhoni (2011), em 1983, o Projeto Águas Claras delimitou áreas para urbanização, agricultura e conservação ambiental. O bairro foi designado para expansão urbana devido à utilização imprópria de seu espaço rural, afetado pela exploração de cascalho, sugerindo sua recuperação através da infraestrutura

urbana. Esta destinação foi confirmada em 1990 pelo Plano de Ocupação e Uso do Solo (POUSO).

No ano seguinte, em 1984, Águas Claras emergiu como parte de um conjunto de iniciativas para atender à crescente demanda por novas habitações e para viabilizar as instalações do metrô, visto como recurso para racionalizar a ocupação do solo e promover a expansão ordenada em Brasília (Campanhoni, 2011). No entanto, segundo Albuquerque (2009), embora o projeto não tenha sido implementado, ele fomentou a especulação imobiliária devido à possibilidade de construção anunciada pelo Estado, aumentando o valor das terras na região.

Com a regularização da ocupação denominada Vila Areal, em 1989, foram configuradas as quadras pares do bairro, que passou a fazer parte da Região Administrativa de Taguatinga (RA III) (Campanhoni, 2011). Em 1991, o Governo do Distrito Federal contratou o escritório Zimbres e Reis Arquitetos Associados para elaborar um Plano de Ocupação para o novo bairro de Taguatinga. O Conselho de Arquitetura e Meio Ambiente (CAUMA) aprovou este plano, resultando na autorização de sua implementação em 1992.[1]

No início do governo de Joaquim Roriz (1991-1995), foi encomendado ao escritório Paulo Zimbres e Reis Arquitetos e Associados um novo projeto urbanístico para Águas Claras, com mudanças significativas em relação ao projeto anterior, conforme estipulado pelo PEOT de 1977 (Paviani, 2010). Propôs-se um bairro exclusivamente residencial, adotando abordagens urbanísticas de alta densidade através da verticalização, inspiradas em modelos europeus.

Com a criação de novas Regiões Administrativas pelo Governo do Distrito Federal, em 2003[2], Águas Claras foi elevada à condição de Região Administrativa, por desmembramento da área de Taguatinga e incorporação de áreas vizinhas. Assim, a Região Administrativa XX - Águas Claras englobava o Setor Águas Claras (vertical), o Setor Habitacional Arniqueiras (colônias agrícolas Arniqueiras, Vereda Grande ou Veredão e Vereda da Cruz), o Areal e a Área de Desenvolvimento Econômico – ADE (Distrito Federal, 2024).

---

[1] (Lei n° 385 de 16 de dezembro de 1992).

[2] (Lei n° 3.153, de 06 de maio de 2003).

De acordo com o plano original do bairro, a área deveria acomodar uma população de 160.000 pessoas, com uma densidade populacional bruta esperada de 320 habitantes por hectare. Porém, a densidade final superou essa estimativa, já que o limite de altura originalmente estabelecido em 12 andares para zonas residenciais e 15 para zonas comerciais foi ultrapassado. Atualmente, existem edifícios com mais de 35 pavimentos em algumas áreas, incluindo as residenciais (Campanhoni, 2013).

Atualmente, Águas Claras é reconhecida por seus condomínios verticais fechados e edifícios de grande altura, contrastando fortemente com o perfil urbano mais baixo e espalhado do restante do Distrito Federal. Embora projetada para valorizar o pedestre, as calçadas são geralmente estreitas e ladeadas por grades, empenas cegas, muros ou estacionamentos. Engarrafamentos intensos e prolongados são comuns, evidenciando o alto uso de transportes motorizados individuais (Pereira e Cruz, 2021).

Serrano (2010) afirma que a urbanização de Águas Claras foi fortemente influenciada pela dinâmica do mercado imobiliário, resultando em mudanças nos programas de necessidades dos empreendimentos e nos preços praticados. A valorização e rápida ocupação do local foram prioridades, e a indústria imobiliária estava aquecida e ávida, especialmente devido à valorização imobiliária decorrente do aumento da demanda habitacional das classes médias locais ou em processo de migração para o Distrito Federal (Silva, 2016).

Em 2019, a poligonal de Águas Claras foi redefinida com a criação da RA Arniqueira (RA XXXIII)[3], restando apenas a área de Águas Claras (vertical) para a RA XX (figura 1). Atualmente, esta abrange 918,66 hectares com áreas destinadas ao comércio, lazer e moradias predominantemente verticais, além da presença do Parque Ecológico de Águas Claras[4] (Distrito Federal, 2022). (Mapa 1)

[3] (Lei Distrital nº 6.371 de 30 de setembro de 2019).

[4] (Lei Complementar n° 287 de 15 de Abril de 2000).

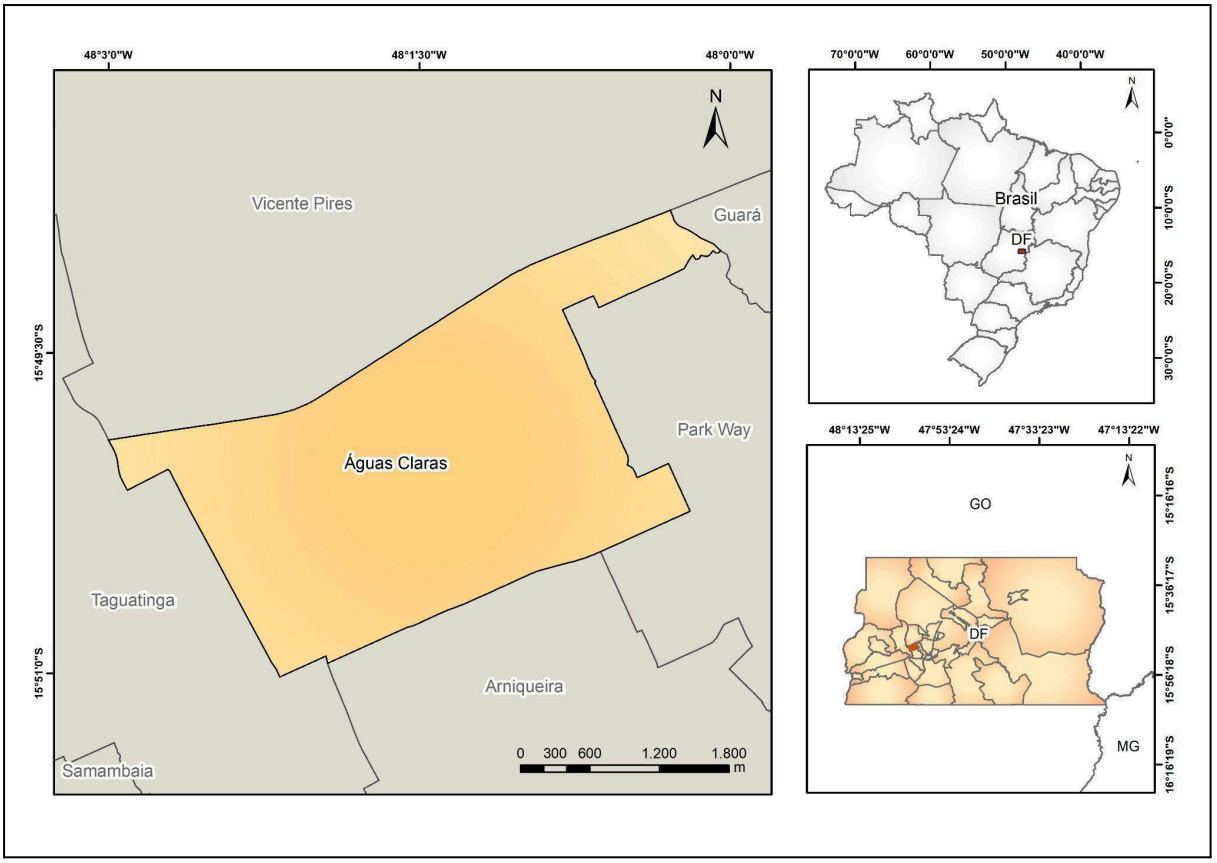


Figura 2: Mapa de localização da Área de Estudo.

Dados recentes da PDAD-A 2024 confirmam o dinamismo demográfico da RA. sua população estimada é de 141.872 pessoas e o índice de domicílios ocupados é de 66.273 unidades, com média de 2,14 moradores por domicílio. Também identificou-se que 43,3% dos domicílios dispõem de ar-condicionado e quase 79% têm ventilador ou circulador. A infraestrutura habitacional é basicamente padronizada: 98% com paredes de alvenaria revestida, laje como cobertura dominando (98,5%) e Águas Claras é a RA com maior densidade populacional do DF, alcançando cerca de 14.074 habitantes por km², proporção expressivamente superior à média distrital (Distrito Federal, 2024)

3.1.1. Descrição dos pontos durante a medição

A definição dos seis pontos de análise em Águas Claras partiu do princípio de que a morfologia urbana exerce influência direta sobre o comportamento térmico e higrométrico do ambiente. A seleção foi realizada com base em critérios que consideraram o uso e a ocupação do solo, o grau de verticalização, a presença de

vegetação, o tipo de cobertura superficial e parâmetros geométricos urbanos, como o Fator de Visão do Céu (FVC) e a relação altura/largura (H/W). A intenção foi contemplar diferentes configurações espaciais e funcionais da cidade, de modo que o conjunto de pontos representasse a variedade de formas urbanas e de condições microclimáticas observadas em campo.



Figura 3: Mapa de localização dos pontos.

A escolha buscou abranger tanto áreas densamente construídas, onde a verticalização e a impermeabilização do solo predominam, quanto setores abertos e vegetados, com maior permeabilidade e ventilação natural. Essa diversidade é essencial para compreender os contrastes térmicos entre os cânions urbanos e as áreas com maior exposição ao céu, permitindo relacionar a estrutura física da cidade aos processos de modificação climática local. Assim, os pontos foram definidos para expressar o gradiente de urbanização característico de Águas Claras, conectando regiões centrais, de uso misto e de transição com o Parque Ecológico.

Os locais mais verticalizados foram incluídos por representarem os espaços de maior confinamento radiativo e de restrição à circulação do ar, características típicas de cânions urbanos. Esses setores favorecem o acúmulo de calor durante o dia e sua liberação lenta à noite, configurando ambientes propícios à formação de microclimas mais estáveis e quentes. Por outro lado, pontos situados em áreas abertas e vegetadas permitem observar situações opostas, marcadas por maior ventilação, maior perda radiativa noturna e menores amplitudes térmicas. A

comparação entre esses extremos oferece uma visão abrangente dos efeitos da forma urbana sobre as variáveis meteorológicas de superfície.

Além dos contrastes de forma e densidade, também se considerou a influência da cobertura vegetal e da permeabilidade do solo. Pontos localizados em zonas de contato entre o tecido urbano e áreas naturais, como as bordas do Parque Ecológico de Águas Claras, foram selecionados para avaliar a contribuição da vegetação e do solo exposto na moderação térmica e na conservação da umidade relativa. Essas áreas de transição são importantes por evidenciarem o papel dos elementos naturais na mitigação dos efeitos do adensamento e da impermeabilização.

A disposição espacial dos pontos seguiu uma lógica de continuidade, conectando ambientes de alta densidade construtiva aos setores mais abertos e vegetados. Essa organização favoreceu a realização de transectos móveis coerentes com o gradiente urbano real e a interpretação integrada das variações térmicas e higrométricas observadas. A presença de áreas abertas no conjunto de pontos também funcionou como referência climática local, fundamental para comparação com as áreas de maior confinamento urbano, conforme orientam os estudos clássicos de Oke (1987) e Monteiro (1976) sobre a análise do clima urbano. A seguir, os pontos selecionados:



Foto 1: ponto 1 (fonte: google earth)

Coordenadas: 15°50'29.88"S, 48°1'39.15"O

O Ponto 1 localiza-se em um dos segmentos mais densamente verticalizados de Águas Claras, onde a disposição das edificações altas e contínuas conforma um

cânion urbano estreito e profundo. A via, caracterizada por tráfego veicular intenso e fluxo constante ao longo do dia, apresenta pavimentação asfáltica escura, calçadas reduzidas e quase nenhuma vegetação de sombreamento, o que amplia a exposição das superfícies à radiação solar direta.

A morfologia fortemente enclausurada limita a dispersão térmica e a renovação do ar, intensificando o aprisionamento de calor e a formação de microclimas mais quentes. O predomínio de materiais de alta capacidade térmica, associado à insuficiente permeabilidade do solo, reforça as características típicas dos ambientes de estresse térmico presentes em áreas urbanas compactas.



Foto 2: ponto 2 (fonte: google earth)

Coordenadas: 15°50'15.01"S, 48°0'34.23"O

O Ponto 2 está inserido em uma área aberta que se distingue nitidamente do padrão urbanístico denso de Águas Claras, apresentando predomínio de uso do solo campestre e baixa intervenção antrópica. A ausência de edificações altas e de obstáculos físicos no entorno cria um horizonte visual totalmente desobstruído, o que se traduz em um Fator de Visão do Céu (FVC) elevado e em uma relação H/W extremamente reduzida. Essa configuração morfológica favorece tanto a incidência direta de radiação solar sobre o terreno quanto a eficiente perda de calor por irradiância noturna, contribuindo para uma maior amplitude térmica diária.

A ventilação natural é amplamente favorecida, uma vez que não há barreiras significativas ao escoamento dos ventos, permitindo a livre circulação do ar e reduzindo o potencial de acúmulo térmico. O solo, majoritariamente permeável, apresenta cobertura vegetal composta por gramíneas e pequenos arbustos, o que

auxilia nos processos de evapotranspiração e moderação da temperatura superficial. Essa vegetação, embora esparsa, desempenha papel importante na manutenção da umidade do ar e no amortecimento térmico do ambiente.

Trata-se de um espaço que funciona como contraponto às áreas verticalizadas circundantes, atuando como um corredor de ventilação e contribuindo para a heterogeneidade térmica da região. O Ponto 2 evidencia a influência decisiva da abertura morfológica, da permeabilidade do solo e da cobertura vegetal nos processos microclimáticos, reforçando a importância de áreas vazias e de transição no metabolismo climático urbano de Águas Claras.

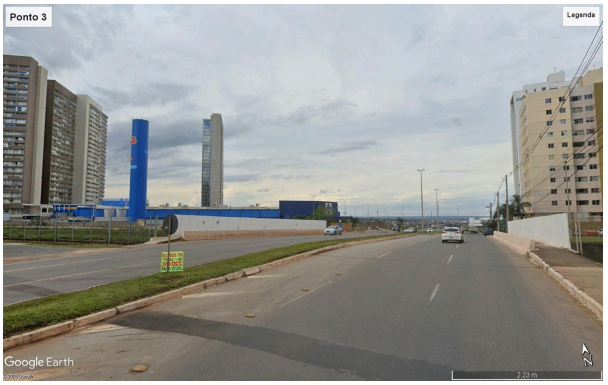


Foto 3: ponto 3 (fonte: google earth)

Coordenadas: 15°50'0.70"S, 48°2'22.86"O

O Ponto 3 localiza-se em uma via de mão dupla posicionada sobre a ponte que cruza os trilhos do metrô, configurando um ambiente aberto e com ausência quase total de edificações no entorno imediato. Essa condição resulta em baixa rugosidade urbana e ampla exposição ao fluxo atmosférico, uma vez que não há obstáculos laterais capazes de limitar a velocidade ou a direção predominante dos ventos. A topografia levemente elevada contribui para o favorecimento de correntes de ar horizontais, intensificando a ventilação natural e reduzindo o aprisionamento de calor sensível.

Por se tratar de um espaço altamente exposto, com elevado Fator de Visão do Céu (FVC) e ausência de sombreamento estrutural, o Ponto 3 tende a apresentar grande amplitude térmica ao longo do dia, aquecendo rapidamente sob forte radiação solar e resfriando de forma mais eficiente durante o período noturno. Essa dinâmica confere ao local um comportamento térmico distinto, frequentemente mais instável e variável em comparação aos setores verticalizados.

Este ponto funciona como um importante referencial de contraste em relação aos cânions urbanos mais confinados de Águas Claras, permitindo observar como a abertura morfológica, a exposição direta ao céu e a baixa rugosidade exercem influência significativa na modulação microclimática. Trata-se, portanto, de um ponto estratégico para avaliar a atuação da ventilação e das trocas radiativas na estrutura do clima urbano local.



Foto 4: ponto 4 (fonte: google earth)

Coordenadas**:** 15°50'10.25"S, 48°2'24.10"O

O Ponto 4 está situado em uma via ampla que integra pista de circulação e ciclofaixa, porém seu entorno é fortemente condicionado pela presença de edifícios altos e contínuos em ambos os lados, conformando um cânion urbano bem definido. A verticalização acentuada restringe significativamente o campo visual do céu, implicando valores reduzidos de Fator de Visão do Céu (FVC) e uma relação H/W elevada, fatores que influenciam diretamente o balanço energético local.

A dinâmica de sombreamento no ponto varia ao longo do dia conforme a trajetória solar, produzindo alternância entre trechos iluminados e sombreados, mas com predominância de áreas protegidas da radiação direta devido à profundidade do cânion. A ventilação natural tende a ser limitada, uma vez que a continuidade

das fachadas e a estreita abertura superior dificultam a dispersão do ar e reduzem a capacidade de renovação dos fluxos atmosféricos horizontais. O intenso tráfego veicular contribui para o aquecimento das superfícies e da massa de ar, reforçando o efeito de aprisionamento térmico característico desses ambientes densamente construídos.



Foto 5: ponto 5 (fonte: google earth)

Coordenadas: 15°50'13.64"S, 48°1'46.35"O

O Ponto 5 está localizado em uma via estreita de duplo sentido inserida em área de alta verticalização. As edificações que ladeiam a via são altas, contínuas e ocupam a maior parte das quadras, formando fachadas alinhadas que definem um cânion urbano profundo. A proximidade entre as construções reduz sensivelmente a abertura superior e limita o campo visual do céu. A iluminação natural ao nível da rua é condicionada pelo distanciamento entre os prédios, resultando em longos períodos de sombreamento ou iluminação parcial.

A ventilação natural encontra restrições devido ao estreitamento da via e à continuidade das fachadas, o que reduz o escoamento do ar ao longo do eixo da rua, contudo, pode gerar um grande corredor de vento, se houver condições de velocidade e direção. A pavimentação é integralmente impermeável, composta por faixa asfáltica central e calçadas cimentadas, ambas com baixa capacidade de infiltração. Não há presença significativa de cobertura vegetal, seja arbórea ou rasteira, e o mobiliário urbano é limitado.

O conjunto de materiais utilizados no pavimento e nas fachadas é predominantemente mineral, com tonalidades escuras ou neutras e alta capacidade

de absorção de radiação solar ao longo do dia. As superfícies verticais apresentam repetição de padrões arquitetônicos, com janelas alinhadas e varandas salientes, contribuindo para o aumento da rugosidade morfológica. A densidade construtiva é elevada e a permeabilidade do solo é reduzida, devido à predominância de áreas edificadas e pavimentadas. Trata-se de um arranjo típico de setores centrais verticalizados, caracterizado por via estreita, baixa abertura superior, fachadas contínuas, elevada massa edificada e escassez de elementos naturais ou áreas permeáveis.

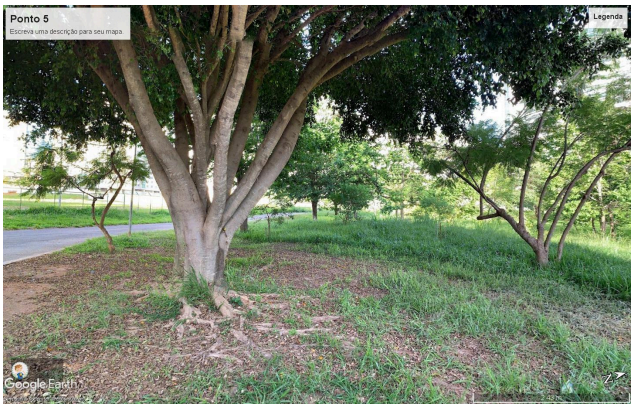


Foto 6: ponto 6 (fonte: google earth)

Coordenadas**:** 15°50'2.22"S, 48°2'3.00"O

O Ponto 6 encontra-se na borda do Parque Ecológico de Águas Claras, formando uma zona de transição entre a mata nativa do Cerrado e o tecido urbano denso marcado pela verticalização e pela impermeabilização das superfícies. Essa interface resulta em forte heterogeneidade morfológica e microclimática. De um lado, o ambiente natural oferece sombreamento contínuo, solos permeáveis, maior umidade e circulação de ar favorecida pela presença da vegetação; de outro, o entorno construído intensifica a retenção de calor, reduz a ventilação e amplia o contraste térmico entre áreas arborizadas e zonas edificadas.

O parque constitui a principal mancha verde da região administrativa, criado em 2000 pela Lei Complementar nº 287, com a finalidade de proteger a flora e a fauna locais, preservar áreas de nascente e recarga aquífera e promover atividades de educação ambiental, pesquisa e lazer.

Com cerca de 95 hectares, o parque abriga trechos importantes de mata preservada, riachos, dois lagos e uma variedade de árvores frutíferas remanescentes das antigas chácaras que ocupavam o local antes da urbanização (Distrito Federal, 2018). A Lagoa dos Patos, elemento paisagístico central, evidencia a coexistência entre natureza e verticalização, funcionando como foco de circulação de ar frio e de manutenção da umidade em seu entorno imediato. A presença de fauna diversificada, como capivaras, gansos, tucanos e bem-te-vis, reforça o valor ecológico do parque em meio ao adensamento urbano.

Sob gestão do Ibram, o espaço também abriga o Centro de Referência em Educação Ambiental de Águas Claras e mantém parcerias institucionais que ampliam sua função social, incluindo atividades esportivas e educativas que estreitam a relação da comunidade com o ambiente natural (Distrito Federal, 2018).

Além de sua relevância ecológica ampla, os trechos de mata de galeria presentes no parque exercem papel decisivo na modulação microclimática local e, como formações ripárias típicas do Cerrado, essas áreas apresentam elevada densidade arbórea e forte acoplamento com cursos d'água, o que resulta em condições microclimáticas diferenciadas em comparação com o entorno urbanizado (Lóis et al., 2011).

Lóis et al. (2011), afirmam que as matas de galeria reduzem a temperatura do ar e da superfície, eleva a umidade relativa e amortiza variações térmicas ao longo do dia e, sobretudo, durante o período noturno. A literatura demonstra que vegetações ciliares, mesmo quando inseridas em ambientes urbanos densificados, funcionam como zonas de resfriamento e corredores naturais capazes de dissipar calor e restabelecer o equilíbrio térmico nas áreas adjacentes.

Estudos sobre a importância eco-hidrológica das zonas ripárias também indicam que essas formações mantêm a estabilidade hídrica e térmica por meio de processos como sombreamento, evapotranspiração e maior retenção de umidade no solo (Attanasio et al., 2012; Tambosi et al., 2015).

3.2. Transecto Móvel

O transecto móvel é amplamente reconhecido na climatologia urbana por sua eficácia na avaliação das variações térmicas e higrométricas entre diferentes tipos de uso e cobertura do solo, permitindo análises detalhadas das dinâmicas microclimáticas em escala local e essa técnica consiste em percursos lineares definidos, nos quais se realizam medições contínuas de temperatura e umidade relativa do ar, seja a pé ou em veículo, ao longo de trajetos que cruzam áreas urbanas e periurbanas (Rodrigues et al., 2024)

A principal vantagem do transecto móvel é sua mobilidade e baixo custo operacional, especialmente quando comparado à instalação de estações meteorológicas fixas. De acordo com Neves et al. (2015 apud Rodrigues et al., 2024), a utilização de sensores digitais portáteis garante a obtenção de dados precisos e consistentes, sendo essencial para a confiabilidade das análises microclimáticas. Contudo, a padronização metodológica, envolvendo instrumentos, abrigos, velocidade e horários, é fundamental para assegurar comparabilidade entre estudos (Valin Jr. & Santos, 2021)

No presente trabalho, adotou-se o modelo AKSO AK-174 datalogger (foto 1), com faixa de medição entre -40 °C e 70 °C (precisão ±1 °C) e umidade de 0 a 100% (precisão ±3%), conforme também utilizado em protocolos recentes de padronização de transectos (Valin Jr. & Santos, 2020; Rodrigues et al., 2024). O intervalo de registro foi definido em 2 segundos, a uma altura média de 1,5 m do solo, conforme preconizado por Oke (1978) para a camada de dossel urbano.



Foto 7: Transecto Móvel (arquivo pessoal).

O abrigo utilizado no transecto móvel foi confeccionado em PVC branco de estrutura horizontal, com dimensões padronizadas de modo a garantir a ventilação adequada e evitar a incidência direta de radiação solar sobre os sensores (Foto 2). Esse tipo de abrigo é amplamente recomendado em medições de campo de climatologia urbana por proporcionar isolamento térmico eficiente, leveza e resistência à radiação solar (Valin Junior; Santos, 2020; Oke, 2017). Antes de cada coleta, os sensores foram mantidos no interior do abrigo por cerca de dez minutos para estabilização térmica, assegurando a confiabilidade das leituras de temperatura e umidade ao longo de todo o percurso.



Foto 8: Abrigo do transecto (arquivo pessoal).

As coletas foram realizadas aos domingos, às 21h (horário oficial de Brasília, GMT − 3), conforme os horários sinóticos recomendados para estudos microclimáticos em áreas urbanas (Valin Junior; Santos, 2020).

As análises foram conduzidas aos domingos, abrangendo o período de transição entre a estação seca e o início do regime chuvoso, totalizando 12 domingos consecutivos nos meses de setembro, outubro e novembro de 2024, de modo a contemplar as variações térmicas e higrométricas características desse intervalo sazonal.

Segundo Valin Jr e Santos (2020), os autores também sugerem que o tempo de coleta não ultrapasse uma hora, sendo que o tempo gasto nos percursos dos transectos foi, em média, de 45 minutos, totalizando 12,7 km de extensão.

O trajeto definido abrangeu áreas heterogêneas, passando por corredores de edifícios altos (Avenida das Araucárias e Avenida das Castanheiras), áreas abertas (Rua Tamboril e parte da Avenida Vereda da Cruz) e áreas predominantemente cobertas por vegetação (Parque Ecológico de Águas Claras). Após a realização dos transectos em campo, foram determinados seis pontos fixos que englobassem os diferentes usos do solo em Águas Claras para os levantamentos referentes ao FVC e relação H/W.

3.3. Fator de Visão do Céu (FVC) e Relação H/W

A relação H/W e o Fator de Visão do Céu (FVC) são parâmetros fundamentais para compreender de que maneira a morfologia urbana influencia o microclima das cidades. Ambos permitem analisar como a altura das edificações, a largura das vias e o grau de confinamento dos espaços interferem nos fluxos de radiação, ventilação e energia térmica.

A relação H/W, em que “H” representa a altura média das edificações e “W” a largura média das vias, expressa o grau de fechamento dos cânions urbanos e é amplamente utilizada em estudos de climatologia urbana. Locais com elevada razão H/W, caracterizados por ruas estreitas e edifícios altos, tendem a apresentar menor ventilação e maior retenção de calor, o que favorece o surgimento de ilhas de calor urbanas e dificulta o resfriamento noturno (Oke, 1988; Megda; Masiero, 2021).

Essa configuração também reduz a umidade relativa do ar, uma vez que diminui a presença de áreas vegetadas e o potencial de evapotranspiração e há uma relação inversa entre H/W e o FVC, pois quanto maior a altura em relação à largura, menor a porção de céu visível e maior o aprisionamento da radiação térmica (Nakata-Osaki et al., 2016; Battista et al., 2015).

Nos seis pontos fixos analisados, a razão H/W foi calculada com base na média das alturas das edificações de ambos os lados das vias, dividida pela largura média entre fachadas. As medições foram realizadas com o auxílio do software Google Earth Pro, conforme metodologia proposta por Battista et al. (2015). De acordo com a classificação de Oke (1988), cânions urbanos com H/W superior a 2 são considerados profundos, apresentando menor ventilação e maior potencial de aquecimento.

O Fator de Visão do Céu (FVC) é um parâmetro adimensional que representa a fração do céu visível a partir de um ponto na superfície terrestre. O valor do FVC varia de 0 a 1, sendo que 0 indica o céu totalmente obstruído e 1 representa o céu completamente aberto (Souza et al., 2010). Este indicador é essencial na análise do balanço radiativo urbano, pois controla tanto a incidência direta da radiação solar quanto a dispersão da radiação térmica emitida pelas superfícies (Minella; Rossi; Krüger, 2011).

A metodologia empregada para o cálculo do FVC seguiu o procedimento descrito por Collischonn e Ferreira (2015). Em cada ponto fixo, foram obtidas fotografias hemisféricas com câmera equipada com lente olho de peixe de 180°(figura 1), posicionada em um tripé a 1,5 metro de altura (figura 2), correspondente à média da camada de pedestres (Figura 3). As imagens foram processadas no software Adobe Photoshop, onde as áreas correspondentes ao céu foram representadas em pixels brancos e as obstruções, como edificações e vegetação, em pixels pretos. Em seguida, as imagens binarizadas foram analisadas com o programa Sky View Factor Calculator, desenvolvido pela Universidade de Gotemburgo (Lindberg; Holmer, 2012), que aplica o método de Johnson e Watson (1984) baseado em 45 anéis concêntricos com intervalo azimutal de 5°.



Foto 9: Lente olho de peixe de 180°

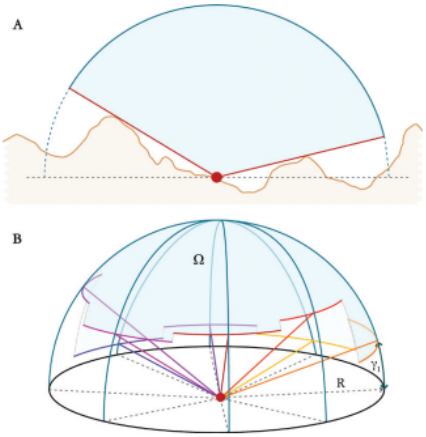


Figura 4: Esquema FVC[5]. fonte: Kokalj, Zakšek e Oštir (2013).

Essa abordagem permitiu identificar o grau de obstrução do céu e compreender a influência direta da forma urbana de Águas Claras sobre a ventilação, o sombreamento e o confinamento térmico. Pontos com baixos valores de FVC e altos índices de H/W apresentaram maior tendência ao aprisionamento de calor e à redução da ventilação, o que se reflete no aumento das temperaturas locais, conforme apontado por Oke (1988) e Ferreira (2022).

3.4. Delineamento e Análises

A pesquisa foi estruturada com base na coleta de dados ao longo de doze domingos consecutivos no trajeto selecionado e focado também em seis pontos fixos localizados em Águas Claras. A seleção dos pontos teve como objetivo representar diferentes contextos urbanos, como áreas verticalizadas, corredores

[5] O fator de visão do céu é definido como a proporção de céu visível (Ω) acima de um ponto de observação, conforme visualizado a partir de uma representação bidimensional (A). O algoritmo calcula o ângulo do horizonte (γ) em *n* direções até o raio especificado R (B).

viários e espaços com presença de vegetação, possibilitando a comparação entre ambientes de alta densidade e setores mais abertos.

As variáveis observadas incluíram temperatura do ar (°C), umidade relativa (%) e nos pontos fixos o Fator de Visão do Céu (FVC), concatenado os valores das coordenadas geográficas (latitude e longitude) para observar a localização.

O processo metodológico foi organizado em três etapas principais. Na primeira, procedeu-se à organização e pré-processamento dos dados, com a estruturação das planilhas em ambiente Excel e posterior importação para software estatístico. Nessa etapa, foram removidos registros incompletos ou inconsistentes e verificada a consistência temporal das séries.

Na segunda, realizaram-se análises descritivas, com cálculo de medidas de tendência central e dispersão (média, mediana, quartis e amplitude), além da construção de boxplots para avaliar a distribuição dos valores entre os pontos de coleta.

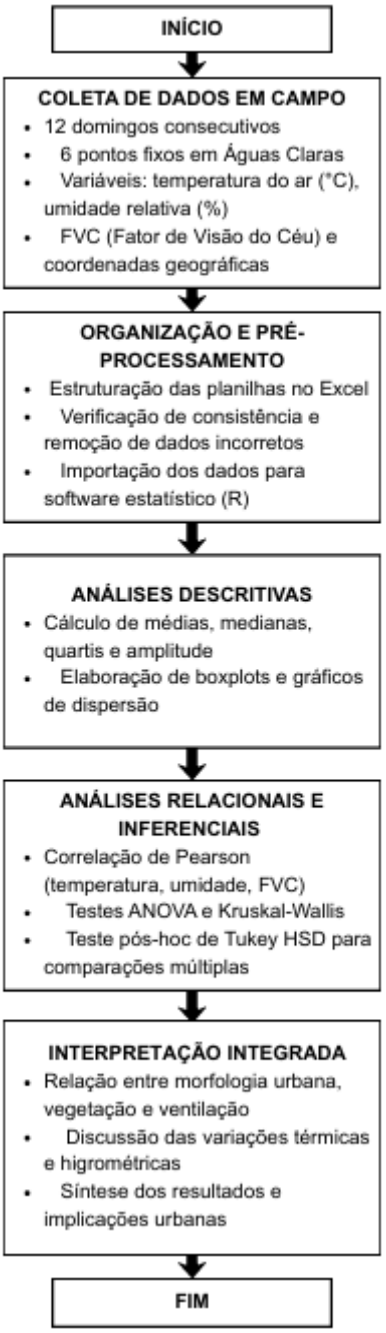
Na terceira etapa, buscou-se explorar as relações entre as variáveis observadas, por meio do cálculo de correlações de Pearson entre temperatura, umidade, FVC e morfologia urbana. Mapas de calor e diagramas de dispersão foram utilizados para representar graficamente as associações identificadas.

Além das análises descritivas, aplicaram-se testes estatísticos para verificar a significância das diferenças entre os pontos de coleta. Inicialmente, foi utilizado o teste ANOVA de um fator, destinado a comparar as médias de temperatura e umidade. Nos casos em que o pressuposto de normalidade não foi atendido, empregou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, mais robusto para distribuições irregulares.

Quando identificadas diferenças significativas, recorreu-se aos testes pós-hoc de Tukey HSD, que permitiram identificar em quais pares de pontos as diferenças ocorreram.

Esse conjunto de procedimentos possibilitou uma análise detalhada do comportamento microclimático de Águas Claras, permitindo compreender de que

forma o adensamento urbano, a ventilação e a presença de vegetação influenciam a variação térmica e higrométrica ao nível do pedestre.



fonte: autor

3.5. Elaboração do Mapa de Distribuição Espacial a partir de Dados Pontuais

Os mapas de distribuição espacial foram elaborados para representar, de forma contínua, as variáveis registradas durante os transectos móveis noturnos: temperatura do ar e umidade relativa. O objetivo foi visualizar os gradientes espaciais dessas variáveis e compreender como o ambiente construído interfere na dinâmica termo-higrométrica do espaço urbano.

O processamento foi realizado integralmente no software QGIS (versão 3.16.16), abrangendo as etapas de tratamento dos dados pontuais, interpolação e elaboração cartográfica final.

Inicialmente, verificou-se que as coordenadas geográficas apresentavam erro de formatação, pois haviam sido exportadas como inteiros multiplicados por 1.000.000. Para corrigir esse problema, utilizou-se a ferramenta “Geometria por Expressão” do QGIS.

Essa operação ajustou as coordenadas para o formato decimal adequado. Em seguida, a camada foi configurada no sistema de referência SIRGAS 2000 (EPSG:4674) e reprojetada para SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S (EPSG:31983), garantindo compatibilidade com as demais bases cartográficas e precisão métrica nos cálculos espaciais.

Os valores de temperatura e umidade registrados em campo foram interpolados pelo método IDW (Inverse Distance Weighting), técnica determinística amplamente utilizada em estudos geográficos e ambientais. O método baseia-se no princípio de que a influência de um ponto diminui à medida que a distância aumenta, conforme o primeiro princípio da geografia formulado por Tobler (1970).

O parâmetro de ponderação adotado foi P = 2, conferindo maior peso aos pontos próximos e realçando as variações locais. A interpolação foi restrita ao limite urbano de Águas Claras e executada com resolução espacial de 5 metros, valor que equilibra detalhamento visual e desempenho computacional. Essa resolução foi considerada suficiente para representar adequadamente as variações espaciais detectadas sem induzir falsas precisões.

O resultado da interpolação foi representado sob a forma de mapa de calor, utilizando simbologia contínua de cores que varia do azul (valores mais baixos) ao vermelho (valores mais altos), passando por verde e amarelo nas faixas intermediárias. Essa paleta foi escolhida por favorecer a leitura intuitiva e corresponder às convenções visuais da cartografia temática.

O azul indica áreas mais frescas e úmidas, normalmente associadas à vegetação e à ventilação; o verde e o amarelo representam transições térmicas; e o vermelho expressa zonas de maior aquecimento e menor umidade, indicando possíveis áreas de ilha de calor.

A composição final foi elaborada no Compositor de Layout do QGIS, incluindo título, legenda, escala gráfica, norte, fonte dos dados e autoria. O mapa foi exportado em formato PNG, com resolução de 600 dpi, assegurando qualidade para impressão e inserção na dissertação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise Sinótica

A interpretação dos resultados obtidos em Águas Claras foi complementada pela análise sinótica dos dias correspondentes aos campos, de modo a compreender de que forma os sistemas atmosféricos atuantes em escala regional influenciaram os padrões térmicos e higrométricos locais. Essa abordagem é fundamental, pois o clima urbano, embora condicionado pela morfologia da cidade, está integrado ao sistema climático regional e depende das trocas de energia e massa entre a superfície e a atmosfera (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

A análise foi realizada a partir da leitura das cartas sinóticas disponibilizadas pelo INMET e pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), complementada pelos dados da estação meteorológica de referência localizada no Sudoeste (INMET/A001 – Brasília). Para garantir a coerência com os horários das campanhas de campo, foram privilegiadas as observações noturnas realizadas às 21h, horário oficial de Brasília (00Z UTC do dia seguinte). Esses dados foram confrontados com a circulação atmosférica de grande escala, destacando-se a atuação das massas de ar, a influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a penetração de frentes frias e a presença de sistemas convectivos associados à transição da estação seca para o período chuvoso.

4.1.1. Análise de Setembro

No primeiro campo, 01 de setembro de 2024 (00 UTC de 02/09) as cartas (em anexo) sinóticas mostravam no início do mês a permanência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), reforçando a estabilidade atmosférica sobre o Centro-Oeste. O Distrito Federal esteve sob domínio da Massa Tropical Atlântica (mTa), já bastante continentalizada, o que resultou em tempo seco, céu limpo e ausência de instabilidades locais. Às 21h, a estação do Sudoeste registrou 23,1 °C e umidade relativa de apenas 33%, com pressão atmosférica em 890,1 hPa. O vento era fraco, de sudeste (140°), com velocidade de 1,0 m s^{-1}. Não houve precipitação. A configuração sinótica desse dia refletiu de maneira típica a estação seca no Planalto Central, marcada por noites relativamente quentes e baixa umidade, reforçando o quadro de desconforto higrotérmico.

No segundo campo, 08 de setembro de 2024 (00 UTC de 09/09), a ASAS ainda exercia forte influência sobre o continente, mantendo a Massa Tropical Atlântica em situação de estabilidade. As cartas sinóticas indicavam frentes frias restritas ao Sul do país, sem avanço significativo para o interior. As imagens do satélite GOES-16 reforçaram esse padrão de estabilidade atmosférica. No canal 08 (vapor d'água – 6,2 μm), observou-se ampla área em tons amarelados sobre o Centro-Oeste e o Distrito Federal, indicando ar seco em níveis médios e altos da troposfera, resultado da subsidência associada à Alta Subtropical do Atlântico Sul. Nos canais 13 (10,3 μm) e 14 (11,2 μm), correspondentes ao infravermelho termal, predominavam tons de cinza claro sobre o Brasil central, evidenciando ausência de nebulosidade significativa e temperaturas de brilho elevadas, coerentes com a presença de céu limpo e aquecimento radiativo diurno. As formações convectivas mais intensas concentravam-se sobre o extremo norte da América do Sul e no Pacífico, distantes da área de estudo. No Distrito Federal, às 21h, a temperatura registrada foi de 23,1 °C, com umidade relativa de 34%. A pressão atmosférica estava em 889,3 hPa, e o vento soprava de leste (90°) a 5,1 m s^{-1}, intensidade pouco comum para o horário noturno na região. A ausência de precipitação e a nebulosidade reduzida mantiveram o padrão seco, embora o vento tenha contribuído para leve resfriamento térmico. A atuação da ASAS prosseguia firme, com o DF ainda sob a influência da mTa continentalizada. As condições sinóticas e as imagens de satélite não mostravam perturbações significativas na região central do Brasil. A estação meteorológica apontou 22,8 °C de temperatura e 31% de umidade relativa, com pressão em 890,5 hPa. O vento manteve-se de sudeste (140°), a 5,1 m s^{-1}. Embora os valores fossem semelhantes ao dia anterior, a ligeira queda de temperatura reforça a continuidade de noites secas, sem mudanças expressivas no padrão climático.

No terceiro campo, 15 de setembro de 2024 (00 UTC de 16/09), as cartas sinóticas revelavam o enfraquecimento parcial da ASAS e a presença de sistemas frontais sobre o Sul do Brasil, mas sem penetração até o Planalto Central. O Distrito Federal manteve-se sob o domínio da Massa Tropical Atlântica, ainda seca e aquecida. As imagens do satélite GOES-16 (em anexo) reforçaram esse padrão atmosférico. No canal 08 (vapor d'água – 6,2 μm), observou-se ampla área em tons amarelados sobre o Centro-Oeste, representando ar seco em níveis médios e altos

da troposfera, associado à subsidência imposta pela Alta Subtropical do Atlântico Sul. Nos canais 13 (10,3 μm) e 14 (11,2 μm), correspondentes ao infravermelho termal, predominaram tons de cinza-claro e ausência de núcleos convectivos sobre o DF, indicando estabilidade e céu praticamente limpo. As formações convectivas mais expressivas concentravam-se sobre a Amazônia Ocidental e o noroeste da América do Sul, enquanto uma extensa faixa de nebulosidade se organizava sobre o extremo Sul do continente, em associação à frente fria identificada nas cartas sinóticas. No Distrito Federal, às 21h, registraram-se 24,9 °C de temperatura e 32% de umidade relativa, com pressão em 888,5 hPa. O vento vinha de nordeste (50°) a 3,1 m s^{-1}. A leve mudança na direção do vento indica oscilação no padrão de circulação, embora a massa de ar dominante ainda fosse seca. O quadro atmosférico pouco se alterou em relação ao dia anterior: a ASAS permanecia atuante, sustentando a massa tropical continentalizada sobre o Centro-Oeste. Às 21h, a estação registrou novamente 24,9 °C, mas com umidade relativa ainda mais baixa, de 25%. A pressão esteve em 888,3 hPa, e o vento soprou de sudeste (140°), a 2,1 m s^{-1}. O cenário reforça a secura do ar e o desconforto noturno, em linha com a persistência do período seco e a ausência de perturbações atmosféricas significativas sobre o Distrito Federal.

No quarto campo, 22 de setembro de 2024 (00 UTC de 23/09), as cartas sinóticas (em anexo) mostravam maior instabilidade no sul do continente, com um sistema frontal atuando entre o Uruguai e o Sudeste brasileiro e um cavado pré-frontal estendendo-se até o interior do país. A Alta Subtropical do Atlântico Sul apresentava leve recuo para o oceano, permitindo maior variabilidade atmosférica sobre o interior. As imagens do GOES-16 (em anexo) confirmaram esse cenário: no canal 08 (vapor d'água – 6,2 μm), observou-se uma mancha azul sobre o Distrito Federal, indicando aumento da umidade em níveis médios da troposfera e início do transporte de vapor d'água proveniente do norte/noroeste, típico da circulação pré-frontal e da advecção de umidade amazônica. Essa condição contrasta com os tons amarelados que predominaram nos campos anteriores, sinalizando o enfraquecimento da subsidência imposta pela ASAS. Nos canais 13 (10,3 μm) e 14 (11,2 μm), correspondentes ao infravermelho termal, notaram-se nuvens médias e altas difusas, sem convecção profunda, coerentes com o processo de reumidificação e transição entre o período seco e a pré-estação chuvosa. Enquanto

isso, o Sul e o Sudeste apresentavam núcleos convectivos intensos e bem definidos, associados ao avanço da frente fria, evidenciando forte contraste térmico entre as regiões. No Distrito Federal, às 21h, registraram-se 25,7 °C e 32% de umidade relativa, com pressão de 886,2 hPa e vento calmo, favorecendo a estagnação do ar. O aquecimento diurno foi intenso, com máxima acima dos 30°C, contribuindo para a manutenção da secura nos baixos níveis, embora a umidade em altitude já indicasse mudança no padrão atmosférico. O cenário reflete o enfraquecimento gradual da ASAS e a chegada de umidade amazônica aos níveis médios, marcando o prenúncio da retomada do regime úmido no Centro-Oeste.

No último domingo do mês, 29 de setembro de 2024 (00 UTC de 30/09), as cartas sinóticas indicaram a atuação de uma crista anticiclônica em situação de pós-frontal tardia. O Distrito Federal esteve sob influência de uma Massa Polar Atlântica (mPa) já modificada, em interação com a Massa Tropical Atlântica (mTa), o que trouxe condições ligeiramente mais amenas em relação às semanas anteriores. As imagens do satélite GOES-16 (em anexo) confirmam esse comportamento atmosférico. No canal 08 (vapor d'água – 6,2 μm), observou-se redução significativa dos tons amarelados sobre o Centro-Oeste, com predomínio de colorações azuladas sobre o Distrito Federal, indicando aumento da umidade em níveis médios da troposfera e atenuação da subsidência característica da ASAS. Essa reumidificação está relacionada à circulação de retorno da mPa modificada e à incursão de ar mais frio e úmido em altitude. Nos canais 13 (10,3 μm) e 14 (11,2 μm), do infravermelho termal, verificaram-se formações nebulosas difusas e isoladas no Centro-Oeste, com núcleos convectivos intensos restritos à Amazônia e ao litoral norte, enquanto o Sul do país ainda apresentava a frente fria associada ao sistema pós-frontal. No DF, o predomínio foi de céu limpo e estabilidade atmosférica, sem registro de precipitação. Às 21h, os dados da estação meteorológica indicaram 25,2 °C e umidade relativa de 44%, valores mais elevados em comparação às noites anteriores. A pressão atmosférica foi de 887,3 hPa, e o vento soprou de sudeste (140°) a 2,1 m s^{-1}. Essa configuração pós-frontal, ainda que enfraquecida, favoreceu uma discreta recuperação da umidade relativa e interrompeu parcialmente o padrão de noites excessivamente secas que predominara ao longo de setembro. As imagens do GOES e as cartas sinóticas, portanto, evidenciam o início de uma breve estabilização atmosférica, marcada pela

substituição gradual da massa tropical continentalizada por uma massa de ar mais úmida e amena, sinalizando o declínio definitivo do período seco sobre o Planalto Central.

Tabela 02 – análise de setembro

Data	T (°C)	UR (%)	Pressão (hPa)	Direção do Vento	Vel. (m/s)	Precip. (mm)	Sistema Atmosférico
02/09/24	23,1	33	890,1	SE (140°)	1,0	0,0	Massa Tropical Atlântica (ASAS)
08/09/24	23,1	34	889,3	E (90°)	5,1	0,0	ASAS intensa / mTa seca
09/09/24	22,8	31	890,5	SE (140°)	5,1	0,0	ASAS / predomínio de estabilidade
15/09/24	24,9	32	888,5	NE (50°)	3,1	0,0	ASAS enfraquecida / circulação local
16/09/24	24,9	25	888,3	SE (140°)	2,1	0,0	Massa Tropical Atlântica seca
22/09/24	25,7	32	886,2	Calmo	0,0	0,0	Pré-instabilidade, aproximação de sistemas ao Sul
23/09/24	26,4	29	886,2	Calmo	0,0	0,0	Transição seca → úmida
29/09/24	28,2	31	885,9	E (90°)	1,0	0,0	ASAS enfraquecida / calor persistente

30/09/24	25,2	44	887,3	SE (140°)	2,1	0,0	Pós-frontal tardia / mPa modificada

4.1.2. Análise de Outubro

No sexto campo, 06 de outubro de 2024 (00 UTC de 07/10) as cartas sinóticas evidenciaram a atuação persistente da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), mantendo o domínio da Massa Tropical Atlântica (mTa) sobre o Centro-Oeste. O cenário sinótico mostrava estabilidade, com frentes frias restritas ao Sul do país, sem capacidade de penetração para latitudes mais baixas. No Distrito Federal, às 21h, a estação do Sudoeste registrou 27,5 °C e umidade relativa de apenas 28%, valores indicativos de forte secura atmosférica. A pressão estava em 884,6 hPa, sem registro de vento. A ausência de nebulosidade e precipitação reforça o caráter da transição inicial, quando as altas temperaturas diurnas prolongam-se até a noite, mantendo o desconforto térmico noturno. O quadro atmosférico manteve-se praticamente inalterado em relação ao dia anterior. A ASAS continuava sustentando a massa tropical seca sobre o Planalto Central, sem interferência de instabilidades vindas do Sul. À noite, a estação meteorológica registrou 27,7 °C e umidade relativa de 41%, com pressão em 884,9 hPa. O vento permaneceu calmo, sem influência significativa na circulação local. A noite foi novamente quente e seca, reflexo do prolongamento da estação seca, embora com discreta recuperação da umidade em relação ao dia anterior.

No sétimo campo, 13 de outubro de 2024 (00 UTC de 14/10), a segunda semana de outubro marcou uma mudança importante. As cartas sinóticas indicaram a presença de uma frente fria avançando pelo Sudeste, associada a um canal de umidade proveniente da Amazônia. O Distrito Federal passou a receber maior aporte de umidade em baixos níveis, favorecendo instabilidades isoladas. Na leitura noturna, a estação registrou 23,2 °C e umidade de 77%, com pressão em 889,1 hPa. O vento era de sudeste (140°), a 2,1 m s^{-1}, e houve registro de 20 mm de precipitação acumulada no dia. A queda da temperatura noturna e o aumento expressivo da umidade caracterizam o início efetivo da pré-estação chuvosa no Planalto Central. As condições úmidas se mantiveram, ainda que sem precipitação

significativa. A frente fria atuava sobre o Sudeste, e o Centro-Oeste permanecia sob influência da mTa com advecção de umidade amazônica. Às 21h, a estação marcou 25,1 °C e 59% de umidade relativa, com pressão atmosférica em 890,5 hPa. O vento esteve calmo. Esse padrão mostra a permanência da instabilidade em segundo plano, com atmosfera já úmida e mais amena em comparação ao início do mês.

No oitavo campo, 20 de outubro de 2024 (00 UTC de 21/10), as cartas sinóticas (em anexo) mostraram a atuação de uma frente fria mais organizada, que avançava sobre o Sudeste e influenciava o transporte de umidade para o interior. O Distrito Federal esteve sob condições úmidas, resultado da interação entre a frente fria e a circulação de ventos de noroeste em baixos níveis.

Na leitura noturna, foram registrados 19,1 °C e UR de 93%, com pressão em 883,3 hPa. A precipitação acumulada chegou a 3,2 mm, evidenciando a instabilidade local. O resfriamento noturno mais acentuado, em comparação às semanas anteriores, marcou um ponto de transição para o regime úmido. Às 21h, a massa úmida persistiu sobre o Centro-Oeste. As instabilidades perderam intensidade, mas mantiveram a atmosfera saturada. A estação registrou 21,7 °C e umidade relativa de 80%, pressão em 885,2 hPa. O vento permaneceu calmo e não houve precipitação. Ainda assim, o padrão já consolidava a umidade típica da primavera, com noites menos quentes e maior conforto térmico.

No último campo de outubro, em 27 de outubro de 2024 (00 UTC de 28/10), as imagens do GOES-16 e GOES-19 (em anexo), associadas às cartas sinóticas da Marinha do Brasil, mostravam o predomínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul sobre o Atlântico e a presença de uma frente fria restrita ao Sul do país. Sobre o Centro-Oeste, observou-se a atuação de ar seco em níveis médios e altos, evidenciado pelos tons amarelados na imagem de vapor d’água (canal 08 – 6,2 μm), indicativos de subsidência atmosférica. Nos canais infravermelhos (13 e 14), verificou-se ausência de núcleos convectivos intensos sobre o Distrito Federal, o que confirma o predomínio de estabilidade regional. Apesar disso, os registros de superfície indicaram aumento da umidade nos níveis baixos e ocorrência de precipitação leve e isolada. Às 21h, a estação meteorológica registrou temperatura de 23,5 °C e umidade relativa de 73%, com pressão de 886,9 hPa e vento calmo. A

precipitação acumulada diária foi de 8 mm, caracterizando a consolidação da pré-estação chuvosa, marcada por episódios convectivos locais e instabilidade de pequena escala. O padrão atmosférico indica continuidade do processo de transição para o regime úmido, com manutenção da umidade elevada no ambiente noturno, mas sem a organização de sistemas convectivos de maior intensidade.

Tabela 03 – análise de outubro

Data	T (°C)	UR (%)	Pressão (hPa)	Direção do Vento	Vel. (m/s)	Precip. (mm)	Sistema Atmosférico
06/10/24	27,5	28	884,6	Calmo	0,0	0,0	ASAS predominante / calor seco
07/10/24	27,7	41	884,9	Calmo	0,0	0,0	Massa Tropical Atlântica seca
13/10/24	23,2	77	889,1	SE (140°)	2,1	20,0	Frente fria / advecção de umidade amazônica
14/10/24	25,1	59	890,5	Calmo	0,0	0,0	Pré-estação chuvosa consolidando-se
20/10/24	19,1	93	883,3	Calmo	0,0	3,2	Frente fria / instabilidades tropicais
21/10/24	21,7	80	885,2	Calmo	0,0	0,0	Massa úmida pós-frontal
27/10/24	23,5	73	886,9	Calmo	0,0	8,0	Áreas de instabilidade / advecção de umidade

28/10/24	22,8	79	887,5	Calmo	0,0	0,0	Massa úmida instável

4.1.3. Análise de Novembro

No nono campo, 3 de novembro de 2024 (00 UTC de 04/11), as cartas sinóticas evidenciaram um padrão típico de início de estação chuvosa no Centro-Oeste, com a formação de instabilidades tropicais sustentadas pelo forte aporte de umidade proveniente da Amazônia e pelo enfraquecimento progressivo da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Um cavado em baixos níveis, estendendo-se do norte do Mato Grosso ao centro de Goiás, favoreceu o desenvolvimento de nebulosidade convectiva, enquanto um sistema frontal avançava sobre o Sul do continente, reforçando a convergência de umidade na faixa central do país. As imagens do GOES-16 (em anexo) confirmam essa configuração atmosférica. No canal 08 (vapor d'água – 6,2 μm), observou-se ampla área com tons azulados e esbranquiçados sobre o Brasil Central, incluindo o Distrito Federal, indicando elevada umidade em níveis médios da troposfera. Essa faixa de umidade se conectava à região amazônica, mostrando a presença da circulação de noroeste, responsável pelo transporte de vapor d'água em direção ao Planalto Central. Nos canais 13 (10,3 μm) e 14 (11,2 μm), foram observados núcleos convectivos bem definidos sobre Goiás, Mato Grosso e norte de Minas Gerais, com topos de nuvens frios e densos, característicos de células convectivas ativas. Embora o Distrito Federal estivesse sob céu predominantemente nublado, a convecção mais intensa se concentrou a norte e nordeste da região. Às 21h, a estação meteorológica do DF registrou 20,7 °C e umidade relativa de 87%, com pressão de 885,3 hPa e vento calmo. Houve registro de 0,2 mm de precipitação, configurando chuva fraca e isolada. A noite apresentou condições úmidas e temperatura amena, reflexo da saturação atmosférica. Mais tarde, o cenário manteve-se instável, embora sem precipitação significativa. Às 23h, os dados apontaram 23,1 °C, UR de 76% e pressão em 884,5 hPa, com vento de leste (90°) a 2,1 m s^{-1}. Essas condições caracterizam a transição definitiva para o regime úmido na região, com umidade abundante em baixos e médios níveis, ausência de subsidência marcante e presença de sistemas convectivos associados à massa tropical úmida. A noite de 3

de novembro marcou, portanto, o estabelecimento de um ambiente termodinâmico favorável à manutenção de chuvas esparsas e à consolidação da estação chuvosa sobre o Distrito Federal.

No décimo campo, 10 de novembro de 2024 (00 UTC de 11/11), as cartas sinóticas indicaram a presença de uma extensa área de instabilidade sobre o interior do Brasil, associada à circulação de noroeste em baixos níveis, responsável pelo transporte contínuo de umidade da Amazônia em direção ao Centro-Oeste. Essa configuração marcou o estabelecimento pleno do regime úmido, com grande disponibilidade de vapor d'água e atmosfera termodinamicamente instável. O GOES-16 confirmou esse padrão: no canal 08 (vapor d'água – 6,2 μm), observou-se expressiva mancha sobre o Centro-Oeste, especialmente abrangendo o Distrito Federal, indicando altos índices de vapor d'água e intensa atividade convectiva em níveis médios da troposfera. Esse cinturão úmido estendia-se desde o norte da Amazônia até o Sudeste, em contraste com as áreas de subsidência sobre o oceano e o sul do continente. Nos canais 13 (10,3 μm) e 14 (11,2 μm), verificou-se a presença de núcleos convectivos bem desenvolvidos na Amazônia, norte de Goiás e parte do Mato Grosso, com topos de nuvens frios, sinalizando convecção profunda e forte atividade de trovoadas, embora o DF tenha permanecido sob nebulosidade alta e difusa, sem chuva registrada. Às 21h, a estação meteorológica registrou 19,4 °C e umidade relativa de 91%, pressão em 885,9 hPa e vento fraco de noroeste (320°) a 1,0 m s^{-1}. O ambiente era saturado e a sensação térmica, amena, em contraste com as semanas anteriores marcadas por ar seco. No fim do dia, o padrão manteve-se instável, com alta umidade em baixos níveis e ausência de ventos significativos. A nova leitura, feita posteriormente, indicou 21,1°C, UR de 92% e pressão em 884,2 hPa, com vento calmo. Assim, o Distrito Federal experimentou uma noite típica da transição final para a estação chuvosa, caracterizada por saturação atmosférica, resfriamento noturno acentuado e predomínio de ar úmido em toda a camada limite.

No penúltimo campo, 17 de novembro de 2024 (00 UTC de 18/11), as cartas sinóticas indicaram instabilidades tropicais atuando em todo o Centro-Oeste, associadas à convergência de umidade amazônica. Às 21h, a estação registrou 20,9 °C e UR de 83%, pressão em 886,6 hPa, com vento de nordeste (50°) a 3,1 m

s^{-1}. A precipitação diária foi de 2,3 mm. O cenário confirma a presença de instabilidade e a consolidação da primavera chuvosa. No fim da noite, a atmosfera esteve quase saturada. As cartas mostraram permanência de instabilidades tropicais, sem organização de frentes. A estação marcou 19,1 °C e UR de 98%, pressão em 885,3 hPa. O vento esteve calmo, e não houve precipitação registrada. O dia reforça a característica de umidade extrema no ambiente noturno.

No último campo, 24 de novembro de 2024 (00 UTC de 25/11), as instabilidades persistiram, associadas ao transporte de umidade. O DF esteve sob condições úmidas, com registro de precipitação. Às 21h, os dados apontaram 20,6 °C e UR de 93%, pressão de 885,4 hPa. O vento esteve calmo, e a precipitação acumulada foi de 4,3 mm. A noite mostrou-se fresca e saturada. A atmosfera seguiu úmida no fim do dia, embora sem chuva. As cartas mostraram instabilidades tropicais atuando no Centro-Oeste. Na estação, foram observados 20,1 °C e UR de 91%, pressão em 885,5 hPa, com vento de nordeste (50°) a 1,0 m s^{-1}. A noite reforça a consolidação da estação chuvosa, com umidade noturna persistentemente elevada.

Tabela 04 – análise de novembro

Data	T (°C)	UR (%)	Pressão (hPa)	Direção do Vento	Vel. (m/s)	Precip. (mm)	Sistema Atmosférico
03/11/24	20,7	87	885,3	Calmo	0,0	0,2	Instabilidade tropical difusa
04/11/24	23,1	76	884,5	E (90°)	2,1	0,0	Influência marítima / mTa úmida
10/11/24	19,4	91	885,9	NW (320°)	1,0	0,0	Atmosfera saturada / pré-instabilidade

11/11/24	21,1	92	884,2	Calmo	0,0	0,0	Massa úmida tropical estabilizada
17/11/24	20,9	83	886,6	NE (50°)	3,1	2,3	Instabilidades tropicais ativas
18/11/24	19,1	98	885,3	Calmo	0,0	0,0	Atmosfera saturada / início pleno do regime chuvoso
24/11/24	20,6	93	885,4	Calmo	0,0	4,3	Instabilidade úmida / convergência local
25/11/24	20,1	91	885,5	NE (50°)	1,0	0,0	Massa úmida tropical persistente

---

A análise conjunta das cartas sinóticas, das imagens do satélite GOES-16/19 (em anexo) e dos registros da estação meteorológica do INMET/Sudoeste permitiu compreender com clareza a transição entre a estação seca e o estabelecimento do regime chuvoso no Distrito Federal entre setembro e novembro de 2024. Esse contexto sinóptico é fundamental para a interpretação das medições realizadas em Águas Claras, pois os sistemas atmosféricos de grande escala condicionaram diretamente as variações microclimáticas observadas nos transectos móveis e nos pontos fixos analisados.

Em setembro, as cartas sinóticas (em anexo) indicaram a persistência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), responsável por sustentar a Massa Tropical Atlântica (mTa) sobre o Planalto Central. Essa configuração manteve condições de forte subsidência, inibição de convecção e céu predominantemente limpo. Nas imagens do Canal 08 (6,2 μm), observou-se extensa área em tons amarelos sobre o Centro-Oeste, evidenciando ar seco na média troposfera, enquanto os canais 13 e 14 (10,3 e 11,2 μm) revelaram temperaturas de brilho elevadas e ausência de

nebulosidade significativa sobre o DF. Essa situação resultou em noites quentes e secas, com temperaturas acima de 23 °C e umidade relativa inferior a 35%, reflexo da continentalização da massa tropical. Apenas no final do mês, em 30/09, a penetração de uma Massa Polar Atlântica (mPa) enfraquecida provocou leve recuperação da umidade (44%), interrompendo momentaneamente o padrão de estiagem. Essa leve alteração atmosférica foi perceptível nos registros de campo, que mantiveram amplitudes térmicas acentuadas e baixa umidade, coerentes com o cenário de estabilidade imposto pela ASAS.

Em outubro, iniciou-se a mudança do padrão atmosférico. As cartas sinóticas de meados do mês mostraram a aproximação de sistemas frontais pelo Sudeste e a intensificação do transporte de umidade amazônica em baixos níveis. Nas imagens do GOES-16, a partir de 14/10, o Canal 08 passou a indicar maior presença de umidade em tons azulados sobre o Centro-Oeste e o sul da Amazônia, enquanto os Canais 13 e 14 revelaram áreas convectivas organizadas sobre Goiás e o Distrito Federal. Essa configuração coincidiu com os primeiros registros pluviométricos significativos, como 20 mm em 13/10, seguidos por eventos de 3,2 mm em 20/10 e 8 mm em 27/10. Durante esse período, a umidade noturna aumentou para valores próximos de 80%, e as temperaturas oscilaram entre 19 °C e 23 °C, indicando o início do processo de resfriamento radiativo associado à presença de nebulosidade. Em Águas Claras, observou-se a redução das diferenças microclimáticas entre os pontos verticalizados e as áreas mais arborizadas, uma vez que o aumento da umidade atmosférica reduziu o contraste térmico intraurbano.

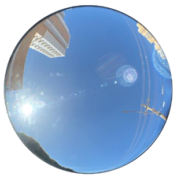
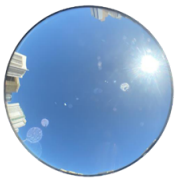
Em novembro, consolidou-se o regime chuvoso sobre o Distrito Federal. As imagens do Canal 08 mostraram a presença contínua de vapor d’água em toda a região central do Brasil, com tonalidades azuladas profundas e núcleos convectivos intensos em verde, associados a áreas de convergência de umidade vindas da Amazônia. Os Canais 13 e 14 evidenciaram a formação frequente de sistemas convectivos tropicais e nebulosidade profunda, confirmando a instalação definitiva das condições úmidas. As noites tornaram-se mais amenas, com temperaturas entre 19 °C e 21 °C, e umidade relativa constantemente elevada, frequentemente acima de 90%. Destaca-se o dia 18/11, quando a atmosfera esteve praticamente saturada (98%). Embora irregulares, as precipitações se tornaram recorrentes (0,2

mm em 03/11, 2,3 mm em 17/11 e 4,3 mm em 24/11) indicando o predomínio de instabilidades tropicais sustentadas pela advecção de umidade e pela desorganização definitiva da ASAS. Em Águas Claras, essa nova configuração atmosférica resultou em maior umidade noturna e redução das amplitudes térmicas locais, evidenciando o papel do aumento da umidade no equilíbrio térmico urbano.

4.2. Fator de Visão do Céu (FVC)

O cálculo do Fator de Visão do Céu (FVC) nos seis pontos selecionados revelou variações significativas (Tabela 5).

Tabela 5 - Fator de Visão do Céu

					
Ponto 1 [X: -48,0235110 Y: -15,8412594] FVC: 0,789	Ponto 2 [X: -48,00921290 Y: -15,8376635] FVC: 0,940	Ponto 3 [X: -48,0401113 Y: -15,8341228] FVC: 0,985	Ponto 4 [X: -48,0393776 Y: -15,8367127] FVC: 0,606	Ponto 5 [X: -48,0327329 Y: -15,832859] FVC: 0,554	Ponto 6 [X: -48,0291966 Y: -15,837153] FVC: 0,562
					

O Ponto 3 apresentou o maior FVC, com um valor de 0,985, indicando uma ampla visão do céu nesta área. O Ponto 2 também apresentou um FVC elevado de 0,940, sugerindo boas condições de visibilidade do céu. Em contraste, o Ponto 5, localizado no Parque de Águas Claras, registrou o menor FVC com 0,554, um valor bastante próximo ao do Ponto 6, que obteve 0,562. Essas variações no FVC refletem diferenças na cobertura de edificações e vegetação, influenciando a quantidade de céu visível e, consequentemente, o microclima associado a cada local.

4.3. Transecto Móvel

Observa-se que a quantidade de observações entre os pontos fixos de coleta apresenta variação considerável. As coletas entre o Ponto 1 concentra a maior parte dos registros (26,7%), seguido de perto pelo Ponto 4 (25,4%) e pelo Ponto 2 (23,0%). Esses três pontos somam juntos mais de 75% das medições realizadas, evidenciando maior representatividade. Já os Pontos 3, 5 e 6 apresentam frequências bem menores, variando entre 7,6% e 9,1% do total, o que indica menor disponibilidade de dados nesses locais. Essa distribuição reflete diretamente a etapa de preparação do banco de dados, em que parte das observações precisou ser descartada devido a inconsistências. Assim, o desequilíbrio entre os pontos não está relacionado a falhas na coleta em campo, mas ao tratamento necessário para garantir a qualidade da base.

Tabela 6: Número e proporção de observações por ponto fixo:

Ponto	n	pct
Ponto1	993	26.7
Ponto 2	855	23.0
Ponto 3	283	7.6
Ponto 4	944	25.4
Ponto 5	307	8.3
Ponto 6	337	9.1

A análise da distribuição de temperaturas por ponto de coleta mostra certa consistência nos valores registrados entre os diferentes locais. A maior parte das medições concentrou-se entre 22°C e 27°C, com medianas próximas a 24 - 25°C em praticamente todos os pontos. Observa-se que: O Ponto 6 apresentou a mediana mais alta, em torno de 25,5°C, sugerindo uma tendência de temperaturas ligeiramente superiores. Já o Ponto 2 concentrou temperaturas mais baixas, com mediana em 23,9°C. A amplitude de variação não é muito discrepante, mas nota-se que pontos como Ponto 1 e Ponto 6 apresentam caudas mais alongadas, indicando situações de maior variabilidade local. Essas diferenças podem estar associadas tanto a condições microclimáticas específicas (como maior presença de áreas

construídas ou de vegetação) quanto ao efeito da posição geográfica de cada ponto de coleta.

Tabela 7: Resumo estatístico da Temperatura por Ponto de Coleta

Ponto	Min	Q1	Mediana	Média	Q3	Max	n
Ponto 1	20.8	22.9	24.4	24.75770	26.7	28.6	993
Ponto 2	21.6	22.5	22.8	23.92117	25.9	29.3	855
Ponto 3	20.8	23.7	24.9	24.66572	26.2	27.7	283
Ponto 4	20.8	21.7	24.3	24.34227	26.3	27.9	944
Ponto 5	20.8	23.1	24.2	24.43453	25.6	27.6	307
Ponto 6	20.9	21.7	25.5	24.21632	26.4	27.6	337

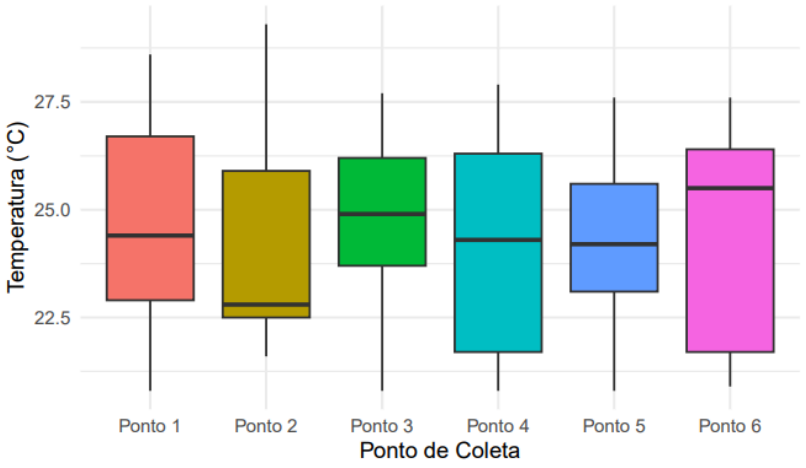


Gráfico 1 - Distribuição da Temperatura por Ponto de Coleta

No caso da umidade relativa, os resultados mostraram maior dispersão entre os pontos quando comparados à temperatura. Principais destaques: Os caminhos entre os pontos 1, 2 e 4 apresentaram as medianas mais elevadas (acima de 70%), indicando locais com tendência a maior retenção de umidade no ar. O Ponto 3 se destacou por apresentar valores muito baixos em algumas observações, chegando a cerca de 30%, o que ampliou bastante a dispersão do boxplot e pode indicar falha pontual de medição ou características locais muito específicas. O Ponto 6 também registrou uma grande variação, oscilando entre valores muito baixos (cerca de 25%) e elevados (acima de 85%), o que sugere instabilidade ou forte influência de condições ambientais locais. De forma geral, a análise mostra que a umidade apresentou maior heterogeneidade entre os pontos em comparação à temperatura. Isso pode refletir tanto fatores ambientais (presença de vegetação, solo, tráfego urbano) quanto questões técnicas (perda de observações ou ruído nos sensores).

Tabela 8: Resumo estatístico da Umidade por Ponto de Coleta

Ponto	Min	Q1	Mediana	Média	Q3	Max	n
Ponto 1	23.5	52.100	72.0	64.57321	81.2	89.5	993
Ponto 2	24.6	62.000	74.9	73.10082	84.9	87.9	855
Ponto 3	24.8	26.000	29.7	49.36254	74.8	90.4	283
Ponto 4	23.4	54.475	72.5	63.39968	85.0	89.5	944
Ponto 5	25.4	54.500	64.8	63.68762	75.5	89.1	307
Ponto 6	24.3	28.900	62.3	60.36499	87.6	89.3	337

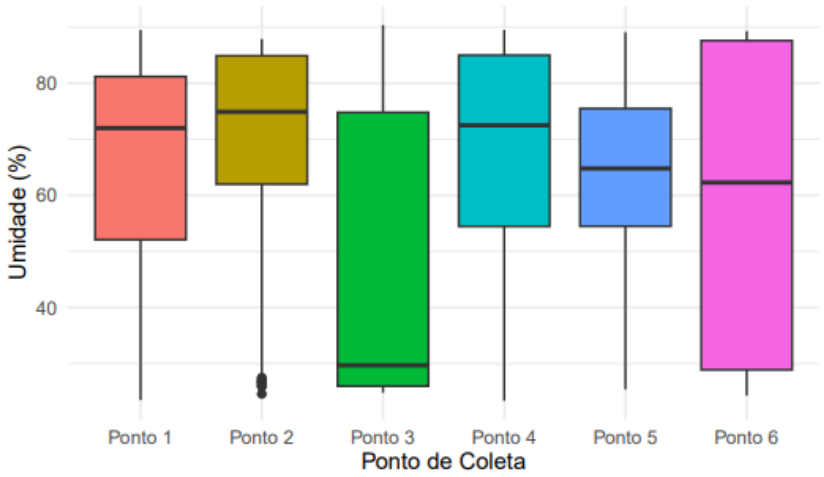


Gráfico 2 - Distribuição da Umidade por Ponto de Coleta

A análise das correlações revelou padrões importantes sobre a relação entre temperatura, umidade e as variáveis ambientais consideradas, o fator de visão do céu e a distância ao marco de referência. A temperatura e a umidade apresentaram uma correlação negativa forte (-0,71), o que confirma a relação inversa já esperada entre essas variáveis. Ou seja, à medida que a temperatura aumenta, a umidade relativa tende a diminuir. Esse padrão reflete a dinâmica básica do microclima urbano, em que condições mais quentes estão associadas a menor disponibilidade de umidade no ar.

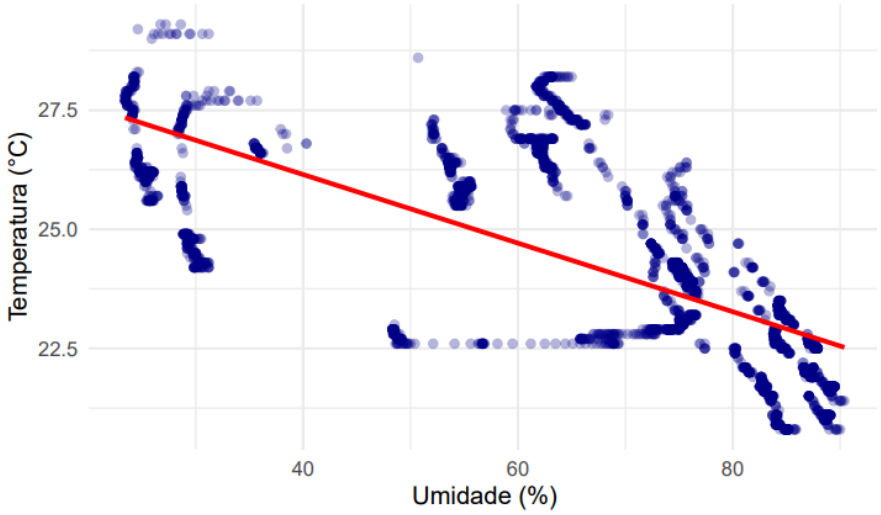


Gráfico 3 - Correlação entre temperatura e umidade

A correlação entre umidade e fator de visão do céu foi positiva e moderada (0,17), sugerindo que áreas com maior abertura do céu, possivelmente associadas à presença de vegetação ou menor adensamento, tendem a apresentar valores mais elevados de umidade relativa. Esse resultado reforça a importância da vegetação urbana como elemento regulador microclimático. A relação entre umidade e distância ao marco urbano central também se mostrou positiva, ainda que fraca (0,18), indicando que em pontos mais afastados, possivelmente com menor adensamento e maior presença de superfícies permeáveis, há maior retenção de umidade no ar.

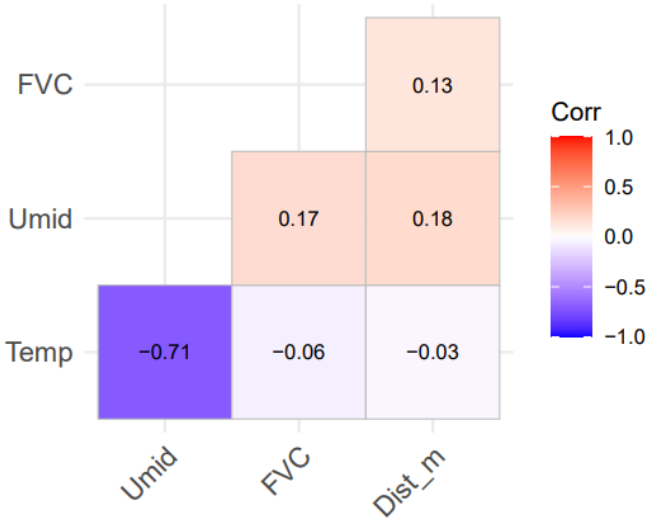


Gráfico 4 - Correlação entre variáveis ambientais e climáticas

Já as correlações entre temperatura e fator de visão do céu, assim como entre temperatura e distância, foram muito fracas (-0,06 e -0,03, respectivamente), o que indica que a variação da temperatura registrada nos pontos de medição não foi diretamente explicada por essas variáveis de forma linear simples. Em síntese, a relação mais marcante foi entre temperatura e umidade, conforme esperado em ambientes urbanos. Ainda que mais discretos, os vínculos positivos entre umidade, fator de visão do céu e distância reforçam a hipótese de que elementos ambientais, como a vegetação e o grau de adensamento, exercem papel relevante na mitigação parcial dos efeitos de aquecimento local.

Antes da aplicação da ANOVA, foi necessário verificar se os dados atendiam aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, uma vez que

esses critérios são fundamentais para a validade do teste. Para isso, foram empregados o teste de Shapiro-Wilk, que avalia a normalidade, e o teste de Levene, que verifica a homogeneidade das variâncias entre os grupos. O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado separadamente para cada ponto de coleta, tanto para os valores de temperatura quanto para os de umidade. Em todos os casos, os resultados apresentaram valores de p extremamente baixos ($p < 0,001$), indicando que os dados não seguem uma distribuição normal. Essa ausência de normalidade foi observada de forma consistente em todos os seis pontos analisados, tanto para temperatura quanto para umidade, o que significa que os dados apresentam assimetrias ou dispersões que os afastam de uma distribuição normal ideal. Em seguida, foi realizado o teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias entre os grupos. Os resultados mostraram, novamente, valores de p menores que 0,001 para ambas as variáveis, temperatura e umidade, evidenciando que as variâncias entre os diferentes pontos de coleta não são homogêneas. Essa falta de homogeneidade reforça a violação dos pressupostos necessários para a aplicação rigorosa da ANOVA. Diante desses resultados, conclui-se que os pressupostos paramétricos de normalidade e homogeneidade não foram atendidos. Assim, embora a ANOVA ainda possa ser utilizada de maneira exploratória, o teste mais adequado para confirmar de forma robusta as diferenças entre os grupos é o teste de Kruskal-Wallis, por se tratar de uma alternativa não paramétrica que não depende da suposição de normalidade dos dados nem da igualdade das variâncias.

A ANOVA de um fator foi aplicada de forma exploratória com o objetivo de identificar diferenças significativas entre os pontos de coleta em relação às variáveis de temperatura e umidade. Apesar da violação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias identificada anteriormente, o teste foi conduzido para observar tendências gerais nos dados e compreender a distribuição espacial das variações microclimáticas no bairro analisado. Os resultados da ANOVA indicaram diferenças estatisticamente significativas entre os pontos de coleta para ambas as variáveis. Para a temperatura, obteve-se $F(5, 3713) = 15,98$, com $p < 0,001$, enquanto para a umidade o resultado foi $F(5, 3713) = 67,41$, também com $p < 0,001$. Esses valores evidenciam que tanto o comportamento térmico quanto o hígrico não são uniformes ao longo da área estudada, sugerindo a influência direta das características locais, como presença de vegetação, sombreamento, adensamento

urbano e tráfego de veículos. Em outras palavras, o ambiente urbano heterogêneo se reflete nas condições microclimáticas, com zonas de maior aquecimento e outras mais úmidas, associadas a distintos contextos de ocupação.

Na sequência, foi realizado o teste pós-hoc de Tukey (HSD) para identificar quais pares de pontos apresentavam diferenças significativas entre si. No caso da temperatura, os contrastes mais evidentes foram observados entre os pares Ponto 1 e Ponto 2, Ponto 1 e Ponto 4, Ponto 1 e Ponto 6, além de Ponto 3 e Ponto 4, todos com $p < 0,01$. Esses resultados indicam a presença de áreas mais aquecidas, especialmente associadas aos pontos 1 e 6, possivelmente em função de maior exposição solar, adensamento construtivo ou menor presença de vegetação. Em contrapartida, os demais pontos, que apresentaram médias inferiores, podem estar relacionados a trechos mais sombreados ou com maior cobertura arbórea, o que contribui para a regulação térmica local. Em relação à umidade, os contrastes significativos foram ainda mais numerosos. Destacaram-se as diferenças entre os pares Ponto 1 e Ponto 2, Ponto 1 e Ponto 3, Ponto 3 e Ponto 4 e Ponto 2 e Ponto 5, todos com $p < 0,001$. Essas variações refletem a heterogeneidade microclimática do bairro, possivelmente associada à variação na cobertura vegetal, permeabilidade do solo e densidade de edificações. Regiões com maior vegetação tendem a apresentar maior retenção de umidade, enquanto áreas mais adensadas e impermeabilizadas favorecem o ressecamento do ar. De modo geral, o teste de Tukey confirmou que os pontos diferem significativamente entre si, sobretudo entre as regiões mais densamente construídas e aquelas com maior presença de áreas verdes.

Como os pressupostos da ANOVA não foram plenamente atendidos, aplicou-se também o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que é mais robusto diante de distribuições não normais e variâncias desiguais. Os resultados confirmaram de forma consistente as diferenças entre os pontos para ambas as variáveis, com valores de qui-quadrado de 89,14 ($p < 0,001$) para temperatura e 185,77 ($p < 0,001$) para umidade. Esses achados reforçam que as variações observadas não são aleatórias, mas sim reflexo de diferenças reais entre os ambientes analisados. O teste pós-hoc de Dunn, aplicado com correção de Bonferroni, detalhou os pares de pontos com diferenças significativas. Para a

temperatura, destacaram-se os contrastes entre Ponto 1 e Ponto 2 e entre Ponto 2 e Ponto 3 ($p < 0,01$). Para a umidade, os pares Ponto 1 e Ponto 3 e Ponto 3 e Ponto 4 apresentaram as diferenças mais expressivas ($p < 0,001$). Mesmo sob a abordagem não paramétrica, as distinções entre os locais se mantiveram altamente significativas, demonstrando a consistência dos resultados e confirmando a influência das condições ambientais específicas de cada ponto no comportamento térmico e hígrico urbano.

A visualização das diferenças entre pontos foi organizada em quatro frentes complementares, permitindo uma leitura integrada do comportamento térmico e higrométrico no bairro. Os boxplots comparativos com marcação das médias e intervalos de confiança ilustram, de início, a amplitude, a mediana e a assimetria das distribuições.

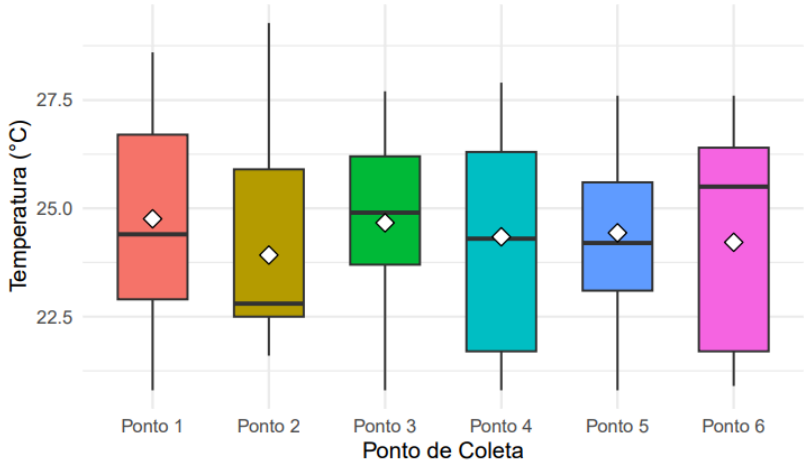


Gráfico 5 - Distribuição da Temperatura por Ponto de Coleta

Na temperatura, observa-se que os Pontos 1 e 6 tendem a concentrar valores mais elevados, sugerindo condições propícias a ilhas de calor locais, enquanto o Ponto 2 se destaca por um conjunto de valores mais baixos e distribuição mais comprimida, sinalizando um ambiente relativamente mais fresco. Na umidade relativa, o padrão se inverte parcialmente, com os Pontos 2 e 4 exibindo níveis médios mais altos, compatíveis com áreas mais arborizadas, sombreadas ou com maior permeabilidade do solo, e o Ponto 3 apresentando os menores níveis, o que remete a um microclima mais seco.

Para aprofundar a comparação entre centrais de tendência, os gráficos de médias com intervalos de confiança a 95 por cento reforçam essas leituras. Na temperatura, o Ponto 2 mostra média significativamente inferior às dos pontos mais quentes, sem sobreposição de intervalos com o grupo de maior aquecimento, enquanto os Pontos 4, 5 e 6 formam um conjunto com médias próximas e sobreposição de intervalos, sugerindo semelhança estatística. Na umidade, o contraste é ainda mais marcado, com o Ponto 2 apresentando média claramente superior e intervalo de confiança isolado, e o Ponto 3 mantendo os menores valores, também com intervalo pouco sobreposto aos demais. Essa leitura visual, ao apontar sobreposições e separações entre intervalos, dialoga diretamente com os achados inferenciais dos testes pós hoc, lembrando que a ausência de sobreposição é uma evidência heurística de diferença e não um teste formal.

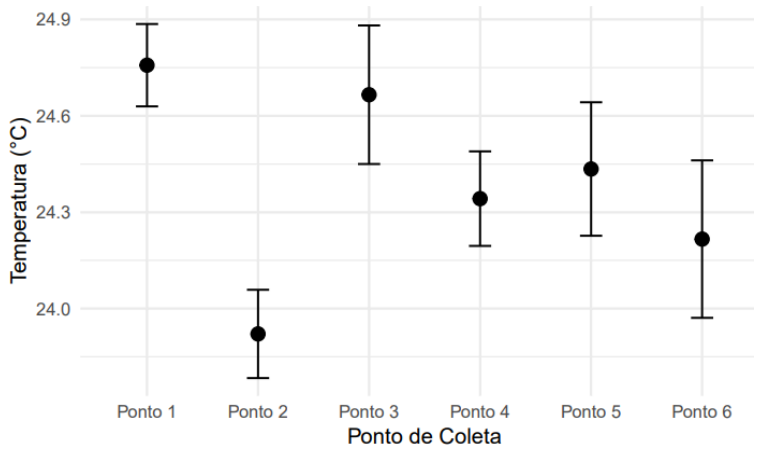


Gráfico 6 - Média de Temperatura e Intervalo de Confiança (95%)

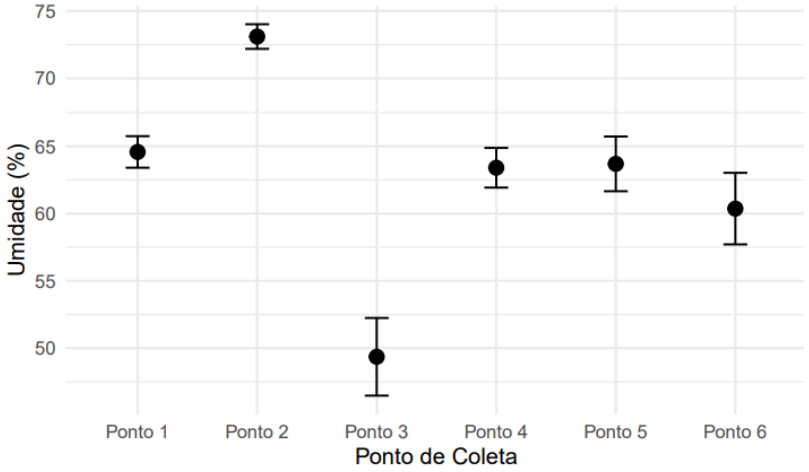


Gráfico 7 - Média de Umidade e Intervalo de Confiança (95%)

Os mapas de significância sintetizam as comparações múltiplas ao codificar, por meio de uma escala de cor, os valores de *p* resultantes de Tukey para temperatura e umidade. Na temperatura, as células associadas aos caminhos entre o Ponto 2 aparecem intensamente marcadas frente a vários pares, indicando diferenças robustas em relação aos demais pontos, ao passo que combinações entre Pontos 4, 5 e 6 tendem a exibir tons claros, sugerindo semelhança térmica. Na umidade, o padrão evidencia contrastes fortes envolvendo o Ponto 1 frente a parte dos demais e, sobretudo, realça a distância estatística entre o Ponto 2, mais úmido, e o Ponto 3, mais seco, compondo agrupamentos coerentes com a interpretação microclimática do entorno urbano.

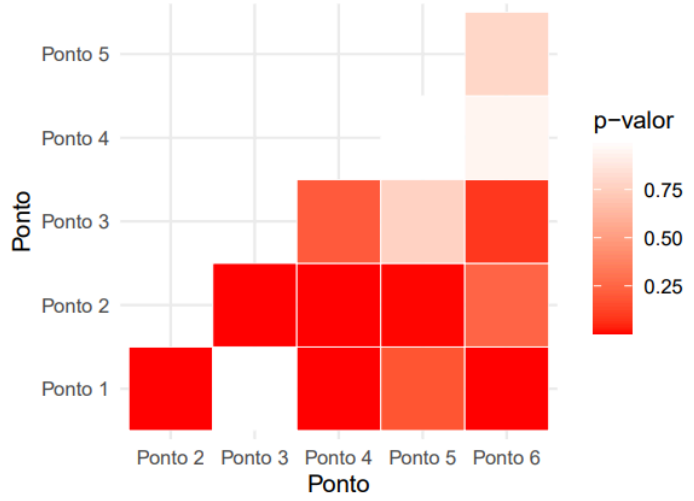


Gráfico 8 - Mapa de Significância Tukey HSD - Temperatura)

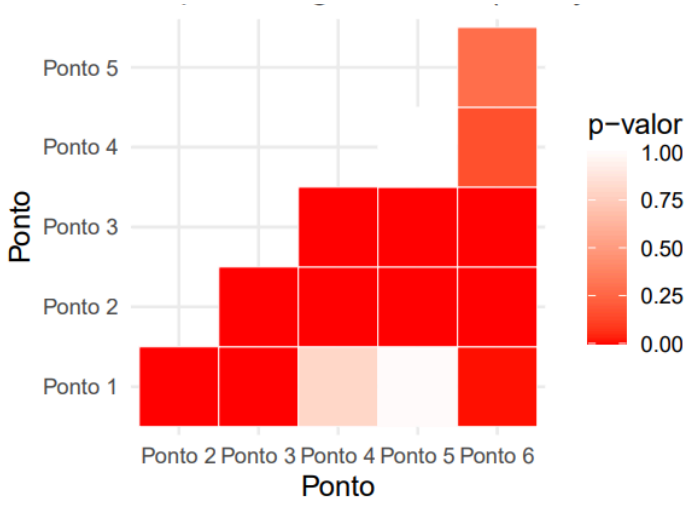


Gráfico 9 - Mapa de Significância (Tukey HSD - Umidade)

Por fim, os boxplots lado a lado de temperatura e umidade, em facetas, permitem comparar simultaneamente as duas variáveis ao longo dos mesmos pontos de coleta. O painel de temperatura reafirma o papel do caminho do Ponto 2 como área mais fresca e do Ponto 6 como mais aquecida, com os caminhos dos Pontos 1, 3, 4 e 5 apresentando medianas próximas e amplitudes comparáveis. O painel de umidade evidencia maior heterogeneidade espacial, com o caminho do Ponto 3 concentrando os menores valores e os caminhos dos Pontos 2, 4 e 6 com medianas superiores, além de maior dispersão relativa em alguns locais, o que sugere sensibilidade da umidade às condições imediatas de cobertura vegetal, sombreamento e impermeabilização. Em conjunto, essas visualizações corroboram os resultados dos testes de ANOVA exploratória e dos procedimentos não paramétricos, confirmando que as diferenças observadas entre pontos não são casuais e expressam a influência de atributos locais do espaço construído e do entorno ambiental sobre o microclima.

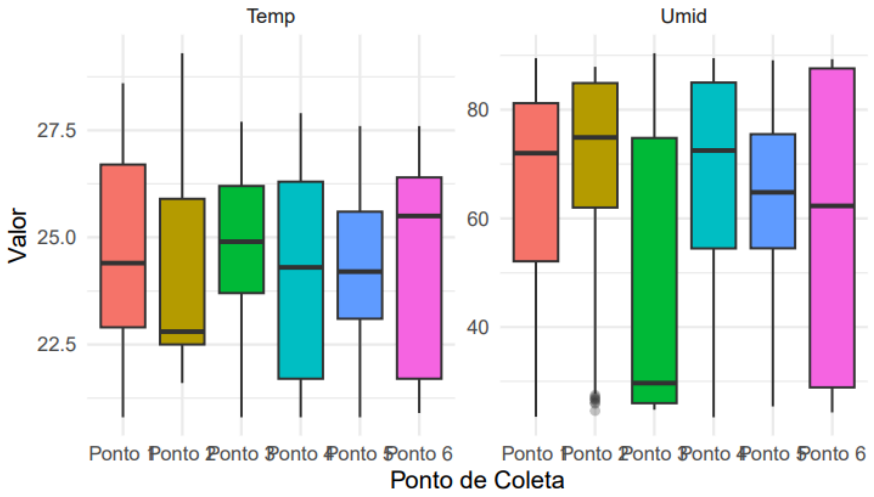


Gráfico 10 - Distribuição da Temperatura e Umidade por Ponto de Coleta

4.4. Integração Mapas-Sinótica

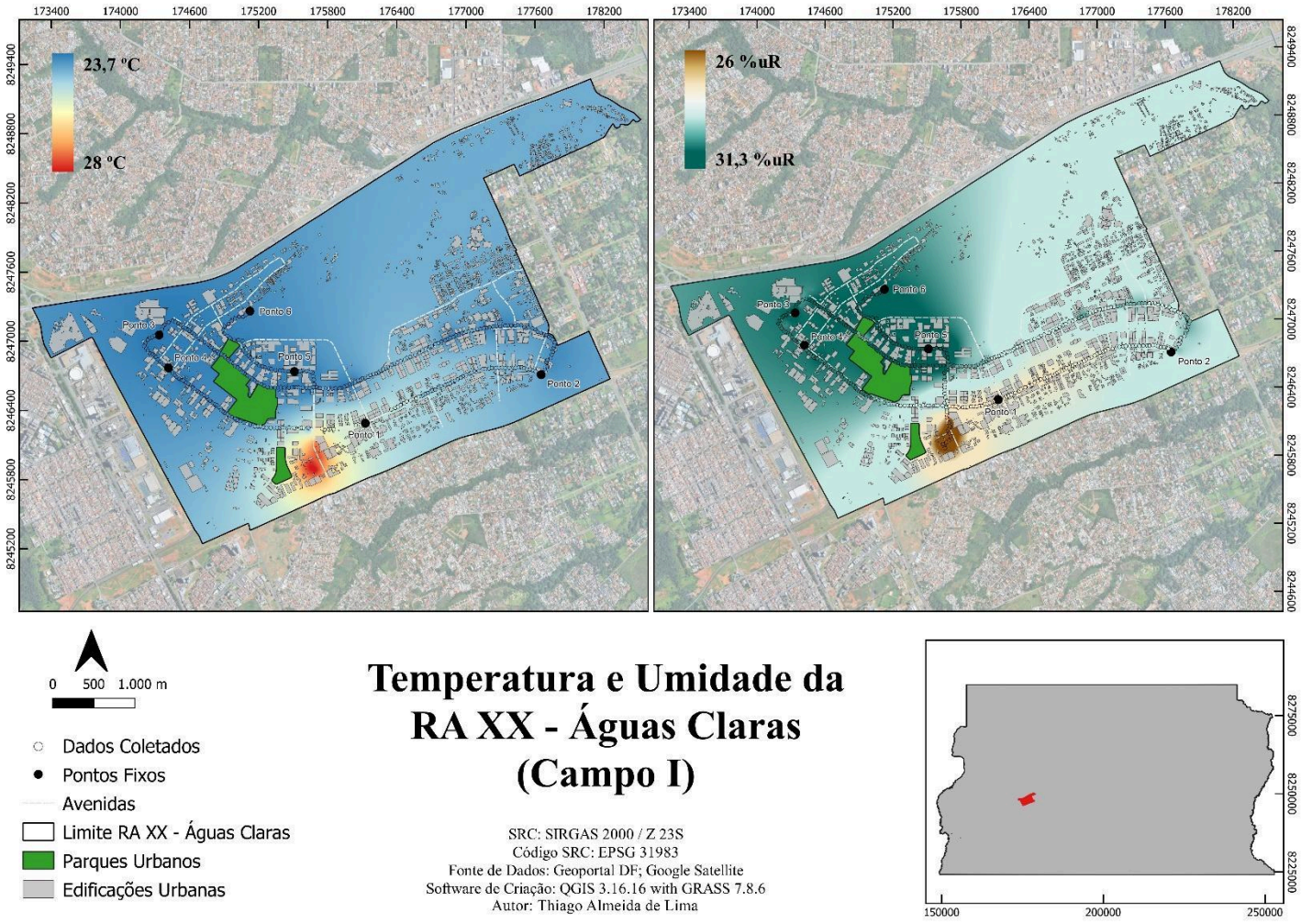


Figura 5 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo I) - Águas Claras

O primeiro levantamento de campo, realizado em 01 de setembro de 2024 (00 UTC de 02/09), coincidiu com a atuação persistente da Alta Subtropical do Atlântico Sul sobre o Centro-Oeste, mantendo a atmosfera sob subsidência, estabilidade e ausência de nebulosidade. Essa configuração favoreceu o predomínio da Massa Tropical Atlântica continentalizada, responsável pelo tempo seco, baixa umidade e céu limpo observados no Planalto Central. Na estação meteorológica do Sudoeste, registraram-se 23,1 °C e 33% de umidade relativa às 21 h, com ventos fracos de sudeste, indicando um ambiente caracteristicamente típico do auge da estação seca (Marengo et al., 2020).

Os resultados obtidos no interior de Águas Claras refletem com precisão o cenário sinótico. O mapa térmico evidencia temperaturas variando entre 23,7 °C nas bordas e 28,0 °C nas áreas centrais mais adensadas, compondo uma amplitude térmica de 4,3 °C. Trata-se de um gradiente considerável, coerente com o desenvolvimento inicial de uma ilha de calor urbana noturna, em que materiais urbanos retêm energia durante o dia e a liberam de forma lenta após o pôr do sol (Oke, 1987; Gartland, 2010). Essa retenção é intensificada pela morfologia dos cânions urbanos, que reduz a perda radiativa e limita o resfriamento noturno (Amorim, 2013).

Ao observar o mapa, verifica-se que a região mais quente e mais seca corresponde exatamente ao ponto de partida do transecto móvel, localizado no setor sul da RA. Essa mancha térmica inicial expressa o comportamento típico do termo em processo de autorregulação, tal como descrito no Sistema Clima Urbano, no qual o ambiente altamente verticalizado funciona como um reservatório de energia sensível logo após o pôr do sol.

A liberação gradual dessa energia configura o início da reorganização térmica noturna e, por isso, o transecto registrou seus valores mais elevados justamente nesse ponto. Esse núcleo quente e seco, identificado visualmente como a mancha mais intensa do mapa, marca o momento inicial de reequilíbrio do campo higrotérmico urbano, a partir do qual o sistema começa a se redistribuir espacialmente ao longo do percurso, reduzindo temperatura e aumentando umidade conforme se aproxima das bordas vegetadas da região.

Ao iniciar o deslocamento a partir de um núcleo altamente aquecido, o transecto captou o gradiente térmico e higrométrico em sua forma mais expressiva, evidenciando como o sistema atmosférico local se reorganiza espacialmente durante as primeiras horas da noite.

As áreas de maior temperatura no mapa concentram-se nas quadras centrais próximas às avenidas Castanheiras e Araucárias, caracterizadas por intensa verticalização e alto fluxo veicular. A rugosidade urbana associada às edificações de grande porte, somada à impermeabilização do solo e à limitada ventilação horizontal, favorece o aprisionamento de calor e impede a renovação eficiente do ar (Landsberg, 1981; Andrade, 2005). Tais características explicam por que o setor inicial do transecto se mostrou mais quente que o restante da RA: sua configuração física funciona como reservatório térmico, acumulando energia e liberando-a lentamente. Estudos recentes em cidades brasileiras de porte médio, como o de Breunig e Freitas (2024) em Campina Grande (PB), reforçam o mesmo padrão, com diferenças superiores a 4 °C entre centros adensados e bordas arborizadas.

O mapa higrométrico complementa esse quadro ao revelar valores de umidade inversamente proporcionais às temperaturas observadas. As menores umidades, em torno de 26%, coincidem com o núcleo mais aquecido, enquanto os maiores valores, próximos de 31,3%, distribuem-se nas bordas norte e leste, onde há maior presença de vegetação, áreas permeáveis e circulação de ar menos restrita.

Essa relação inversa entre temperatura e umidade é recorrente em ambientes urbanos secos e reafirma o papel da vegetação na moderação microclimática, seja pela evapotranspiração, seja pelo sombreamento (Ferreira et al., 2022; Moreira et al., 2023). Mendonça (2021) demonstra que pequenos fragmentos verdes, quando conectados ou distribuídos de maneira estratégica, são capazes de influenciar de forma significativa o conforto térmico em áreas densamente construídas.

A amplitude higrométrica observada, embora aparentemente pequena em termos absolutos, é altamente expressiva no contexto de forte estabilidade atmosférica associada à ASAS. A diferença de cerca de 5 pontos percentuais entre

centro e bordas indica a importância da geometria urbana na regulação da umidade superficial. Em áreas com menor ventilação, reduzida presença de superfícies evaporativas e maior concentração de materiais impermeáveis, a umidade tende a diminuir rapidamente durante o período noturno. Lima, Pinheiro e Mendonça (2012) já destacavam que cidades do Centro-Oeste, em particular durante a seca, apresentam microclimas extremamente sensíveis às características físico-espaciais de sua morfologia.

Assim, a leitura conjunta do mapa térmico e higrométrico permite afirmar que o ponto inicial do transecto, por reunir as maiores restrições à ventilação e a maior capacidade de armazenamento térmico, funcionou como referência para o processo de reorganização do campo higrotérmico noturno. À medida que o transecto se deslocou em direção às bordas vegetadas, o sistema mostrou-se gradualmente mais regulado, com diminuição da temperatura e incremento da umidade, o que evidencia o funcionamento sistêmico do clima urbano, em que o núcleo adensado atua como foco emissor de calor e o entorno vegetado do parque com as matas de galeria funciona como mecanismo dissipador, articulando-se segundo a lógica apresentada no Sistema Clima Urbano de Monteiro.

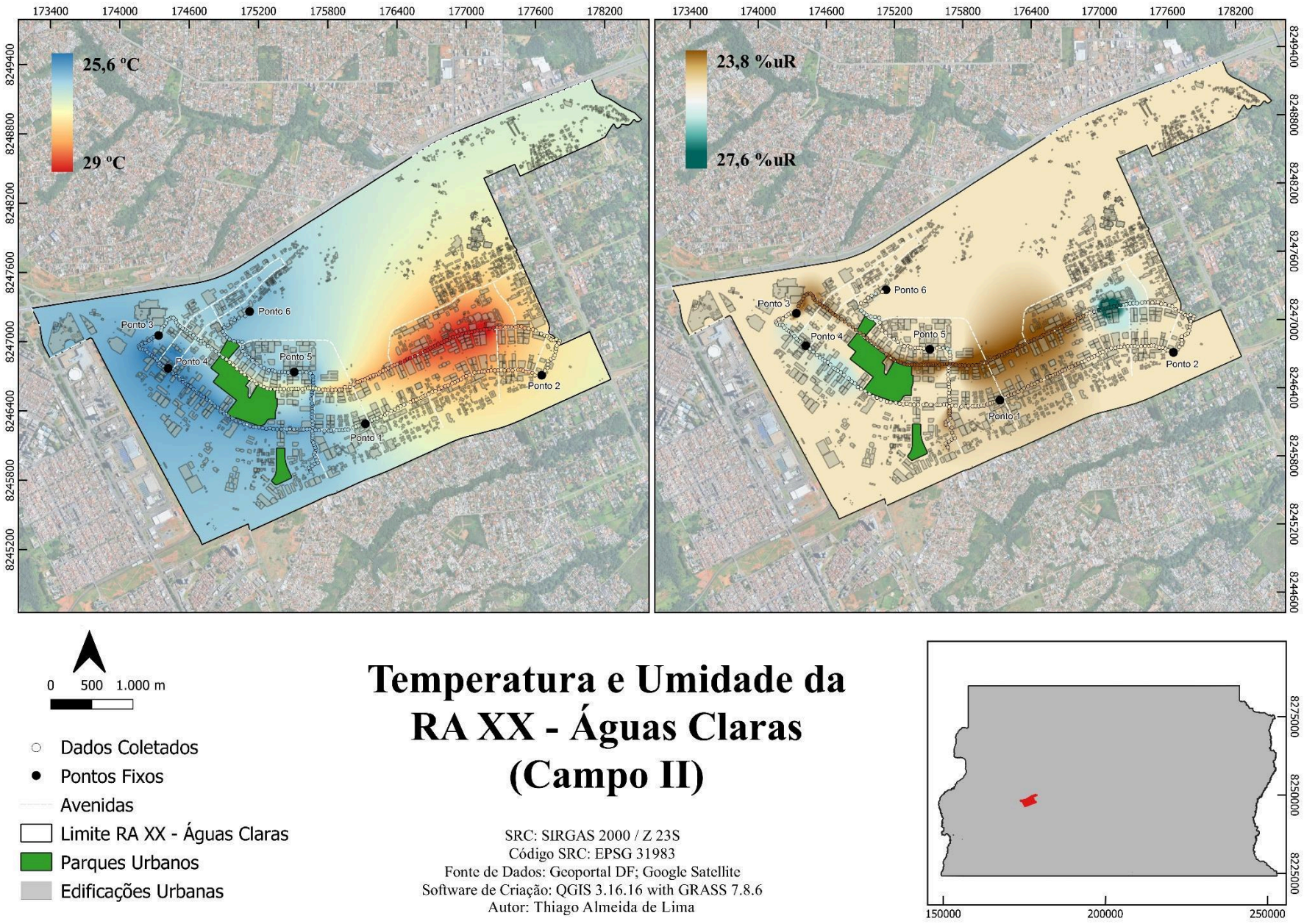


Figura 6 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo II) - Águas Claras

A situação sinótica manteve o padrão de tempo seco observado no campo anterior. A ASAS permaneceu atuante sobre o Centro-Oeste, com a mTa continentalizada sob céu pouco nublado e sem precipitação. Às 21 h, a rede de superfície no DF registrou 22,8 a 23,1°C e 31 a 34 % de umidade relativa, pressão próxima de 889–891 hPa e vento de leste a sudeste em 5,1 m s^{-1}, intensidade acima do usual para o período noturno. Esse escoamento reforçou a mistura vertical rasa e favoreceu leve perda de calor sensível nas camadas superficiais, sem alterar o quadro de estiagem (Nimer, 1989; Marengo et al., 2020).

O mapa térmico do Campo II mostra um gradiente bem definido de leste para oeste. As temperaturas variaram de 25,6°C nas bordas mais ventiladas do setor oeste para picos entre 28,8 e 29,0°C no núcleo adensado do setor leste, produzindo amplitude espacial de ≈ 3,4°C. O máximo local concentrou-se nas quadras mais verticalizadas e nos trechos com maior fluxo viário, onde a geometria dos cânions urbanos aumentou o armazenamento diurno e reduziu o resfriamento noturno por sombreamento de céu e reemissão de onda longa entre fachadas (Oke, 1987; Amorim, 2013).

Em contraste, o setor oeste exibiu um corredor mais fresco, próximo de 25,6–26,5°C, acompanhando áreas abertas e parques. A presença de mancha verde e a menor rugosidade superficial ampliaram a ventilação efetiva justamente sob ventos de leste, o que intensificou a remoção de calor sensível no sopé do cânion e diminuiu o acoplamento radiativo entre paredes e pavimento. Esses mecanismos são consistentes com o efeito combinado de porosidade urbana, alinhamento viário e advecção noturna na atenuação da ilha de calor (Landsberg, 1981; Andrade, 2005).

O campo higrométrico apresentou valores baixos em toda a área, com mínimos de 23,8 % coincidentes com o núcleo térmico do leste e máximos pontuais de 27,6 % em bolsões mais arborizados e na borda norte. A oposição espacial entre as duas superfícies confirma a relação inversa entre temperatura e umidade em noites estáveis, modulada pela disponibilidade de superfícies evaporativas e pelo

sombreamento residual em praças e canteiros (Mendonça, 2021; Ferreira et al., 2022).

Comparado ao Campo I, o núcleo quente deslocou-se e intensificou-se no quadrante leste-sudeste, apesar do vento mais forte. Essa configuração indica que a ventilação noturna não foi suficiente para quebrar a estratificação dentro dos cânions mais profundos, onde a relação altura-largura e o alto fator de vista para paredes mantiveram a retenção de calor até o fim da noite. O controle geométrico do resfriamento em cânions altos com baixa razão de céu aberto é amplamente documentado na climatologia urbana (Oke, 1987; Amorim, 2013).

A diferença espacial de ≈ 3,4°C entre bordas ventiladas e núcleo denso, combinada à amplitude higrométrica de ≈ 3,8 p.p., caracteriza um estado de ilha de calor urbana noturna em maturação, coerente com ambientes em estação seca, com materiais de alta inércia térmica e tráfego vespertino persistente. Estudos em cidades brasileiras de porte similar reportam contrastes da mesma ordem sob domínio de sistemas estáveis e baixa umidade ambiental, com reforço do aquecimento em eixos densos e mitigação junto a parques e clareiras urbanas (Breunig; Freitas, 2024; Mendonça, 2021).

Os ventos de 5,1 m s^{-1} contribuíram para reduzir ligeiramente as temperaturas nas bordas a sotavento, mas seu efeito no miolo edificato foi limitado. Em cânions com alta rugosidade e descontinuidade de corredores de vento, a ventilação sinótica é atenuada por perdas de carga e recirculações internas, preservando bolsões de ar quente e seco no fundo de vale urbano. Esse desacoplamento entre vento regional e escoamento de rua explica a persistência de máximos de ≈ 29 °C sobre quadras altas mesmo em noite ventilada para o padrão local (Landsberg, 1981; Oke, 1987).

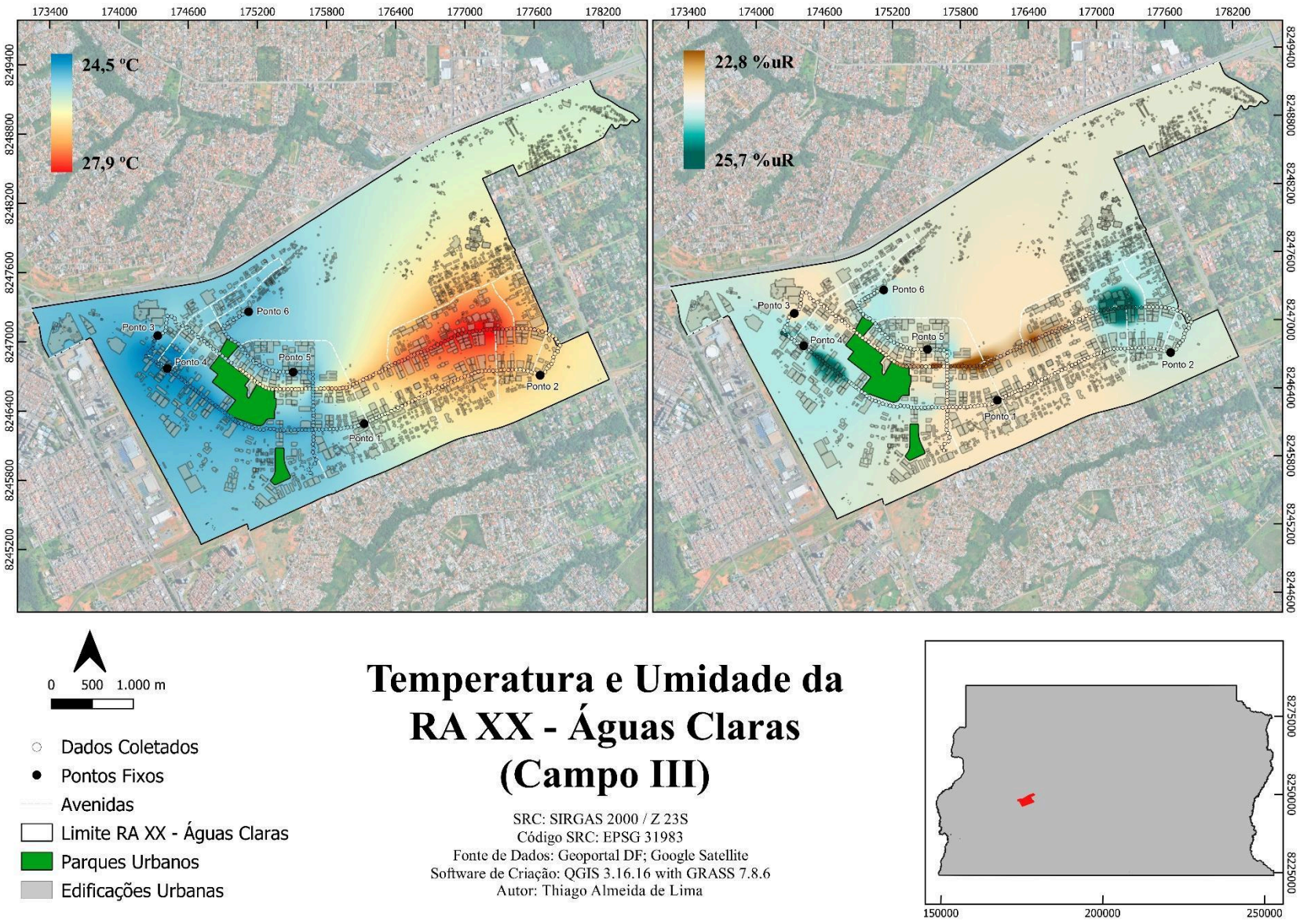


Figura 7 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo III) - Águas Claras

No terceiro levantamento de campo, a análise sinótica indicou o enfraquecimento parcial da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), embora sua influência ainda predominasse sobre o Centro-Oeste. Frentes frias permaneciam restritas à Região Sul do Brasil, sem avanço até o Planalto Central. O Distrito Federal manteve-se sob domínio da Massa Tropical Atlântica (mTa), já seca e continentalizada, com ventos variáveis entre nordeste (50°) e sudeste (140°), em torno de 2,1 a 3,1 m s^{-1}, e ausência de precipitação. A estação meteorológica do Sudoeste registrou 24,9 °C e 25–32 % de umidade relativa, com pressão próxima de 888 hPa, evidenciando o predomínio de ar seco e estabilidade atmosférica (Marengo et al., 2020).

O mapa térmico do Campo III apresenta temperaturas entre 24,5 °C nas bordas e 27,9 °C nas áreas mais adensadas, com amplitude de 3,4 °C, semelhante ao campo anterior. O núcleo de maior aquecimento permanece na porção leste-sudeste de Águas Claras, correspondendo às quadras de maior verticalização e menor presença de áreas permeáveis. Essa persistência do núcleo térmico em localizações semelhantes reforça a influência estrutural da forma urbana sobre o microclima, principalmente em contextos de continuidade do tempo seco (Amorim, 2013; Andrade, 2005).

O padrão de aquecimento noturno se explica pelo acúmulo de energia durante o dia, somado à baixa perda radiativa noturna, uma vez que a redução da nebulosidade e da ventilação limita o resfriamento convectivo (Oke, 1987; Gartland, 2010). Esse comportamento está diretamente associado à baixa ventilação noturna, reforçada pela disposição das quadras e pela presença de corredores edificados e ao efeito da rugosidade urbana, que dificulta a troca convectiva entre o ar superficial e as camadas superiores da atmosfera. Em situações de estabilidade, a energia térmica aprisionada nas fachadas e pavimentos é gradualmente liberada, sustentando temperaturas acima de 27 °C mesmo após o pôr do sol (Landsberg, 1981; Mendonça, 2021).

Os valores mínimos, próximos de 24,5 °C, foram observados nas bordas oeste e noroeste, coincidindo com áreas de menor densidade construtiva e

proximidade a manchas verdes urbanas, como os parques públicos destacados no mapa. Esses locais atuam como moderadores térmicos, favorecendo o resfriamento por evapotranspiração e maior albedo superficial (Ferreira et al., 2022; Moreira et al., 2023). O contraste térmico entre as áreas centrais e periféricas de cerca de 3 °C é indicativo de microclimas intraurbanos distintos, que se mantêm mesmo sob condições sinóticas estáveis e homogêneas.

O mapa higrométrico evidencia um padrão inverso ao térmico: a umidade relativa variou de 22,8 % a 25,7 %, concentrando os menores valores nas áreas centrais e leste, e os maiores nas bordas com vegetação. Essa correlação negativa entre temperatura e umidade reforça o papel da vegetação e da permeabilidade do solo na retenção hídrica e na moderação microclimática. Em regiões impermeabilizadas, a ausência de evaporação reduz a disponibilidade de vapor d’água e eleva o desconforto térmico (Monteiro, 1976; Mendonça, 2021).

A leve mudança na direção dos ventos, observada na análise sinótica, não produziu variação expressiva no padrão térmico local, mas pode ter contribuído para um ligeiro deslocamento do núcleo quente em direção ao quadrante leste. Esse comportamento é compatível com a literatura sobre circulação de brisa urbana, na qual ventos fracos tendem a redistribuir lentamente o calor acumulado em áreas densas, sem eliminar a ilha de calor (Oke, 1987; Amorim, 2013).

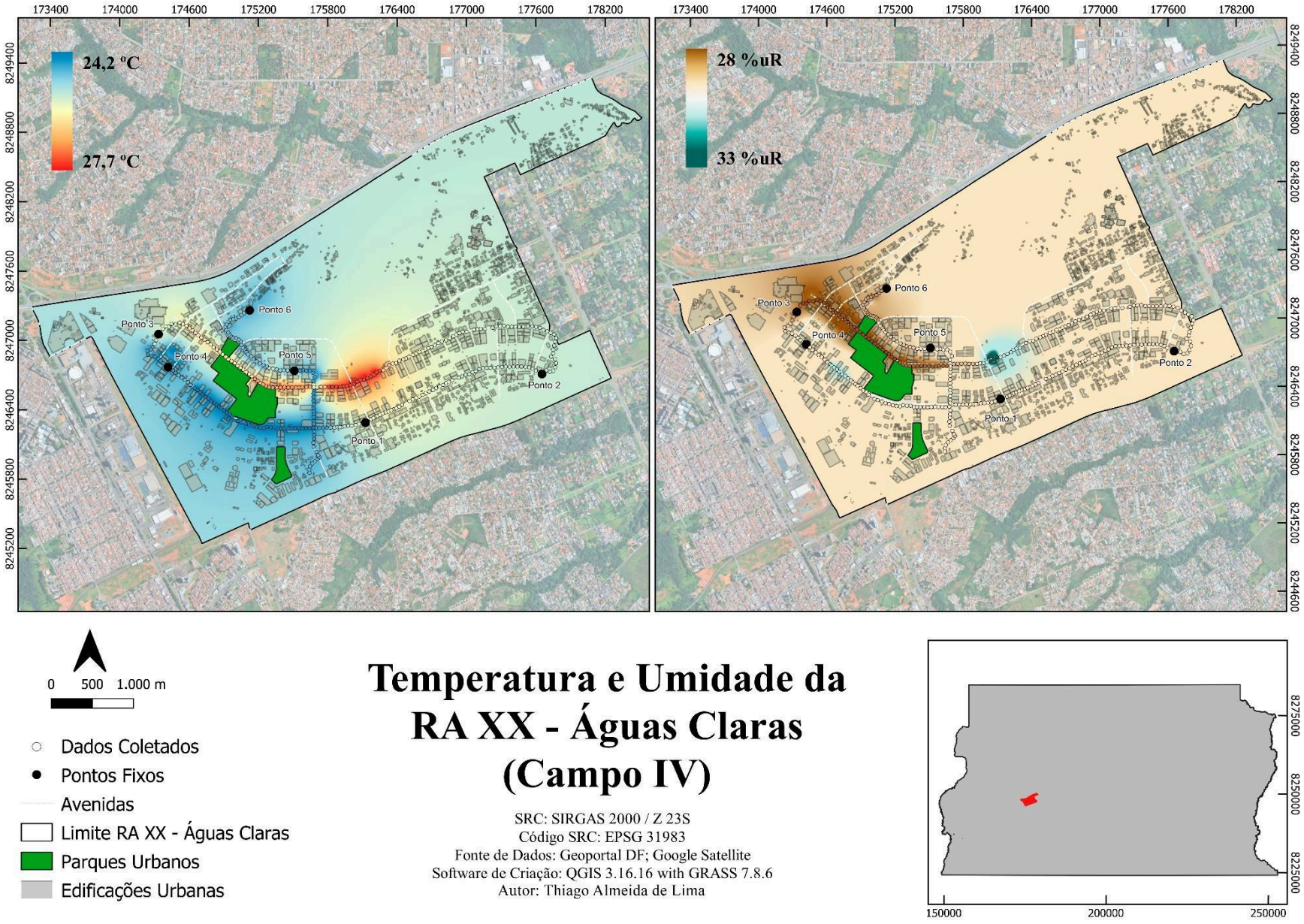


Figura 8 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo IV) - Águas Claras

O quarto levantamento foi realizado sob condições atmosféricas pós-frontais, marcadas pela atuação de uma crista anticiclônica associada a uma Massa Polar Atlântica (mPa) já modificada, que se misturava à Massa Tropical Atlântica (mTa). Essa configuração trouxe um alívio parcial ao quadro de secura persistente, caracterizando um breve período de reintegração de umidade e leve resfriamento noturno. Às 21h, a estação meteorológica do Sudoeste registrou 25,2 °C e 44 % de umidade relativa, com pressão de 887,3 hPa e ventos de sudeste a 2,1 m s^{-1}, sob céu limpo e ausência de precipitação (Marengo et al., 2020). A presença dessa massa de ar polar enfraquecida alterou parcialmente o balanço higrotérmico local, interrompendo o padrão extremamente seco observado nas semanas anteriores.

Os resultados térmicos indicam valores entre 24,2°C e 27,7°C, representando amplitude térmica de aproximadamente 3,5°C. O núcleo de maior aquecimento manteve-se nas quadras centrais e leste-sudeste de Águas Claras, embora com intensidade inferior à observada no Campo III. Essa atenuação decorre da maior umidade relativa do ar, que reduziu o acúmulo térmico superficial e ampliou a capacidade de dissipação de calor por convecção (Gartland, 2010; Amorim, 2013). A atuação da mPa modificada, ainda que fraca, favoreceu uma noite termicamente mais amena, principalmente nas bordas oeste e norte, onde as temperaturas atingiram mínimos de 24,2°C, coincidindo com áreas de maior cobertura vegetal e menor densidade construtiva.

A distribuição espacial da temperatura evidencia novamente o efeito dos cânions urbanos sobre a dinâmica térmica. Nas quadras densamente verticalizadas, com relação altura/largura (H/W) elevada, o aprisionamento de calor noturno persistiu, provavelmente retardando o resfriamento radiativo (Oke, 1987). Esse comportamento é coerente com a literatura sobre o impacto da morfologia urbana na redução da perda de energia de onda longa (Oke, 1987; Bourbia; Boucheriba, 2010). Provavelmente, a rugosidade superficial acentuada, somada à baixa ventilação local, dificultou a mistura do ar quente aprisionado, mantendo temperaturas acima de 27°C no núcleo urbano mesmo com a entrada de ar mais úmido.

O campo de umidade relativa mostrou aumento expressivo em relação às campanhas anteriores, com valores entre 28% e 33%. As áreas mais úmidas concentraram-se nas bordas norte e oeste, associadas à presença dos parques urbanos, que atuam como reservatórios de umidade superficial (Ferreira et al., 2022; Moreira et al., 2023). Essa elevação de cerca de 5 a 7 pontos percentuais em comparação ao Campo III indica a influência direta da mPa modificada, que, mesmo sob domínio da mTa, ampliou a capacidade de recuperação higrométrica do ar noturno no Distrito Federal.

O contraste entre os núcleos secos e úmidos reforça a importância das áreas verdes como moderadoras microclimáticas, cuja evapotranspiração contribui para reduzir o déficit hídrico e elevar a sensação de conforto térmico (Mendonça, 2021). Em contrapartida, as quadras centrais impermeabilizadas apresentaram umidade mínima próxima de 28 %, resultado da ausência de superfícies porosas e da concentração de materiais de baixa condutividade térmica, que limitam a infiltração e a troca de calor com o ambiente.

Embora a diferença térmica entre centro e bordas ainda fosse perceptível, nota-se redução da intensidade da ilha de calor urbana em relação às campanhas anteriores. A combinação de umidade relativa mais alta, ventos suaves de sudeste e ausência de radiação solar direta favoreceu a redistribuição térmica mais equilibrada entre os setores da cidade. Tal comportamento confirma observações de que a entrada de massas polares modificadas durante a estação seca pode amenizar temporariamente o desconforto térmico noturno em cidades do Centro-Oeste (Freitas, 2024).

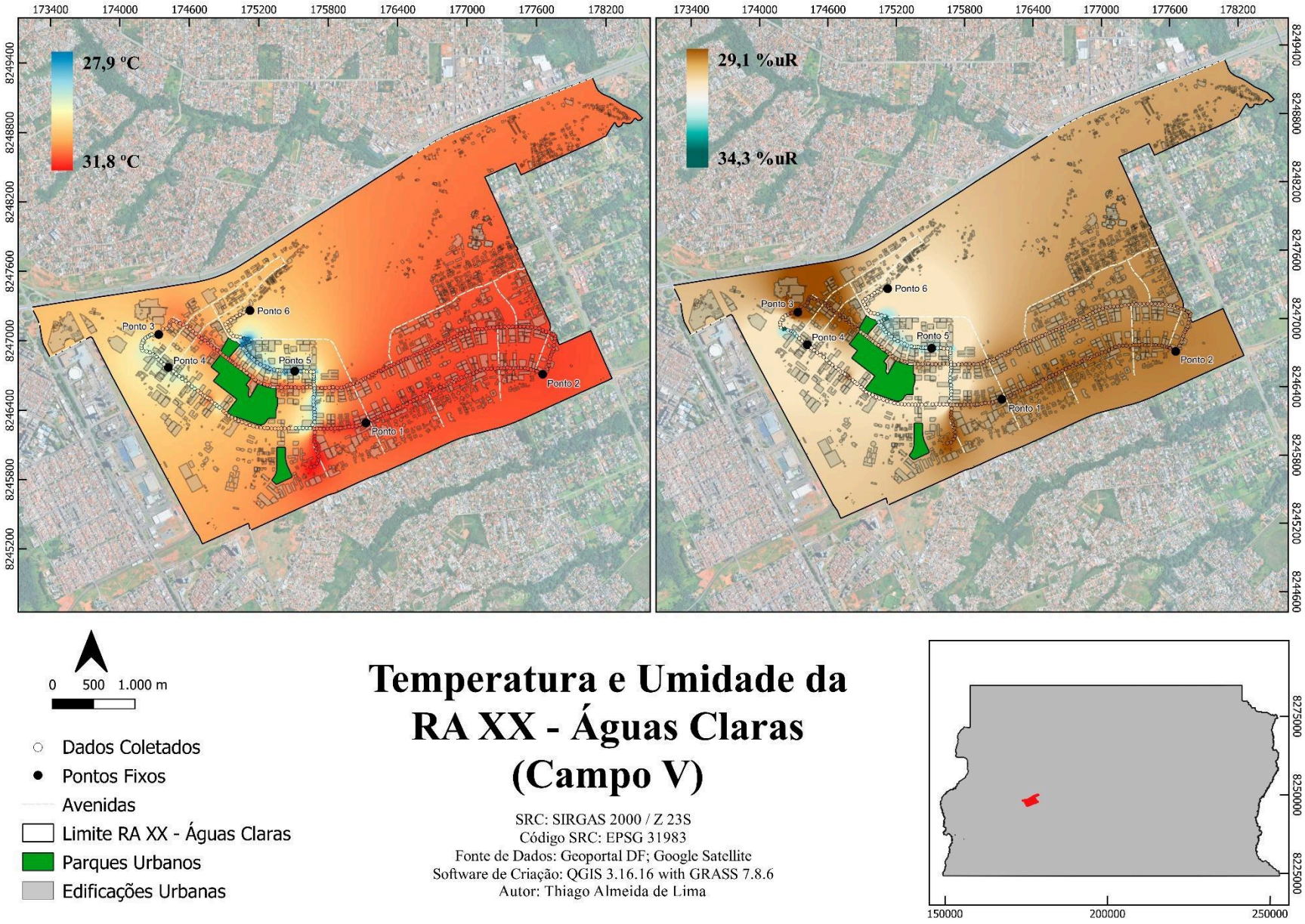


Figura 9 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo V) - Águas Claras

O quinto levantamento de campo ocorreu em um momento de transição sutil, quando as condições atmosféricas pós-frontais ainda atuavam sobre o Distrito Federal, mas sem força suficiente para redefinir completamente o comportamento térmico urbano. A presença de uma crista anticiclônica associada à mPa, já bastante modificada, favoreceu uma leve elevação da umidade relativa e um resfriamento moderado do ar acima da superfície. Entretando, a atmosfera ainda preservava características típicas do fim da estação seca, como a ventilação fraca e a ausência de nebulosidade mais expressiva. O registro da estação de Sudoeste indica um ambiente relativamente estável, com pouco transporte horizontal de calor, o que se reflete diretamente no padrão espacial observado no mapa.

Ao examinar o campo térmico, nota-se que este levantamento apresentava a maior amplitude térmica de toda a série analisada. Os valores variaram de 27,9 graus a 31,8 graus, configurando um aquecimento noturno mais pronunciado do que o esperado em situações pós-frontais. O setor sudeste da RA exibiu o núcleo de maior aquecimento, distribuído de forma contínua e amplo em extensão, acompanhando justamente a região mais verticalizada e com menor disponibilidade de áreas verdes.

O desenho urbano fechado e a predominância de materiais de alta absorção radiativa se somaram para manter o calor retido, mesmo após o pôr do sol. A continuidade espacial das temperaturas superiores a 30 graus reforça a influência marcante da rugosidade urbana, da impermeabilização generalizada e da baixa capacidade de resfriamento convectivo.

O mapa higrométrico complementa essa leitura ao apresentar valores entre 29,1 por cento e 34,3 por cento, com a menor faixa concentrada nas mesmas quadras em que se observou o núcleo de calor. A relação inversa entre temperatura e umidade aparece de modo muito claro: onde o aquecimento se intensifica, a umidade diminui; onde a vegetação e a permeabilidade superficial aumentam, a umidade relativa responde positivamente.

As bordas oeste e norte, especialmente nas proximidades dos parques urbanos, apresentam valores mais elevados, o que indica o papel moderador da vegetação e da presença de superfícies menos seladas. Esse comportamento está

amplamente documentado em estudos sobre microclimatologia urbana e confirma a relevância da cobertura verde para amortecer variações térmicas ao longo da noite.

Ainda que as condições pós-frontais tenham introduzido algum aumento de umidade na atmosfera, isso não foi suficiente para alterar a dominância do aquecimento antropogênico local. A ventilação registrada era baixa e insuficiente para transportar o ar mais frio das bordas para o interior da cidade. Consequentemente, a massa de ar próxima à superfície permaneceu praticamente estagnada, favorecendo a manutenção do calor acumulado durante o dia.

Esse comportamento se torna ainda mais evidente ao observar que o aquecimento supera a casa dos trinta graus em uma faixa extensa do território, o que sugere saturação térmica do meio urbano e baixa eficiência na perda radiativa noturna. O padrão térmico e higrométrico do Campo V representa um momento importante na transição entre a fase mais severa da estação seca e o início da pré-estação chuvosa.

A atmosfera começava a receber umidade adicional trazida pela circulação de grande escala, mas essa mudança ainda não se refletia de maneira efetiva no microclima urbano de Águas Claras. A morfologia verticalizada continuava determinando a forma como o calor era redistribuído no espaço, e o resfriamento observado nas bordas não conseguia influenciar o interior do tecido urbano. A homogeneização térmica parcial, acima dos trinta graus, sugere que o sistema climático urbano operava em um regime de forte acoplamento entre fatores locais e residuais da configuração atmosférica regional.

Esse levantamento se destaca por ilustrar de maneira clara como o ambiente urbano tropical pode manter um padrão de ilha de calor consolidada mesmo quando massas frias ou mais úmidas atuam de maneira moderada sobre a região. A interação entre materiais construtivos, orientação dos ventos, densidade edilícia e disponibilidade de vegetação define o ritmo do resfriamento noturno, e no caso de Águas Claras esse ritmo permaneceu profundamente condicionado pelos aspectos físicos da cidade. O Campo V, portanto, evidencia a persistência do aquecimento estrutural da RA e serve como contraponto importante para compreender a mudança gradual que se consolidará apenas nos levantamentos seguintes, quando

a umidade atmosférica atinge níveis mais elevados e o sistema climático urbano passa a responder com maior dependência à escala regional.

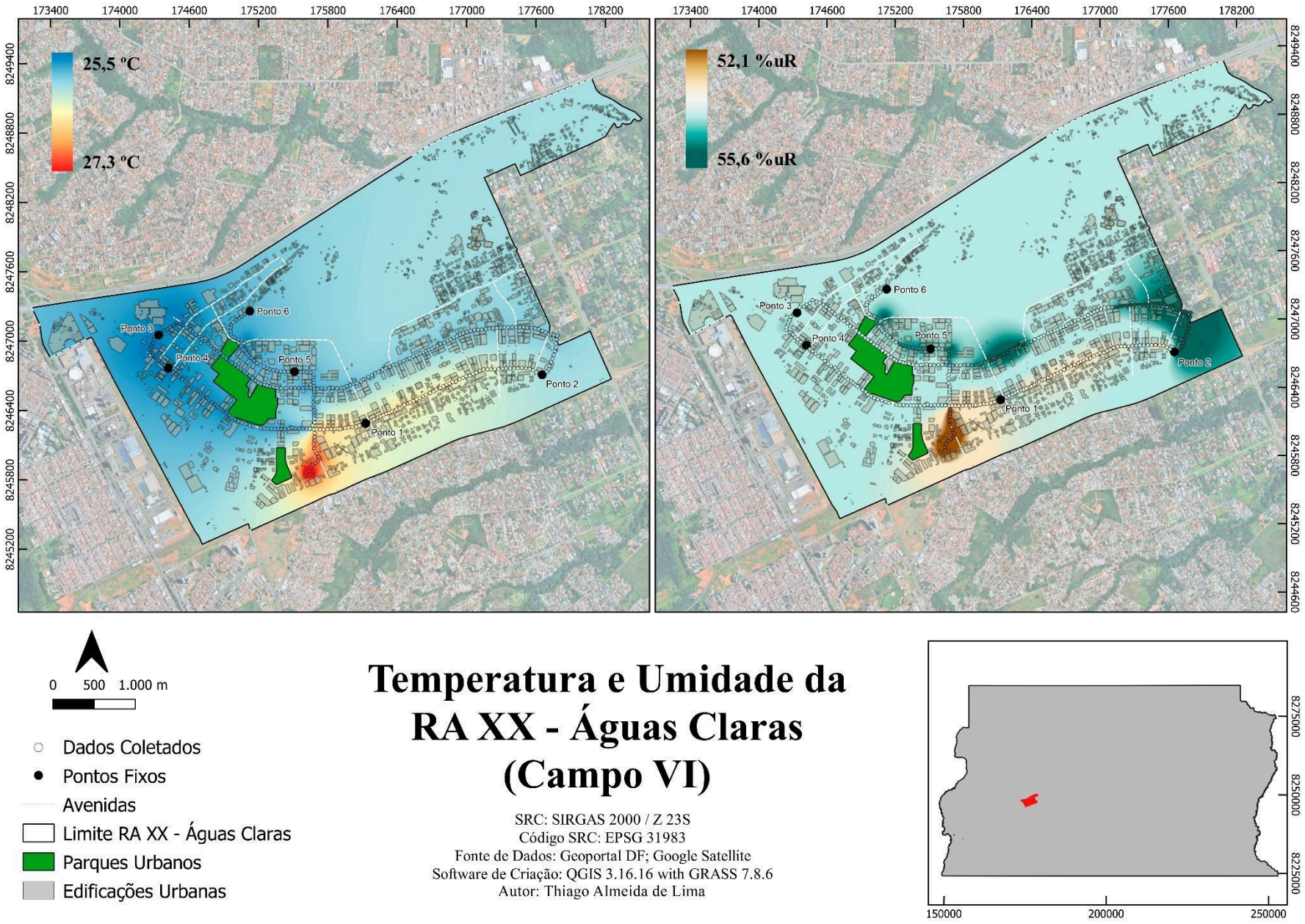


Figura 10 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo VI) - Águas Claras

O sexto levantamento de campo foi realizado sob condições atmosféricas de estabilidade acentuada, marcadas pela atuação persistente da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). A Massa Tropical Atlântica (mTa) manteve-se dominante sobre o Centro-Oeste, caracterizando o prolongamento do período seco. As cartas sinóticas mostraram frentes frias restritas ao Sul do país, sem penetração até o Planalto Central, e a ausência de nebulosidade reforçou o predomínio da subsidência e da inversão térmica noturna. Às 21h, a estação meteorológica do Sudoeste registrou 27,7°C e 41 % de umidade relativa, com pressão de 884,9 hPa e ausência de vento, consolidando o cenário de forte secura atmosférica e desconforto higrotérmico noturno (Marengo et al., 2020).

O mapa térmico do Campo VI apresentou valores entre 25,5°C e 27,3°C, o que representa amplitude térmica relativamente baixa (1,8°C), indicando homogeneização térmica do ambiente urbano. Apesar da leve redução das temperaturas extremas em relação ao Campo V, o padrão de acúmulo de calor nas áreas centrais e sudeste de Águas Claras persistiu.

Nota-se que a área mais aquecida e com menor umidade aparece novamente no setor inicial do transecto, configurando-se como o núcleo térmico dominante naquele momento da noite. Essa mancha quente e seca traduz o comportamento esperado do termo em fase de autorregulação, etapa em que o ambiente urbano densamente verticalizado libera, de forma progressiva, a energia acumulada ao longo do dia.

Essas áreas concentram as maiores densidades construtivas, com baixa permeabilidade do solo e ausência de vegetação expressiva, o que favorece o aprisionamento de energia térmica e a manutenção de temperaturas elevadas durante a noite (Amorim, 2013; Gartland, 2010). A combinação entre material construtivo de alta inércia térmica e reduzida ventilação nas vias estreitas e edificações altas limita a perda de calor por convecção e radiação, reforçando a formação de ilhas de calor persistentes (Oke, 1987; Mendonça, 2021).

A ausência de vento contribuiu para o bloqueio da dispersão térmica, tornando o ambiente urbano mais estável e aquecido. Essa condição, observada também em estudos sobre cidades tropicais brasileiras, confirma que a baixa

ventilação noturna associada à morfologia verticalizada é um dos principais fatores que impedem o resfriamento eficiente após o pôr do sol (Ferreira et al., 2022; Breunig; Freitas, 2024). No caso de Águas Claras, a rugosidade do relevo urbano e a disposição ortogonal das quadras dificultam a entrada de ventos de leste e sudeste, principais direções predominantes durante o período seco.

No campo higrométrico, a umidade relativa variou entre 52,1 % e 55,6 %, configurando a maior recuperação de umidade registrada desde o início das campanhas. Apesar da regulação, as áreas mais úmidas concentram-se nas bordas norte e oeste, coincidindo com parques públicos e avenidas arborizadas, onde o processo de evapotranspiração e a maior cobertura vegetal favorecem o microclima mais equilibrado (Moreira et al., 2023; Andrade, 2005). Em contrapartida, as quadras centrais, onde o solo é quase totalmente impermeabilizado, apresentaram os menores índices, próximos de 52 %, resultado da baixa capacidade de retenção hídrica e da ausência de superfícies permeáveis (Ferreira et al., 2022).

Esse aumento da umidade, mesmo sob domínio da ASAS, pode ser interpretado como indício de transição atmosférica, em que há início de infiltração de umidade oriunda do leste e prenúncio da estação chuvosa. Situação semelhante foi descrita por Mendonça (2021), que destacou a elevação gradual da umidade relativa e da nebulosidade durante o final da estação seca como resultado da reorganização da circulação regional. Ainda assim, o desconforto térmico noturno manteve-se elevado, uma vez que o acréscimo de umidade não foi suficiente para compensar o calor acumulado nas superfícies urbanas densamente edificadas.

O contraste espacial entre os setores urbanos confirma o papel estruturante da vegetação e do uso do solo na regulação do microclima. Nas áreas com presença de parques e corredores verdes, a temperatura média foi até 1,5 °C inferior em relação às áreas densas, efeito também observado por Breunig e Freitas (2024) em estudos realizados em Campina Grande (PB). A manutenção de núcleos frios associados à vegetação urbana demonstra o potencial mitigador dessas áreas sobre o desconforto térmico e a importância de políticas de planejamento voltadas à renaturalização das cidades (Gartland, 2010; Mendonça, 2021).

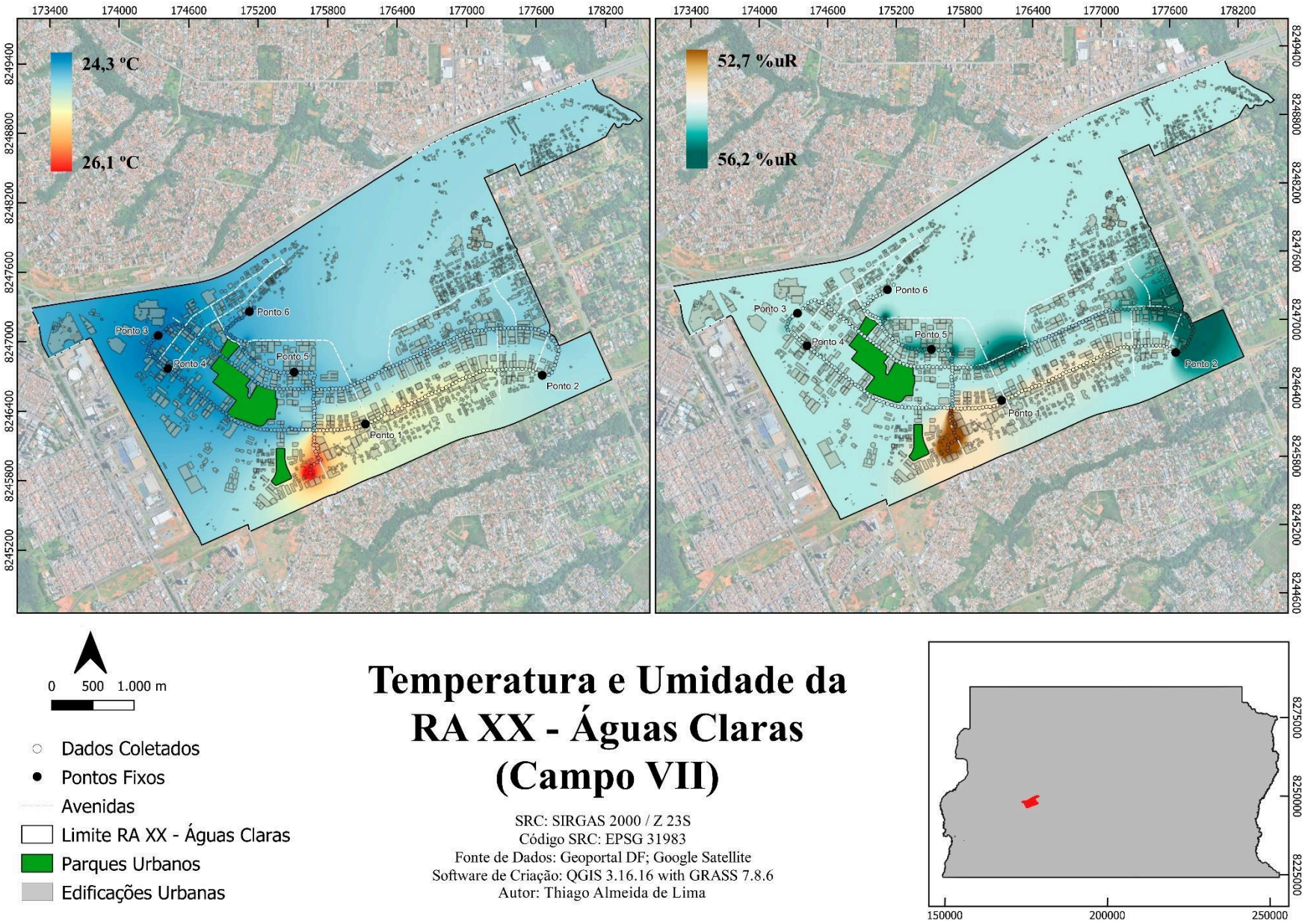


Figura 11 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo VII) - Águas Claras

O sétimo levantamento de campo coincide com um momento de inflexão no padrão atmosférico do Distrito Federal. A partir dessa data, a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul começou a perder intensidade, ao mesmo tempo em que a atmosfera passou a receber maior aporte de umidade transportada por ventos de leste em baixos níveis. Esse cenário já se aproxima das configurações que caracterizam a pré-estação chuvosa no Planalto Central, conforme descrito por Marengo e colaboradores. As observações feitas na estação do Sudoeste durante o período noturno mostraram temperaturas mais moderadas e umidade relativa superior a cinquenta por cento, valores que contrastam com a condição extremamente seca dos levantamentos iniciais.

A análise espacial da temperatura revela que a maior parcela da área urbana apresentou comportamento homogêneo. A amplitude térmica observada foi baixa e a distribuição espacial do calor evidenciou perda de intensidade da ilha de calor nas quadras centrais. A única exceção foi o setor inicial do transecto, onde surgiu novamente um pequeno núcleo mais quente e mais seco.

Esse foco não representa um padrão climático intrínseco, mas sim o resultado do processo de autorregulação do termohigrômetro na partida. Uma vez desconsiderado esse efeito, o mapa mostra um campo térmico bastante nivelado, compatível com a elevação gradual da umidade atmosférica e com a diminuição do gradiente térmico noturno. A literatura especializada em clima urbano destaca que a recuperação da umidade reduz a autonomia do sobreaquecimento em áreas densamente edificadas.

A reposição de umidade desempenhou papel importante na moderação térmica observada. O vapor d’água aumenta a capacidade térmica do ar e suaviza as diferenças de temperatura entre setores adensados e áreas vegetadas. Esse comportamento indica que a atmosfera começava a recuperar parte de sua estabilidade hidrotérmica, algo esperado após o prolongado período de déficit hídrico característico da estação seca. A presença de nuvens médias e altas nos dias anteriores também contribuiu para esse quadro, pois reduz a insolação durante o dia e limita a perda radiativa noturna.

Ainda se verifica um leve domínio térmico nas quadras centrais, especialmente naquelas com vias estreitas e alta rugosidade, entretanto, esse domínio aparece muito atenuado em comparação às primeiras campanhas, sinal de que o controle exercido por fatores regionais passou a superar os efeitos associados ao desenho urbano. Em momentos de transição, quando a umidade aumenta e o ar próximo à superfície perde capacidade de aquecimento rápido, o microclima urbano tende a se ajustar às condições da escala regional.

O comportamento da umidade confirma essa leitura. Os valores variaram em um intervalo estreito e indicaram melhora significativa em relação aos levantamentos realizados sob influência plena da estação seca. As taxas mais elevadas se concentraram nas bordas norte e leste, onde parques urbanos e áreas vegetadas favoreceram o acúmulo de umidade superficial e o resfriamento radiativo. Esses setores funcionaram como zonas de retomada hídrica, apoiadas tanto pela evapotranspiração quanto pela maior permeabilidade do solo, esse avanço inicial dos ventos úmidos provenientes do leste também contribuiu para esse processo, condição frequentemente descrita nos primeiros episódios da pré-estação chuvosa.

O conjunto desses elementos revela que o Campo VII representa um estágio de transição clara. O sistema climático urbano começava a deixar para trás o padrão rígido e contrastante da estação seca. A atmosfera recuperava parte de sua umidade e o ambiente urbano perdia autonomia térmica, passando a responder com mais fidelidade ao comportamento regional. A influência da verticalização e da rugosidade urbana não desaparece, mas já se mostra significativamente reduzida, o que prepara o cenário para a homogeneização que se consolidará nos levantamentos subsequentes.

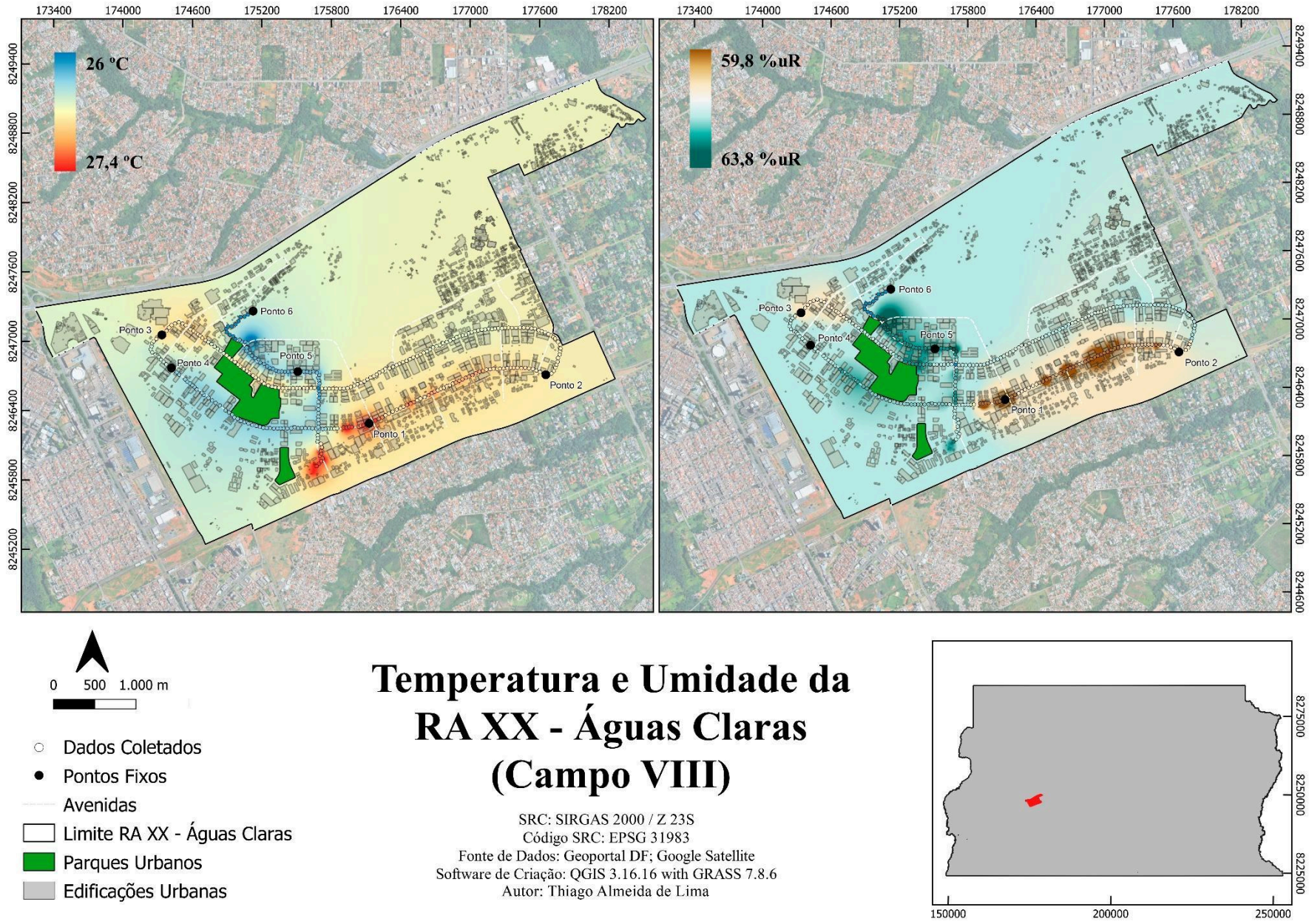


Figura 12 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo VIII) - Águas Claras

O oitavo campo foi realizado justamente no momento em que o padrão atmosférico começava a se reorganizar, deixando para trás as marcas da estação seca. As análises sinóticas mostravam a influência de uma frente fria que avançava pelo Sudeste e ajudava a transportar umidade para o interior. Essa combinação, associada aos ventos de noroeste em baixos níveis, instaurou sobre o Planalto Central um cenário significativamente mais úmido e instável, típico das primeiras semanas do regime primaveril no Centro-Oeste. No início da noite, a estação meteorológica de Sudoeste registrava valores coerentes com esse novo contexto: pouco mais de 21 °C, umidade relativa em torno de 80 %, ventos quase inexistentes e leve precipitação acumulada ao longo do dia.

Os mapas térmicos tornam esse quadro mais evidente. Os valores medidos se distribuíram entre 26 °C e 27,4 °C, sugerindo que a amplitude interna começava a diminuir de maneira consistente. O ponto inicial voltou a apresentar um leve pico térmico, mas trata-se de efeito do processo de regulação do termo no início da coleta, e não de um aquecimento efetivo da área. Desconsiderando esse ajuste, o desenho térmico mostra-se mais uniforme, o que indica que a atmosfera começava a responder com mais força ao controle regional exercido pela circulação úmida, reduzindo a autonomia típica do ambiente urbano durante o auge da estação seca.

Essa transição se confirma quando se observa o enfraquecimento do antigo núcleo de calor que se instalava regularmente nas quadras mais densas. A umidade mais elevada reduz a capacidade das superfícies de reter e liberar calor sensível, o que abre espaço para mecanismos de amortecimento térmico. Trabalhos clássicos, como os de Oke e Gartland, já apontavam que o vapor d’água passa a interferir diretamente na forma como o calor é armazenado e redistribuído, diminuindo o contraste entre áreas vegetadas e zonas densamente edificadas. O mapa mostra esse comportamento com clareza, pois as diferenças térmicas que antes se destacavam passam a se diluir.

O comportamento da umidade relativa reforça ainda mais essa interpretação. Os valores ficaram entre 59,8 % e 63,8 %, representando os índices mais altos do período seco–úmido até então. As maiores concentrações de umidade aparecem justamente onde seria esperado: nas bordas arborizadas e nos parques urbanos,

especialmente ao norte e oeste. São áreas em que a permeabilidade do solo, somada à presença de vegetação mais densa, cria condições favoráveis à evapotranspiração e à retenção de umidade. Estudos recentes que analisam a dinâmica hídrica urbana em regiões do Cerrado argumentam que esse padrão costuma emergir nas fases iniciais da estação chuvosa, quando o solo começa a recuperar a umidade perdida durante o inverno climático.

Outro elemento que contribuiu para a organização espacial registrada foi a estabilidade termodinâmica instalada no período noturno. A combinação de vento calmo, atmosfera úmida e céu parcialmente encoberto favoreceu um resfriamento progressivo, suavizado pela presença do vapor d'água, que limita as perdas radiativas mais intensas. O resultado foi um campo térmico mais equilibrado, sem variações abruptas e com condições de conforto claramente superiores às observadas semanas antes. Esse tipo de comportamento costuma ser interpretado como sinal de que o sistema urbano está entrando em um regime de amortecimento, em que o pulso atmosférico regional adquire maior peso sobre os mecanismos térmicos locais.

A leitura integrada dos mapas indica que a influência da morfologia urbana, tão evidente nos meses secos, começa a perder força nessa fase do ano. As quadras centrais, mesmo com seu adensamento elevado, já não se diferenciam tanto das bordas arborizadas, pois a diferença entre os extremos térmicos cai para valores inferiores a 1,5 °C. A presença da nebulosidade, o aumento da umidade e o registro recente de precipitação constituem elementos-chave para explicar essa convergência térmica. São fatores que, em conjunto, diminuem a capacidade das superfícies construídas de criar contrastes sustentados ao longo da noite.

Essa análise representa um ponto de inflexão importante no comportamento climático urbano de Águas Claras. Ele registra a retomada do equilíbrio hídrico e o início de um processo de homogeneização térmica que se intensificará nos levantamentos posteriores. A partir desse momento, a dinâmica atmosférica regional passa a exercer influência crescente, orientando o sistema em direção ao regime úmido que caracteriza a segunda metade da primavera e todo o verão no Distrito Federal.

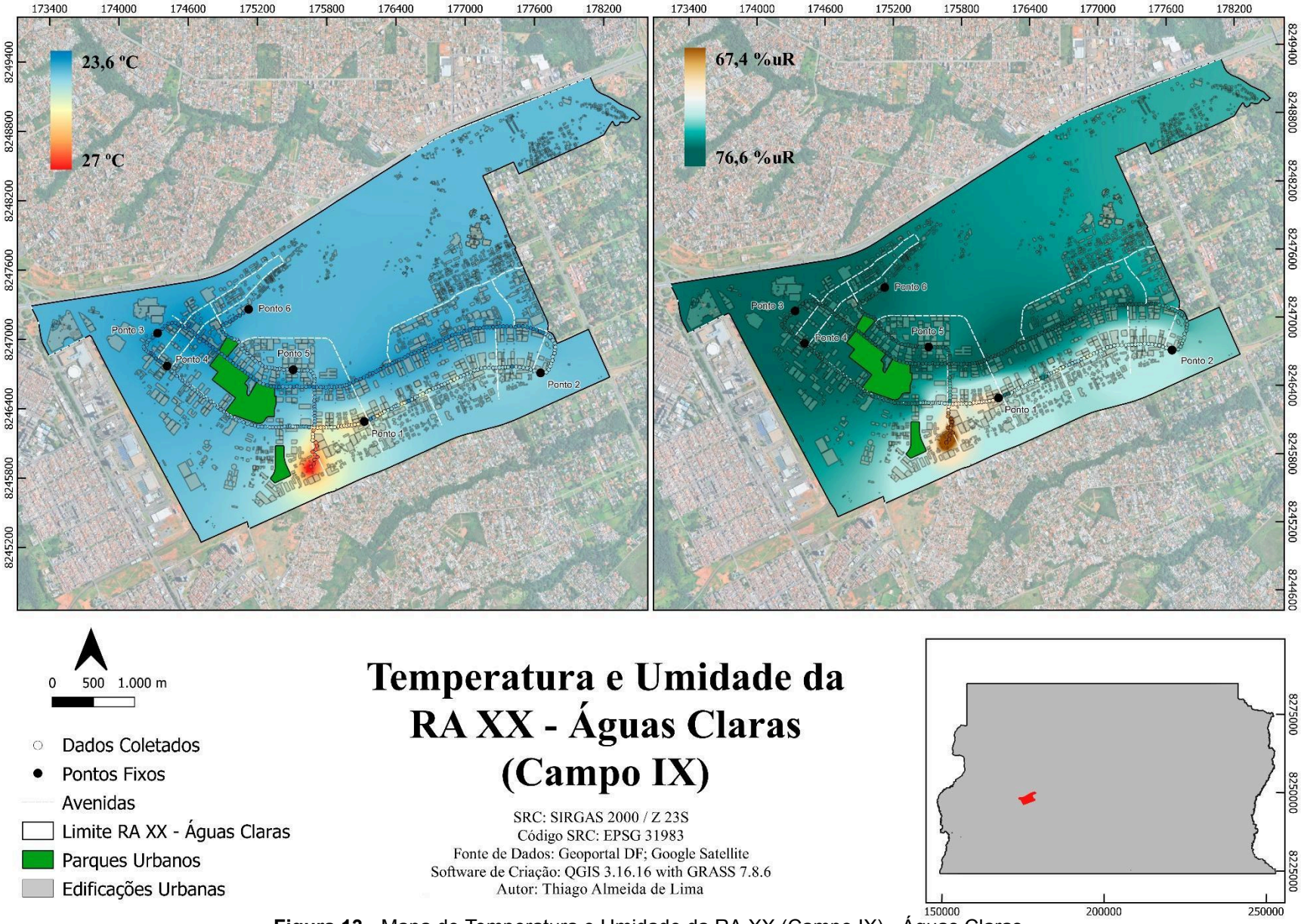


Figura 13 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo IX) - Águas Claras

O nono levantamento de campo registrou um ambiente atmosférico característico da pré-estação chuvosa plenamente estabelecida em Águas Claras. As cartas sinóticas desse período indicavam a presença de áreas de instabilidade organizadas sobre o Centro-Oeste, ventos persistentes de noroeste e forte convergência de umidade em baixos níveis, elementos típicos da circulação convectiva sazonal descrita por Marengo et al. (2020).

Às 21h, a estação meteorológica de Sudoeste registrou 23,5 °C e 73 % de umidade relativa, com pressão de 886,9 hPa e precipitação acumulada de 8 mm nas horas anteriores, cenário que confirma elevada saturação atmosférica e resfriamento noturno mais pronunciado.

A distribuição espacial registrada no mapa mostra que o setor inicial do transecto voltou a apresentar um núcleo de temperatura ligeiramente mais elevada e menor umidade, comportamento associado ao processo de regulação térmica ao longo do percurso. Esse resíduo térmico não representa formação de ilha de calor, mas o ajuste natural que ocorre no início do transecto quando o ambiente atmosférico se encontra altamente úmido e com forte amortecimento térmico. A partir desse ponto inicial, o campo térmico se organiza de forma mais uniforme, resultando em um gradiente suave.

Desconsiderando o efeito da regulação do termo no ponto inicial, as temperaturas variaram aproximadamente entre 23 °C e 25 °C, revelando uma amplitude térmica reduzida e compatível com ambientes pós-precipitação. A elevada umidade superficial resultante das chuvas contribuiu para dissipar parte da energia térmica armazenada nas superfícies urbanas, comportamento amplamente discutido por Breunig e Freitas (2024), que destacam a chuva como um importante neutralizador de contrastes térmicos em áreas urbanizadas. Em Águas Claras, esse processo resultou no enfraquecimento dos núcleos mais aquecidos e na intensificação das zonas mais frias.

O campo higrométrico apresentou grande homogeneidade, com valores oscilando entre 67,4 % e 76,6 %, representando a maior umidade relativa observada até então entre os levantamentos anteriores. A maior parte do território apresentou umidade superior a 70 %, indicando que a atmosfera encontrava-se próxima ao

ponto de saturação. As áreas de maior umidade concentraram-se nas porções norte e nordeste, onde a vegetação arbórea, a presença de solos mais permeáveis e trechos de topografia sutilmente mais baixa favorecem o acúmulo de ar úmido e a formação de microclimas mais amenos. Estudos como os de Ferreira et al. (2022) e Moreira et al. (2023) demonstram que esses ambientes favorecem a intensificação da evapotranspiração e a acumulação de umidade em noites úmidas.

A precipitação registrada anteriormente ao levantamento desempenhou papel fundamental na estruturação térmica observada. A umidade superficial aumentada e o resfriamento advectivo pós-chuva favoreceram a rápida dissipação da energia acumulada nas superfícies urbanas, reduzindo diferenças internas. Esse mecanismo é coerente com a literatura, segundo a qual o resfriamento pós-precipitação e a saturação atmosférica reduzem substancialmente a autonomia térmica de áreas densamente urbanizadas (Mendonça, 2021). Em Águas Claras, tal dinâmica foi reforçada pela presença dos parques urbanos e das superfícies vegetadas, que funcionaram como áreas de dissipação térmica, mantendo temperaturas mais baixas especialmente nas porções oeste e norte.

A ausência de ventos significativos durante a coleta noturna contribuiu para a estabilidade local. Em situações de saturação atmosférica pós-precipitação, a ventilação é limitada e predominam movimentos verticais fracos, o que reduz a mistura horizontal e tende a uniformizar o campo higrotérmico. Esse comportamento é consistente com Monteiro (1976) e Amorim (2013), que descrevem a incapacidade de estruturas urbanas densas em gerar contrastes térmicos marcantes quando a atmosfera opera sob controle regional dominante.

O campo evidencia um quadro de forte amortecimento térmico e higrométrico, marcado por redução expressiva das diferenças internas, presença de microclimas mais amenos nas bordas vegetadas e regulação térmica no início do transecto. O sistema climático urbano já respondia predominantemente aos controles regionais típicos da pré-estação chuvosa.

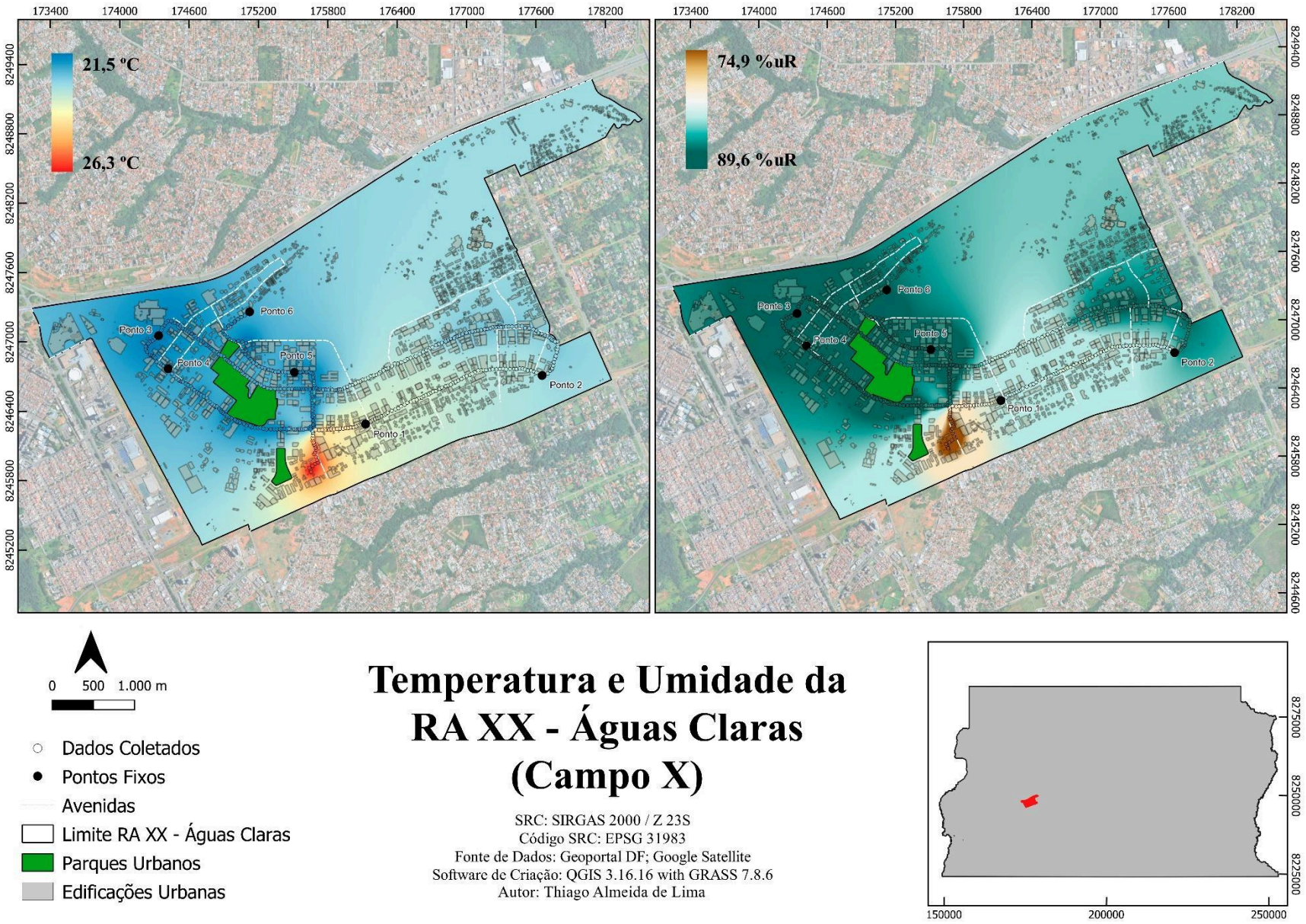


Figura 14 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo X) - Águas Claras

O décimo levantamento de campo foi realizado sob condições atmosféricas já fortemente influenciadas pela transição para o regime úmido no Distrito Federal. As cartas sinóticas indicavam a manutenção de convergência de umidade em baixos níveis e a atuação de ventos de noroeste e nordeste, situação típica da circulação convectiva da primavera no Planalto Central, como descrito por Marengo et al. (2020). A presença de nebulosidade persistente e precipitações esparsas nos dias anteriores reduziu a perda radiativa noturna e favoreceu a estabilização do campo térmico, produzindo um ambiente de forte saturação atmosférica.

As temperaturas variaram entre 21,5 °C e 26,3 °C, constituindo uma das menores amplitudes térmicas observadas ao longo de todo o período de campanha. A distribuição espacial mostra um campo quase homogêneo, com pequenas assimetrias associadas à regulação térmica durante o percurso do transecto. Em condições de alta umidade relativa e baixa disponibilidade de radiação, diferenças discretas tendem a se ajustar ao longo do trajeto, o que explica a suavidade do gradiente térmico. Esse comportamento está de acordo com Oke (1987) e Amorim (2013), que apontam a redução do fluxo de calor sensível e o aumento do calor latente como fatores responsáveis pelo declínio das ilhas de calor urbanas no início da estação úmida.

O campo higrométrico acompanhou esse padrão de forma coerente. Os valores oscilaram entre 74,9 % e 89,6 %, caracterizando uma atmosfera altamente saturada. A maior parte da área apresentou umidade acima de 80 %, o que reforça a tendência de homogeneização térmica e confirma a atenuação da influência da morfologia urbana sobre o resfriamento noturno. A literatura destaca que, em condições assim, o sistema climático urbano tende a operar com menor autonomia térmica, respondendo mais diretamente aos controles regionais e mesoescalas (Mendonça, 2021).

A porção oeste do recorte espacial manteve-se sistematicamente mais fria e úmida, padrão que se explica pela presença de corpos d água associados ao Parque Ecológico, vegetação abundante e topografia mais aberta. Esses fatores favorecem ventilação local e intensificam o resfriamento, conforme demonstrado por Ferreira et al. (2022) e Moreira et al. (2023). Trata-se de uma zona de dissipação

térmica, que contribui para a redistribuição interna de calor e umidade. Esse comportamento também confirma o papel da vegetação e das superfícies permeáveis como moduladores microclimáticos, conforme apontado por Monteiro (1976) em sua formulação do Sistema Clima Urbano.

Embora o núcleo inicial do transecto apresente valores ligeiramente superiores, não se trata de retenção térmica expressiva, e sim do resíduo associado à regulação do termo durante o deslocamento. Em condições úmidas, pequenas oscilações térmicas se ajustam rapidamente ao longo do percurso, o que reforça a interpretação de que o gradiente registrado é resultado do próprio processo de amostragem em ambiente saturado. Assim, o Campo X evidencia um estágio avançado de ajustamento do sistema urbano ao regime úmido, com forte redução da autonomia térmica local e predominância crescente dos controles atmosféricos regionais.

Esse conjunto de elementos confirma a proposição de Coutinho et al. (2022) de que o aumento contínuo da umidade restabelece o equilíbrio dos fluxos de calor e transforma o tecido urbano em um subsistema cuja regulação depende da atmosfera circundante. O comportamento registrado no Campo X corrobora a hipótese de Monteiro (1976) de que o sistema climático urbano busca constantemente a estabilidade térmica, reorganizando suas trocas de energia de acordo com as condições externas. No décimo levantamento, essa reorganização ocorreu de maneira eficiente, resultando em um campo térmico quase uniforme e fortemente condicionado pela umidade atmosférica elevada.

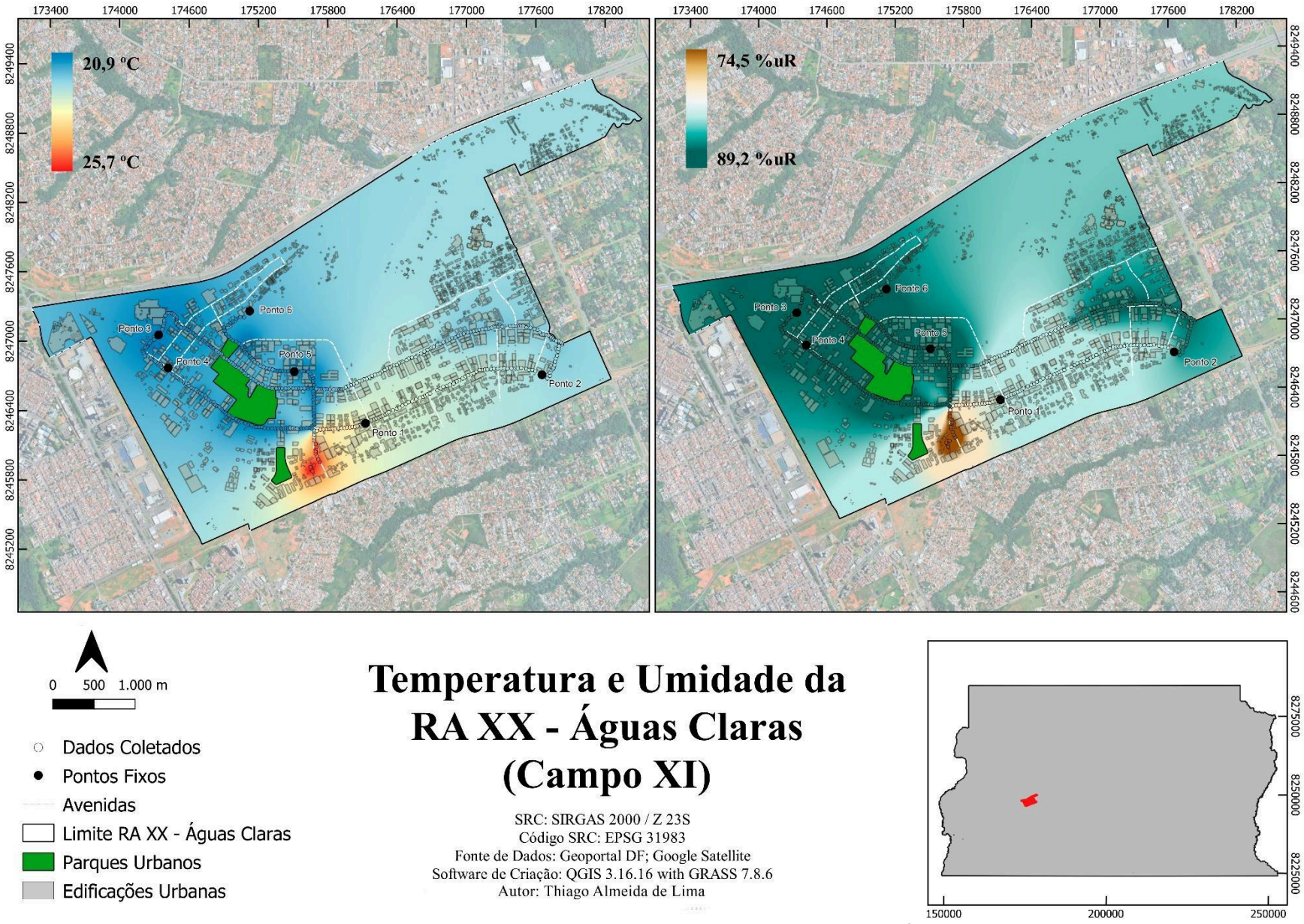


Figura 15 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo XI) - Águas Claras

O décimo primeiro levantamento de campo foi realizado sob condições atmosféricas plenamente associadas ao regime úmido, com elevada umidade relativa, ventos fracos e nebulosidade variável. As cartas sinóticas indicavam a atuação contínua de fluxos úmidos amazônicos e ventos de noroeste, configurando um quadro típico de estabilidade úmida no início da noite. Às 21h, a estação meteorológica de referência registrou 22,1 °C e 86 % de umidade relativa, em ambiente com céu parcialmente encoberto e baixa perda radiativa, situação amplamente descrita por Marengo et al. (2020) para este período do ano no Planalto Central.

As temperaturas variaram entre 20,9 °C e 25,7 °C, compondo um campo térmico de amplitude reduzida, condizente com a forte saturação atmosférica. A distribuição espacial, no entanto, não foi totalmente homogênea. O setor inicial do transecto apresentou valores discretamente mais altos, fenômeno associado ao processo de regulação térmica que ocorre durante a execução do levantamento em condições úmidas.

Em ambientes onde o fluxo de calor latente é dominante e a amplitude térmica é pequena, pequenas diferenças no início do percurso tendem a se ajustar à medida que o transecto avança, o que explica a tendência de uniformidade observada nos demais pontos. Esse comportamento reflete a regulação do termo, não a presença de uma ilha de calor urbana bem definida, e corresponde ao padrão identificado por Oke (1987) e Amorim (2013) para situações de alta umidade e redução do saldo de radiação líquida.

As umidades relativas ultrapassaram 80 % em quase toda a área urbana, alcançando valores superiores a 89 % na porção oeste. Essa área se destacou como a região mais fria e úmida do levantamento, condição diretamente associada à maior presença de vegetação, aos corpos d água vinculados ao Parque Ecológico e à topografia mais aberta, que favorece ventilação local e intensifica o resfriamento. Esse padrão confirma os resultados de Ferreira et al. (2022) e Moreira et al. (2023), que demonstram a relevância das superfícies permeáveis e da vegetação urbana na modulação do campo higrotérmico, sobretudo em contextos de elevada umidade atmosférica.

O núcleo urbano central, embora mais denso e verticalizado, não apresentou sobreaquecimento expressivo. A elevada saturação do ar reduziu a eficiência da perda radiativa e limitou a formação de contrastes térmicos mais intensos, situação descrita por Mendonça (2021) em estudos sobre cidades brasileiras no início da estação úmida. A atmosfera úmida funcionou como elemento nivelador, suavizando diferenças que, em períodos secos, são amplamente nítidas. Ainda assim, é possível reconhecer resquícios da influência morfológica no início do transecto, evidenciando que a regulação térmica opera de forma integrada entre os controles locais e os controles regionais.

Este campo apresenta um comportamento próximo ao observado no Campo XII. O sistema climático urbano encontra-se em fase avançada de ajustamento ao regime úmido, com forte atenuação dos contrastes internos, mas sem homogeneização absoluta. A porção oeste mantém-se sistematicamente mais fresca e úmida devido à combinação entre vegetação, corpos d água e topografia aberta, enquanto o início do transecto exibe pequenas diferenças que se ajustam ao longo do percurso, expressando a regulação do termo. O conjunto de dados demonstra que, mesmo sob elevado controle atmosférico regional, a morfologia urbana segue exercendo influência residual sobre a organização térmica e higrométrica local.

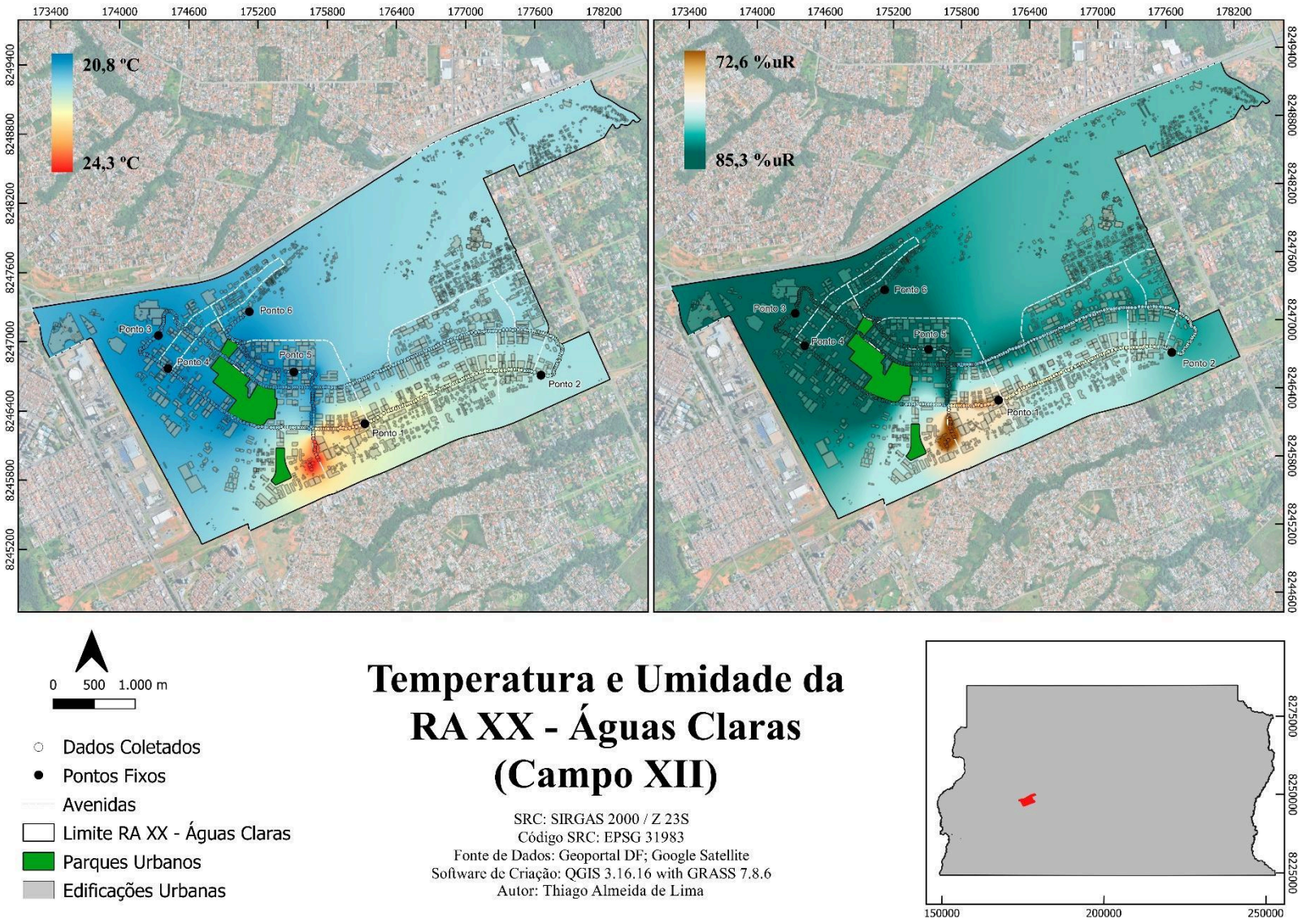


Figura 16 - Mapa de Temperatura e Umidade da RA XX (Campo XII) - Águas Claras

O último levantamento, correspondente ao Campo XII, foi realizado sob condições atmosféricas associadas à transição avançada para o regime úmido, caracterizadas por maior nebulosidade, ventos fracos e aporte constante de vapor em baixos níveis. A circulação regional favoreceu a convergência de umidade e reduziu a perda radiativa noturna, conferindo ao campo higrotérmico uma dinâmica distinta da observada nos levantamentos efetuados no auge da estação seca. Nesse cenário, os valores registrados em Águas Claras indicam forte tendência à homogeneização térmica, embora ainda seja possível identificar variações residuais associadas à estrutura urbana e à cobertura do solo.

As temperaturas oscilaram entre 20,8 °C e 24,3 °C, compondo um campo quase homogêneo e coerente com condições atmosféricas de elevada umidade relativa. Apesar dessa uniformidade, o setor inicial do transecto apresentou valores discretamente mais altos, fenômeno associado à própria regulação térmica produzida pelo deslocamento do transecto em ambiente úmido. Em situações de amplitude reduzida e com eficientes fluxos de calor latente, pequenas diferenças tendem a se ajustar ao longo do percurso, o que explica a uniformidade crescente registrada nos pontos seguintes.

O mapa revela que a maior parte da região apresentou temperaturas muito próximas entre si, reforçando a característica de estabilidade higrotérmica típica do início da estação chuvosa. A porção oeste, entretanto, destacou-se como o setor mais frio e úmido. Essa configuração está diretamente relacionada à presença de corpos d’água do Parque Ecológico, à vegetação abundante e à topografia mais aberta, que favorecem ventilação, maior eficiência na perda de calor e incremento na umidade relativa. Nesses trechos, as temperaturas aproximaram-se de 20,8 °C e a umidade superou 80 %, indicando microclima mais ameno em comparação às áreas densamente edificadas.

O campo higrométrico apresentou estrutura compatível com essa distribuição térmica. As menores umidades, em torno de 72,6 %, concentraram-se no ponto inicial do transecto, enquanto os valores mais elevados ocorreram nas áreas vegetadas e próximas aos corpos d água. A elevada umidade relativa reduziu significativamente os contrastes internos, mas não eliminou completamente a

influência da morfologia urbana sobre a organização higrotérmica, sobretudo no início do trajeto.

Embora o Campo XII apresente um quadro quase homogêneo, característico do regime úmido, observa-se que controles locais ainda atuam na modulação da temperatura e da umidade. A porção oeste evidencia o papel dos corpos d'água, da vegetação e da topografia aberta na intensificação do resfriamento e da umidade, enquanto pequenas diferenças no início do percurso refletem a regulação térmica ao longo do transecto. O conjunto desses elementos mostra que o sistema urbano encontrava-se em fase avançada de ajustamento ao regime úmido, com forte redução das diferenças microclimáticas, mas sem anulá-las completamente.

As campanhas noturnas realizadas em Águas Claras revelaram padrões térmicos e higrométricos que refletem a heterogeneidade do tecido urbano e a influência direta da morfologia e da cobertura do solo sobre o microclima local. De modo geral, observou-se que as áreas centrais, caracterizadas por maior adensamento construtivo e reduzida presença vegetal, apresentaram temperaturas mais elevadas e umidade relativa do ar mais baixa, enquanto as bordas do transecto, com maior proporção de áreas verdes, mostraram condições mais amenas.

Essas diferenças espaciais evidenciam o papel das superfícies artificiais na modificação do balanço energético urbano, conforme já discutido por Monteiro (1976) em sua formulação do Sistema Clima Urbano (S.C.U.). O contraste entre os pontos de medição também se manifesta em gradientes térmicos suaves, com tendência de elevação progressiva da temperatura em direção ao núcleo mais verticalizado da região. Em contrapartida, as variações higrométricas acompanham o comportamento inverso, reforçando a influência do uso e ocupação do solo e da densidade urbana sobre a distribuição da umidade.

As campanhas realizadas em diferentes datas permitiram identificar a persistência desses padrões, ainda que com pequenas variações em função das condições sinóticas e das circulações locais. A manutenção de temperaturas mais elevadas em áreas pavimentadas e de alta verticalização confirma a formação de microclimas diferenciados, associados às chamadas ilhas de calor noturnas,

fenômeno amplamente descrito por estudos recentes em cidades brasileiras de porte semelhante (Ferreira et al., 2021; Santos e Mendonça, 2023). O transecto noturno mostrou também que a direção predominante dos ventos e a disposição das vias influenciam significativamente a dispersão térmica, uma vez que eixos mais abertos e alinhados às correntes regionais tendem a favorecer o resfriamento, enquanto ruas mais estreitas e densamente edificadas retêm calor por maior período.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto de análises desenvolvidas ao longo deste trabalho permitiu caracterizar, com maior precisão, o comportamento do clima noturno em Águas Claras. As doze campanhas realizadas entre setembro e novembro de 2024, período marcado pela transição entre o regime seco e o início da estação úmida no Distrito Federal, evidenciaram o papel estruturante da morfologia urbana, do adensamento construtivo e da presença de vegetação na organização do campo higrotérmico local.

Nas semanas iniciais de coleta, quando ainda prevaleciam condições atmosféricas típicas da seca, observou-se um padrão compatível com ambientes urbanizados de elevada densidade: temperaturas sustentadas após o pôr do sol, umidade relativa reduzida e contrastes térmicos que, em alguns pontos, superaram 4ºC entre áreas verticalizadas e setores próximos à vegetação.

Nesse contexto, a presença do Parque Ecológico Águas Claras introduz uma componente diferenciadora no microclima da região. O parque mantém área significativa de mata de galeria, além de nascentes, dois lagos, e corredores vegetados que preservam atributos ecológicos relevantes. Sua configuração funciona como moderadora térmica, sobretudo em noites secas, quando a maior disponibilidade de umidade e a presença de superfícies vegetadas e corpos d’água contribuem para atenuar extremos higrotérmicos.

As campanhas evidenciaram que áreas próximas à mata ciliar e aos espelhos d’água apresentaram temperaturas mais baixas e valores superiores de umidade relativa, confirmando o papel desses elementos na dissipação de calor e no reequilíbrio hídrico local. A interação entre adensamento urbano e fragmentos naturais, característica marcante de Águas Claras, produziu um conjunto de contrastes térmicos que acompanhou a distribuição espacial da rugosidade urbana e da vegetação.

Mesmo diante dessa heterogeneidade interna, setores altamente verticalizados mantiveram-se aquecidos por períodos mais prolongados, coerentes com o

funcionamento descrito por Monteiro ao considerar o sistema climático urbano como estrutura que armazena e redistribui energia.

O confinamento radiativo promovido pelos cânions urbanos, a redução da ventilação e a predominância de superfícies impermeáveis favoreceram a persistência do calor noturno. Já as quadras mais abertas e espaços adjacentes ao parque apresentaram maior eficiência de resfriamento. Esses comportamentos reiteram a necessidade de leituras que integrem a dimensão morfológica às variáveis atmosféricas, já que a estrutura urbana regula diretamente os fluxos de calor sensível e latente.

Com o avanço da umidade atmosférica ao longo da primavera, os contrastes térmicos internos tenderam à redução. A presença mais frequente de nebulosidade noturna e o aumento do teor de vapor contribuíram para um resfriamento espacialmente mais uniforme. Em novembro, as diferenças entre os pontos praticamente desapareceram, indicando que, em condições de maior saturação hídrica, o controle regional passa a se sobrepor ao efeito morfológico direto. Ainda assim, permanecem evidências de que relações geométricas entre altura e largura das quadras continuam modulando a eficiência da perda radiativa mesmo nesse período.

A correlação negativa entre temperatura e umidade, observada de forma consistente nas campanhas, reforça a influência das superfícies impermeabilizadas na intensificação térmica e a importância das áreas vegetadas na moderação microclimática. A mata de galeria, ao operar como reguladora da umidade e do sombreamento, e o corpo d’água, ao fornecer umidade adicional e alterar o balanço energético local, funcionaram como importantes elementos de amenização noturna.

Quando analisados em conjunto com as cartas sinóticas, os dados revelaram que noites sob influência da mTa continentalizada apresentaram maior desconforto térmico, enquanto a chegada de sistemas úmidos reorganizou a distribuição do calor e reduziu os contrastes, evidenciando a importância de integrar escalas local e regional na interpretação do clima urbano.

No âmbito de estudos microclimáticos em áreas urbanas, é usual que determinados aspectos operacionais se constituam como elementos a serem aprimorados em investigações subsequentes. A ausência de uma estação meteorológica de referência instalada especificamente na região analisada, a variabilidade intrínseca das condições atmosféricas durante as campanhas e a possibilidade de empregar, em fases futuras, técnicas tridimensionais mais avançadas para a determinação do fator de visão do céu configuram, sobretudo, potenciais de refinamento metodológico. Tais elementos não comprometeram a robustez das análises desenvolvidas e devem ser entendidos como oportunidades de ampliação da resolução espacial e temporal em estudos posteriores.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o comportamento térmico noturno da RA é fortemente condicionado pela articulação entre densidade construtiva, circulação de ar e disponibilidade de superfícies vegetadas. Esse conjunto de fatores reforça a necessidade de incorporar, no planejamento urbano, diretrizes que considerem não apenas a distribuição de áreas verdes, mas também sua conexão com os fluxos atmosféricos predominantes.

A existência do parque demonstra que fragmentos naturais contínuos são capazes de reorganizar parte do balanço energético local. Contudo, sua influência pode ser significativamente ampliada quando integrada a corredores de ventilação planejados, o que demanda abordagens urbanísticas que superem o parcelamento isolado e considerem sistemas de circulação do ar em escala de bairro.

Outro aspecto relevante refere-se à importância do estudo noturno dentro das pesquisas de climatologia urbana. O período pós-ocaso constitui janela temporal particularmente sensível às interferências da forma urbana, pois os processos de perda radiativa, ainda que dependentes das condições sinóticas, respondem de maneira direta à geometria dos cânions e ao grau de sombreamento residual das superfícies.

Essa sensibilidade permite identificar, com maior clareza, os efeitos da verticalização sobre o armazenamento térmico, revelando nuances que muitas vezes passam despercebidas em análises restritas ao período diurno. A adoção de

transectos móveis, portanto, mostrou-se adequada para captar variações espaciais de pequena escala, essenciais para a leitura do microclima.

Convém destacar, ainda, que o comportamento dual observado em Águas Claras se alinha à lógica sistêmica do S.C.U., em que a cidade responde simultaneamente aos controles internos e externos. Essa perspectiva permite interpretações que transcendem a descrição de valores absolutos de temperatura e umidade e avançam para a compreensão dos mecanismos que explicam tais padrões.

Ao reconhecer que o efeito da verticalização não desaparece no período úmido, mas é suavizado pela atuação de controles regionais, reforça-se a necessidade de abordagens multiescalares que combinem levantamentos locais, análise sinótica e modelagens que simulem interações entre os diferentes níveis do sistema atmosférico.

Por fim, cabe apontar que a consolidação deste trabalho contribui para uma agenda mais ampla de pesquisas sobre o clima urbano no Distrito Federal. A região carece de estudos sistemáticos que articulem forma urbana, vegetação e atmosfera em escalas intraurbanas detalhadas. Assim, o presente esforço inaugura caminho promissor para investigações que ampliem a compreensão sobre vulnerabilidade térmica, desconforto ambiental, exposição populacional e seus vínculos com desigualdades socioespaciais. A continuidade em nível de doutorado permitirá aprofundar esses elementos, incorporar séries multianuais, empregar modelagens microclimáticas tridimensionais e desenvolver diagnósticos capazes de subsidiar políticas urbanas mais eficientes e climaticamente sensíveis.

A análise conduzida ao longo desta dissertação demonstra que o clima urbano de Águas Claras apresenta comportamento dual. No auge da estação seca, a estrutura morfológica exerce influência predominante sobre o campo termodinâmico. Com o avanço da umidade, os controles atmosféricos regionais tendem a sobrepor-se ao efeito imediato da forma urbana. Essa dupla resposta sintetiza uma das premissas centrais do S.C.U., segundo a qual o ambiente urbano participa ativamente da construção de seu próprio clima e, simultaneamente, responde às dinâmicas atmosféricas de maior escala.

A continuidade deste estudo em níveis maiores abre perspectivas para a incorporação de séries multianuais, modelagens microclimáticas tridimensionais, análises comparativas entre diferentes regiões administrativas do Distrito Federal e investigações sobre vulnerabilidades socioambientais associadas ao desconforto térmico. Ao invés de encerrar a discussão, esta dissertação inaugura um campo fértil de aprofundamentos, contribuindo para o avanço do conhecimento climatológico aplicado ao planejamento urbano e para o desenvolvimento de cidades mais adaptadas às condições ambientais parecidas a de Águas Claras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. F. M. C.; SILVA, M. V. C. D.; GANDU, A. W.; ROCHA, C. A.; CAVALCANTE, R. M. Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza, Ceará. 2017.

AMORIM, M. C. D. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 27, p. 1-18, 2019.

ANDRADE, H. O clima urbano – natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra*, XL, 80, p. 67-91, 2005.

ARAÚJO, G. G. de; Galvani, E. Estudo microclimático do Parque Trianon e seu entorno no município de São Paulo – SP. *Revista Presença Geográfica*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 28–43, 2022. DOI: 10.36026/rpgeo.v8i1.5321. Disponível em: https://periodicos.unir.br/index.php/RPGeo/article/view/5321. Acesso em: 17 ago. 2025.

ATTANASIO, C. M. et al. A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas. *Bragantia*, v. 71, n. 4, p. 493-501, 2012. DOI: 10.1590/S0006-87052013005000001.

ATKINSON, B. W. Atmospheric processes. Global and local. In: CLARK, M. J.; GREGORY, K. J.; GURNELL, A. M. *Horizons in physical geography*. London: Macmillan Education Ltd., 1987. p. 175-206.

AYOADE, J. O. *Introdução à Climatologia para os trópicos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1988.

BATTISTA, G.; EVANGELISTI, L.; GUATTARI, C.; VOLLARO, R. L. On the influence of geometrical features and wind direction over an urban canyon applying a FEM analysis. *Energy Procedia*, v. 81, p. 11-21, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.054.

BERTALANFFY, L. *Teoria Geral dos Sistemas*. Tradução de Francisco M. Guimarães. Petrópolis: Vozes, 1973. 351 p.

BENZIADA, Radia; KACEMI, Malika; MOKHTARI, Abderahemane Mejedoub; FEZZIOUI, Naima; HARRAT, Zouaoui R.; CHATBI, Mohammed; HILAL, Nahla; MANSOUR, Walid; SOBUZ, Md. Habibur Rahman. Optimizing urban thermal comfort through multi-criteria architectural approaches in arid regions: the case of Béchar, Algeria. *Sustainability*, v. 17, n. 17, p. 7658, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17177658.

BOURBIA, F.; BOUCHERIBA, F. Impact of Street Design on Urban Microclimate for Semi-Arid Climate (Constantine). Renewable Energy, v. 35, p. 343-347, 2010.

BRANDÃO, L. K. de V.; BARBOSA, R. V. R. Relação entre morfologia urbana e microclima a partir de cenários parametrizados em cidade de clima tropical de savana. *Diversitas Journal*, v. 8, n. 1, p. 480-493, 2023. DOI: 10.48017/dj.v8i1.2368

CAMPANHONI, A. *Implantação dos edifícios em Águas Claras-DF: influência no desempenho térmico ambiental dos espaços abertos*. Brasília: Universidade de Brasília, 2011. Dissertação de Mestrado.

_____, A. Planejamento urbano, cidade compacta e infraestrutura adequada: caso de Águas Claras - DF. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPUR, 2013, Recife. Anais... Recife: ENANPUR, 2013. p. x.

COLLISCHONN, E.; FERREIRA, C. V. O. O fator de visão do céu e sua influência sobre as características térmico-higrométricas intraurbanas em Pelotas/RS, Brasil. *Geographia Meridionalis*, v. 1, p. 160-178, 2015

EMMANUEL, R.; JOHANSSON, E. Influence of Urban Morphology and Sea Breeze on Hot Humid Microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. Climate Research, v. 30, n. 3, p. 189-200, 2006.

FERNANDES, Maria Eugênia; MASIERO, Érico. Relação entre conforto térmico urbano e Zonas Climáticas Locais. Revista Brasileira de Gestão Urbana, [S. l.], v. 12, 2020. Disponível em: https://periodicos.pucpr.br/Urbe/article/view/26467. Acesso em: 17 abr. 2025.

FREITAS, T. P. F. O clima urbano das cidades e suas interações com a arquitetura e a geografia. *Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia*, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 262–272, 2019. DOI: 10.14393/OREG-v9-n3-2018-48491. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/48491. Acesso em: 19 abr. 2024.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual do conforto térmico*. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

GARTLAND, L. *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. Tradução: Sílvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 248 p.

GONÇALVES, N. M. S. Impactos pluviais e desorganização do espaço urbano em Salvador. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Orgs.). *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2013. p. 69-91. 2. ed., 1° reimp.

GOBO, J. P. A. Regionalização climática do Rio Grande do Sul com base no zoneamento do conforto térmico humano. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, 2013.

GOUVÊA, L. A. *Brasília: a Capital da segregação e do controle social - Uma avaliação da ação governamental na área da habitação*. São Paulo: Annablume, 1995.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. Informações sobre a RA. Disponível em: https://www.aguasclaras.df.gov.br/category/sobre-a-ra/informacoes/. Acesso em: 12 abr. 2024.

HUANG, Z.; LI, X.; WANG, Y.; CHEN, T. *Urban morphology and heat stress: Integrating social vulnerability and atmospheric patterns in megacities of East Asia.* Urban Climate, v. 55, p. 102018, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102018

LAU, Kevin Ka-Lun; CHUNG, Sum Ching; REN, Chao. Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment*, v. 154, p. 227-238, maio 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.005

LAMBERTS, R. et al. *Desempenho térmico de edificações*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1995. 82 p. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/graduacao/ecv_5161/ApostilaECV5161_Versao2005_Modulo1.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

LI, H. *Pavement materials for heat island mitigation: design and management strategies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

LIMA, N. R.; PINHEIRO, G. M.; MENDONÇA, C. Clima urbano no Brasil: Análise e contribuição da metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. Revista Geonorte. V. 2, n. 5, p. 626-638, 2012.

LINDBERG, F.; HOLMER, B. *Sky view factor calculator. User manual. Version 1.1*. Gothenburg: University of Gothenburg, 2012.

LIU, C.; YE, X.; XU, Y.; SUN, Q.; XU, Y. *Exploring the impact of urban morphology on heat stress: A high-resolution microclimate simulation study.* Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 0, n. 0, 2025. DOI: 10.1177/23998083251387477.

LEMOS, L. O.; Júnior, A. C. O. S.; Mendonça, F. Urban canyon in the CBD of Rio de Janeiro (Brazil): thermal profile of Avenida Rio Branco during summer. *Atmosphere*, v. 13, n. 1, p. 27, 2022. DOI: 10.3390/atmos13010027.

LOMBARDO, M. A. *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: Hucitec, 1985. 244 p.

LÓIS, É.; SANTOS, R. F.; LABAKI, L. C. Efeitos de diferentes estruturas de vegetação ciliar sobre as variáveis de microclima e a sensação de conforto térmico. *Revista do Instituto Florestal*, v. 23, n. 1, p. 117-136, 2011. DOI: 10.24278/2178-5031.2011231289.

MARENGO, J. A. *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*. Brasília: MMA, 2007. 2. ed.

MARENGO, J.A., Cunha, A.P.M.A., Nobre, C.A. *et al.* Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. *Nat Hazards* 103, 2589–2611 (2020). https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3

MEGDA, O. R.; MASIERO, E. Análise das ilhas de calor urbano sobre zonas climáticas locais com uso de VANT. *Urbe – Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, p. (não numerado no cabeçalho), 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/urbe/a/rsrSqQWfjW34rFHpGL8YHNp/?format=html. Acesso em: 17 abr. 2025.

MENDONÇA, F. *O clima e o planejamento de cidades de porte médio e pequeno: proposição teórico-metodológica e sua aplicação à cidade de Londrina/PR*. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MENDONÇA, F. de A. O estudo do SCU – Sistema Clima Urbano – no Brasil: aplicações e avanços. In: MENDONÇA, F.; MONTEIRO, C. A. de F. (org.). A construção da climatologia geográfica no Brasil. 2. ed. São Paulo: Contexto, 2015. p. 192.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.* São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MEGDA, O. R.; MASIERO, E.. Análise das ilhas de calor urbano sobre zonas climáticas locais com o uso de VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado - em uma cidade média. *URBE: Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, n. 1, p. 1-14, 2021. DOI: 10.1590/2175-3369.013.e20200333.

MIDDEL, Ariane; NAZARIAN, Negin; DEMUZERE, Matthias; BECHTEL, Benjamin. *Urban Climate Informatics: An Emerging Research Field. Frontiers in Environmental Science*, v. 10, p. 1–15, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.867434.

MINELLA, Fábio de Oliveira; ROSSI, Fernando Augusto; KRÜGER, Eduardo Luiz. Análise do efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e no conforto nas ruas de pedestres de Curitiba. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 121–134, abr./jun. 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ac/a/hsjKXZZwzKjDx7jyngZqbdJ/. Acesso em: 17 abr. 2025.

MONTEIRO, C. A. F. Teoria e clima urbano. Série Teses e Monografias, n. 25. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. O clima urbano e os efeitos da verticalização. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Org.). *O Clima Urbano: Aspectos e Aplicações*. São Paulo: Contexto, 2003. p. 45-67.

MONTEIRO, K. C. R.; LIMA, E. M. *A teoria Sistema Clima Urbano e suas contribuições ao estudo do microclima e do conforto térmico. Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 7, p. 1–15, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n7-224

MOREIRA, A. B.; NÓBREGA, R. S.; WANDERLEY, L. S. de A.; MATZARAKIS, A. Urban heat island vulnerability in the city of Recife, Pernambuco, Brazil. *Weather, Climate, and Society*, Boston, v. 16, p. 105–116, 2023. DOI: 10.1175/WCAS-D-23-0082.1. Disponível em: https://doi.org/10.1175/WCAS-D-23-0082.1. Acesso em: 15 abr. 2025.

MOREIRA, A. B.; WANDERLEY, L. S. de A.; DUARTE, C. C.; MATZARAKIS, A. Atmospheric conditions related to extreme heat and human comfort in the city of Rio de Janeiro (Brazil) during the first quarter of the year. *Atmosphere*, Basel, v. 15, n. 8, p. 973, 2024. DOI: 10.3390/atmos15080973. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4433/15/8/973. Acesso em: 17 abr. 2025.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. D.; MOTA, L. T. M. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 3, p. 177-196, 2018.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. de; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 73-87, jul./set. 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000300093.

NAZARETH, S. B. M.; FREITAS, N. V. S.; PISANI, M. A. J. O impacto da verticalização dos edifícios nas condições microclimáticas em clima tropical quente e úmido. In: *9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2021 Digital)*, 2021. Disponível em: https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper1262.pdf. Acesso em: 16 nov. 2023.

Niamir, L.; Pachauri, S. From social and natural vulnerability to human-centered climate resilient coastal cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, v. 5, 2023. DOI: 10.3389/frsc.2023.1137641

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v. 1, n. 3, p. 237-254, 1981.

___, T. R. Methods in urban climatology. In: *Zürcher Geographische Schriften: Applied Climatology*, 25th International Geographical Congress Symposium, n.º 18: Applied Geography Zurich. Zürich, 1984. p. 19-30.

___, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v. 6, p. 235-254, 1986.

___, T. R. *Boundary layer climates*. 2. ed. London: Routledge, 1987.

PASCOALINO, A.; MARANDOLA JR, E. A vulnerabilidade na cidade e as escalas do clima urbano: o potencial das unidades climáticas para o planejamento. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 14, n. 5, p. 2711–2726, 2021.

PAVIANI, A. O “Projeto Águas Claras” - planejamento desperdiçado. In: PAVIANI, A. (Ed.). *Brasília, a metrópole em crise: ensaios sobre urbanização*. Brasília: Editora UnB, 2010. p. 111-143.

PEREIRA, L. B.; CRUZ, L. S. F. Da crítica à superquadra ao quarteirão murado: o caso de Águas Claras em Brasília. *PosFAUUSP*, São Paulo, Brasil, v. 28, n. 52, p. e175043, 2021. DOI: 10.11606/issn.2317-2762.psrevprogramapsgradarquiturbanfauusp.2021.175043. Acesso em: 26 fev. 2024.

PRIETO, R. B. Mapeamento multiescalar de áreas suscetíveis a chuvas persistentes, extremas e abrangentes em Santa Catarina entre 1986-2016. 2022. 114 f. Tese (Doutorado em Planejamento Territorial e Desenvolvimento) - Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Florianópolis, 2022. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/faed/id_cpmenu/7028/TESE_RAIDEL___Julho_2022_16712212906057_7028.pdf. Acesso em: 18 jan. 2024.

RAMACHANDRA, T. V.; RANA, R. S.; VINAY, S.; et al. *Urban heat island linkages with the landscape morphology. Scientific Reports*, v. 15, p. 24485, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-09141-

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. *Boletim de Geografia Teorética*, v. 23, [S.l.], 1993.

ROMERO, M. A. B. Arquitetura Bioclimática do Espaço Público. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2014.

RODRIGUES, Marília Guimarães; GONÇALVES, Pedro Henrique; ZIEBELL, Clarissa Sartori; ENGEL, Ernestina Rita Meira; SILVA, Caio Frederico e. Coleta de dados com sistema móvel para padronização e análise de ilha de calor urbano em Goiânia-GO. *Anais do ENSUS 2024 – XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto*, UFMG/UFSC, 2024

SANT’ANNA NETO, J. L. Por uma Geografia do Clima - antecedentes históricos, paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. *Terra Livre*, v. 17, 2001.

SANT’ANNA NETO, J. L. O clima urbano como construção social: da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 8, n. 7, p. 45-60, 2011.

SANTOS, Milton. *A urbanização brasileira*. São Paulo: Hucitec, 1993.

SERRANO, A. d. O processo de verticalização em espaços urbanos: o exemplo de Águas Claras-DF. In: *Anais do XVI Encontro Nacional dos Geógrafos*, p. 1-11. Porto Alegre: Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2010.

SILVA, M. A. A especulação imobiliária descaracterizando uma ideia: o caso de Águas Claras, no DF. In: *Anais do IV ENANPARQ*. Porto Alegre, 2016.

SMITH, A.; Blanco, E.; Sarricolea, P.; Peralta, O.; Thomas, F. Urban climate simulation model to support climate-sensitive planning decision making at local scale. *Journal of Urban Management*, v. 14, n. 1, p. 279–292, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.11.003. Acesso em: 11 abr. 2025

SOUZA, L. C. L; TENTE, C. M.; GIUNTA, M. B.; NAKATA, C. M. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 155-167, out./dez. 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/ac/v10n4/v10n4a13. Acesso em: 05 abr. 2023.

SMITH, Amela; BLANCO, Estela; SARRICOLEA, Pablo; PERALTA, Orlando; THOMAS, Felipe. Urban climate simulation model to support climate-sensitive planning decision making at local scale. *Journal of Urban Management*, v. 14, n. 1, p. 279-292, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.11.003. Acesso em: 11 abr. 2025.

TAMBOSI, L. R. et al. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. *Estudos Avançados*, v. 29, n. 84, p. 151-162, 2015. DOI: 10.1590/S0103-40142015000200010.

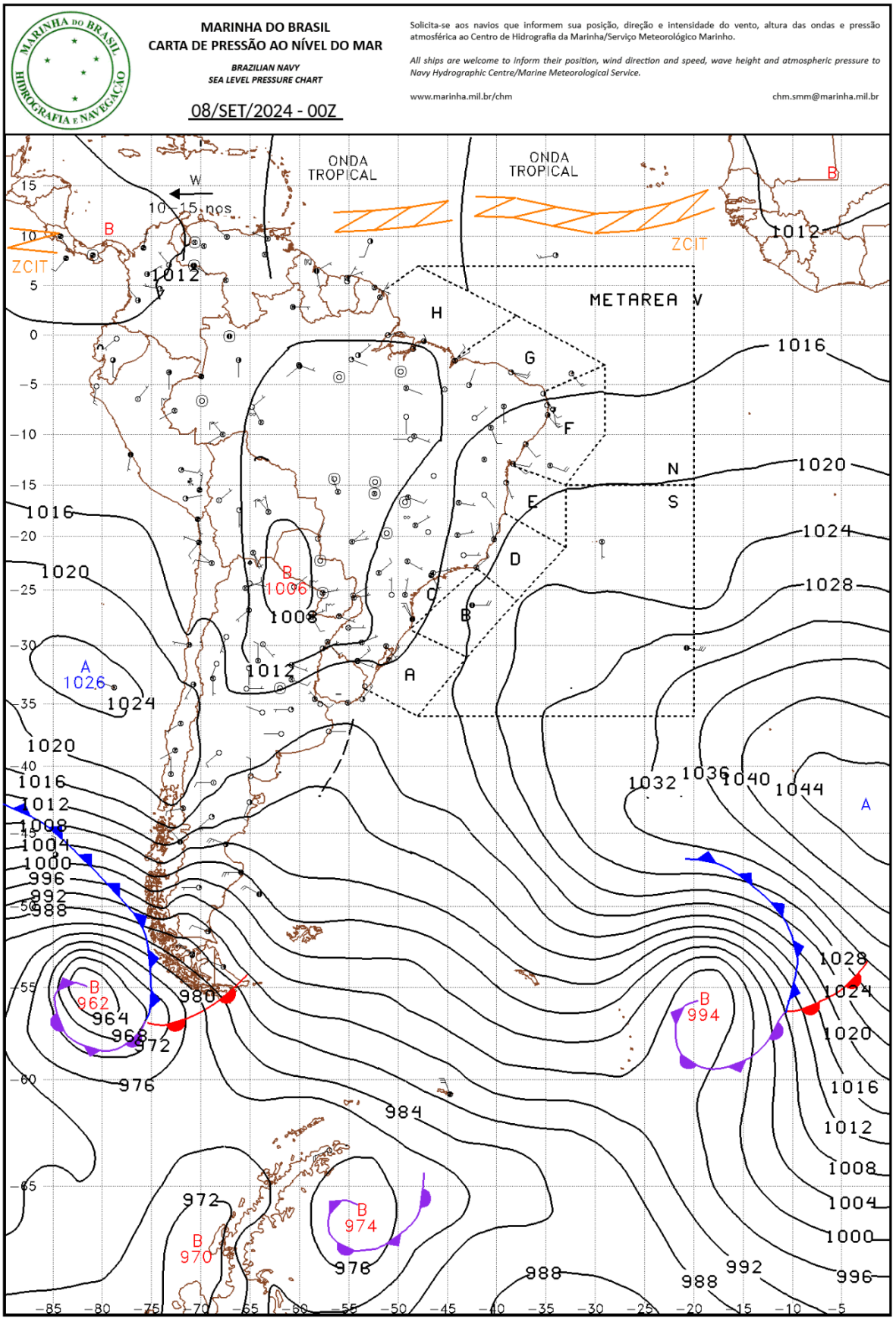
VALIN JR., M. O.; SANTOS, F. M. M. Levantamento bibliográfico da utilização de transectos em pesquisas de clima urbano no Brasil e recomendações de padronização nos procedimentos. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 26, p. 425-440, 2020.

VIEIRA, N.R.; Poluição do ar: Indicadores ambientais. Rio de Janeiro: E-papers, 2009.

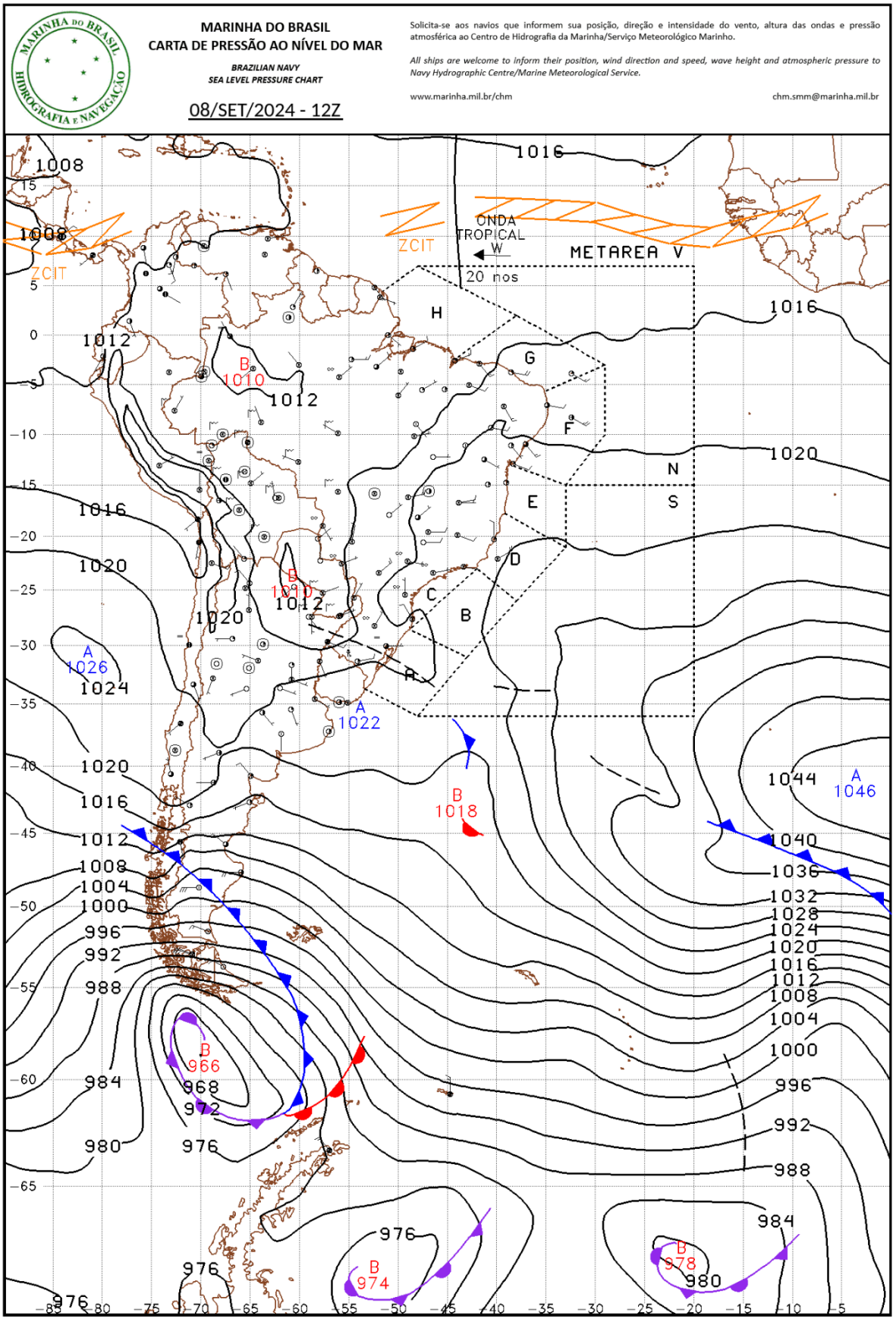
ZHOU, D.; XIAO, J.; BONAFONI, S.; BERGER, C.; DEILAMI, K.; ZHOU, Y.; FROLKING, S.; YAO, R.; QIAO, Z.; SOBRINO, J. A. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, v. 11, n. 1, p. 1–36, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs11010048. Acesso em: 10 maio 2024.

ZHANG, Yuhan; KONG, Ying; CHEN, Cen; LIN, Jiayi; LIN, Dongli; ZHANG, Yaowen; LI, Yingnan. *The impact of urban morphology on thermal environment under extreme heat: A case study in Nanjing, China*. Urban Climate, v. 58, 2024. DOI: 10.1016/j.uclim.2024.102178

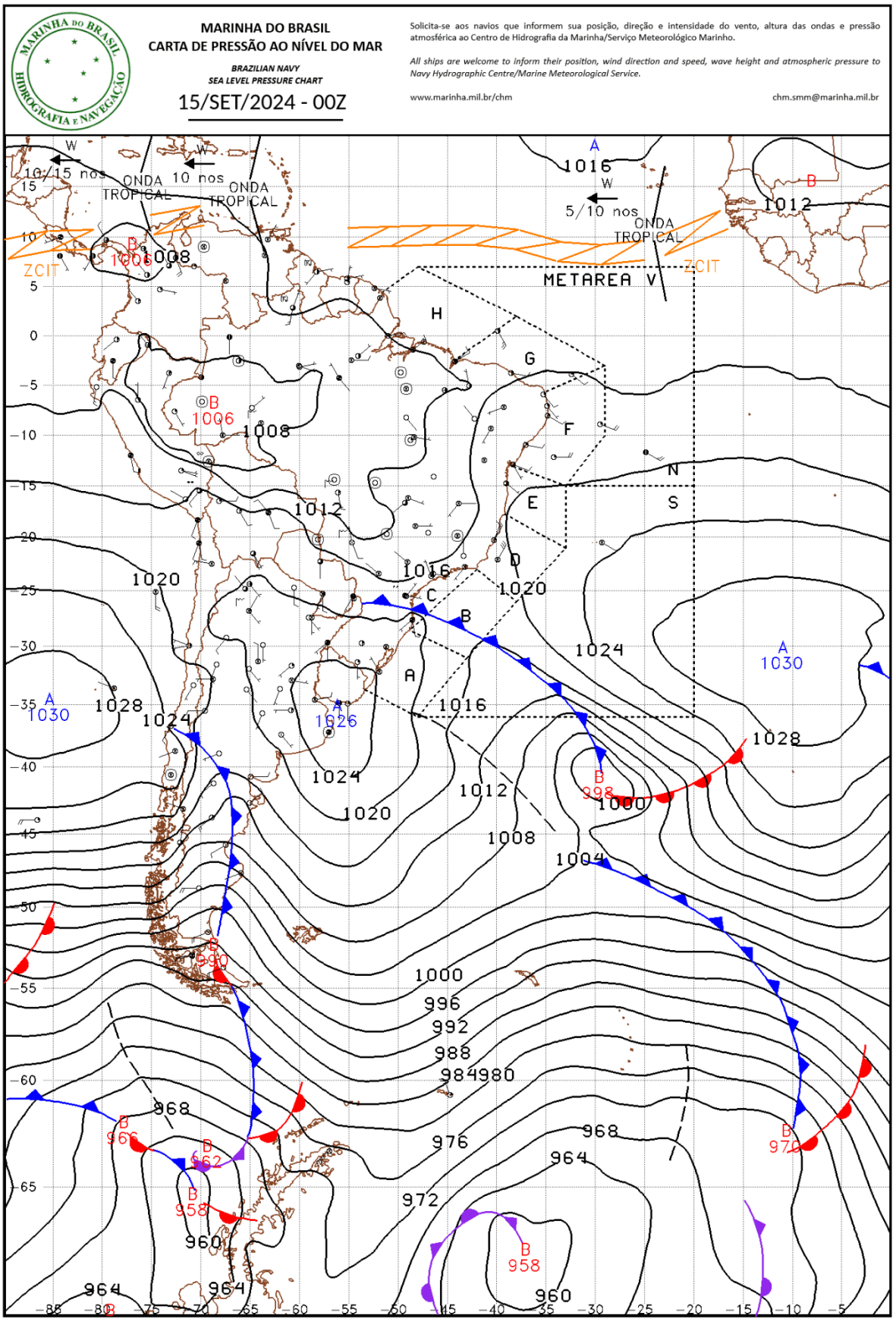
ANEXOS



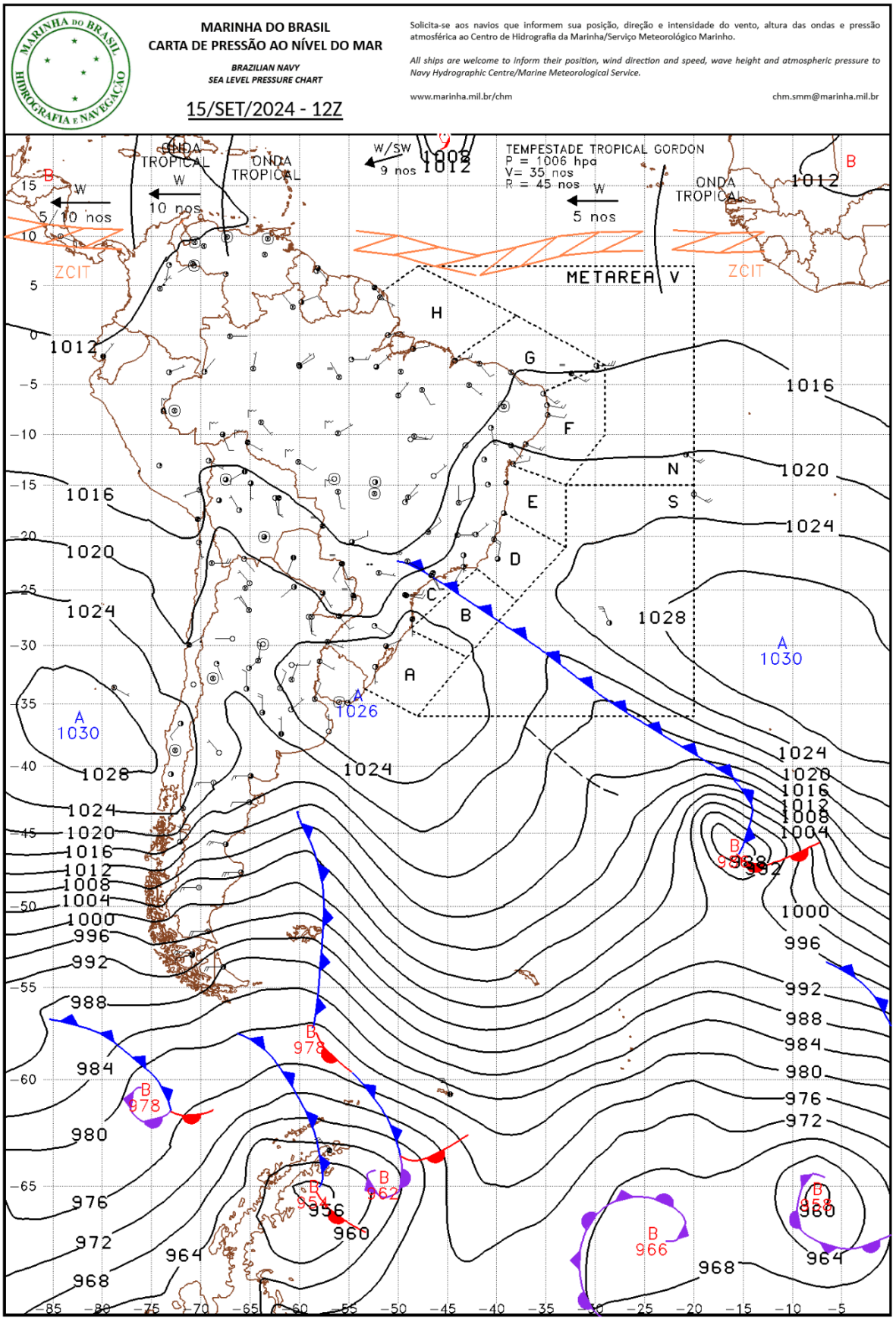
Anexo 1 - Carta Sinótica (08/09/2024 - 00z)



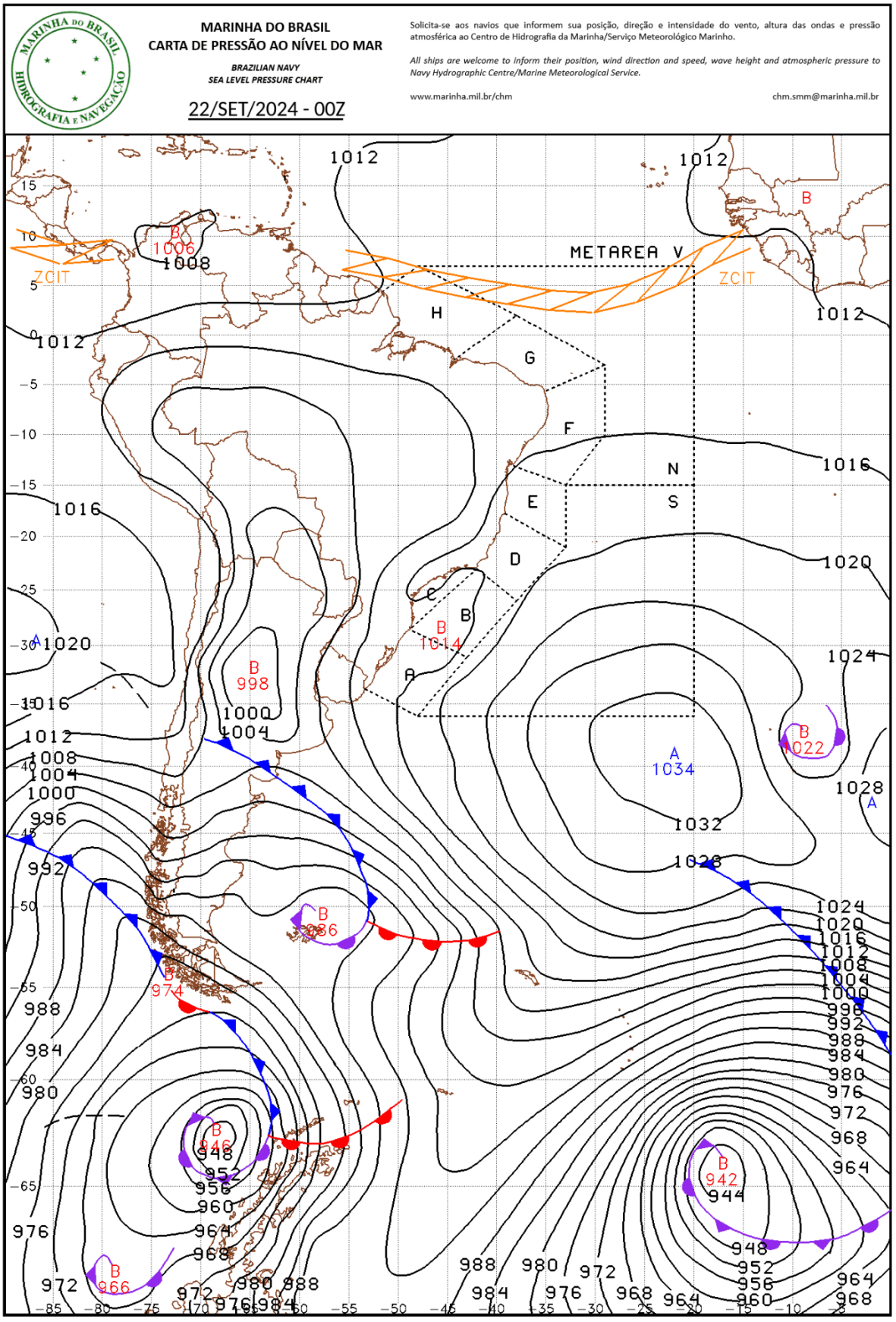
Anexo 2 - Carta Sinótica (08/09/2024 - 12z)



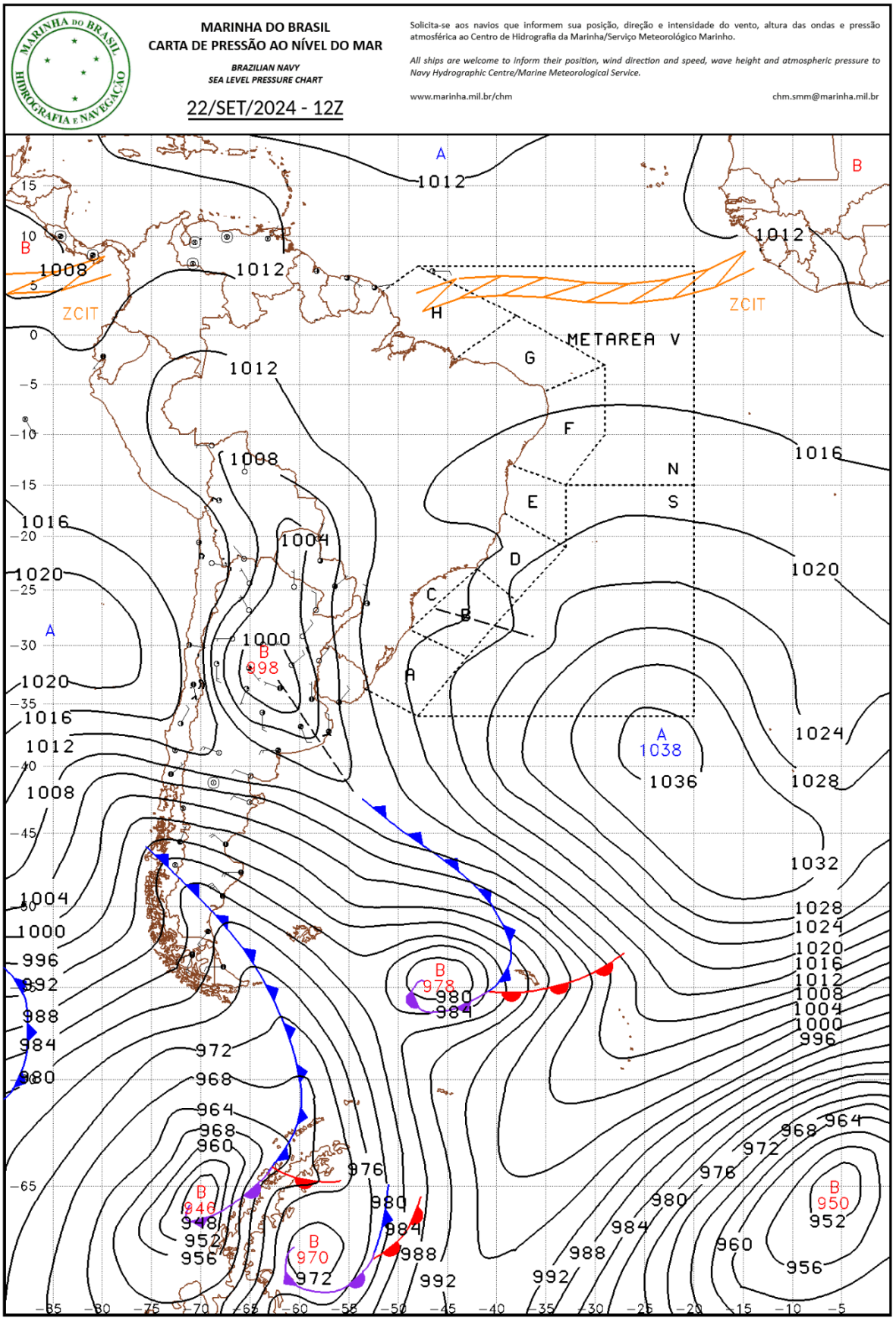
Anexo 3 - Carta Sinótica (15/09/2024 - 00z)



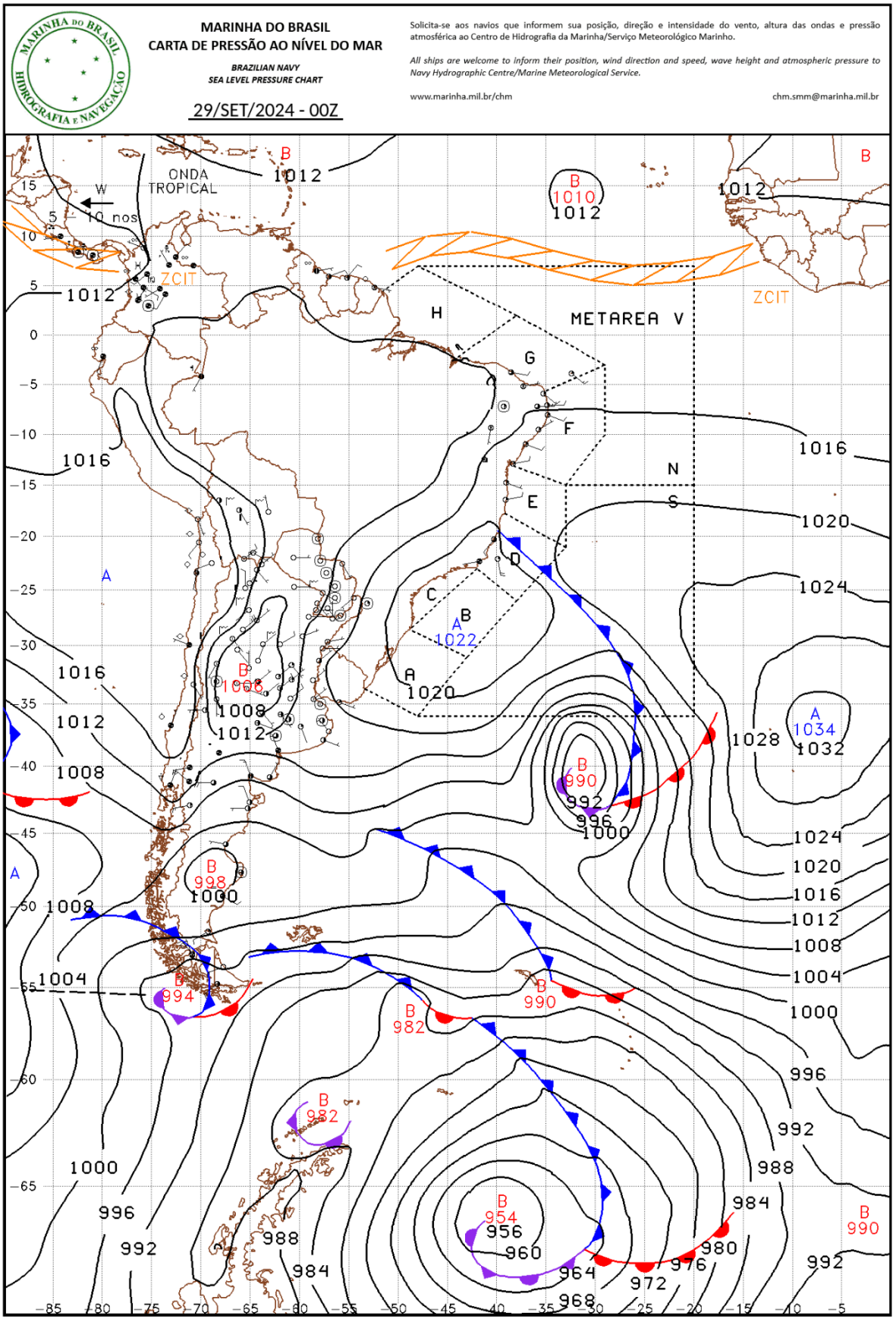
Anexo 4 - Carta Sinótica (15/09/2024 - 12z)



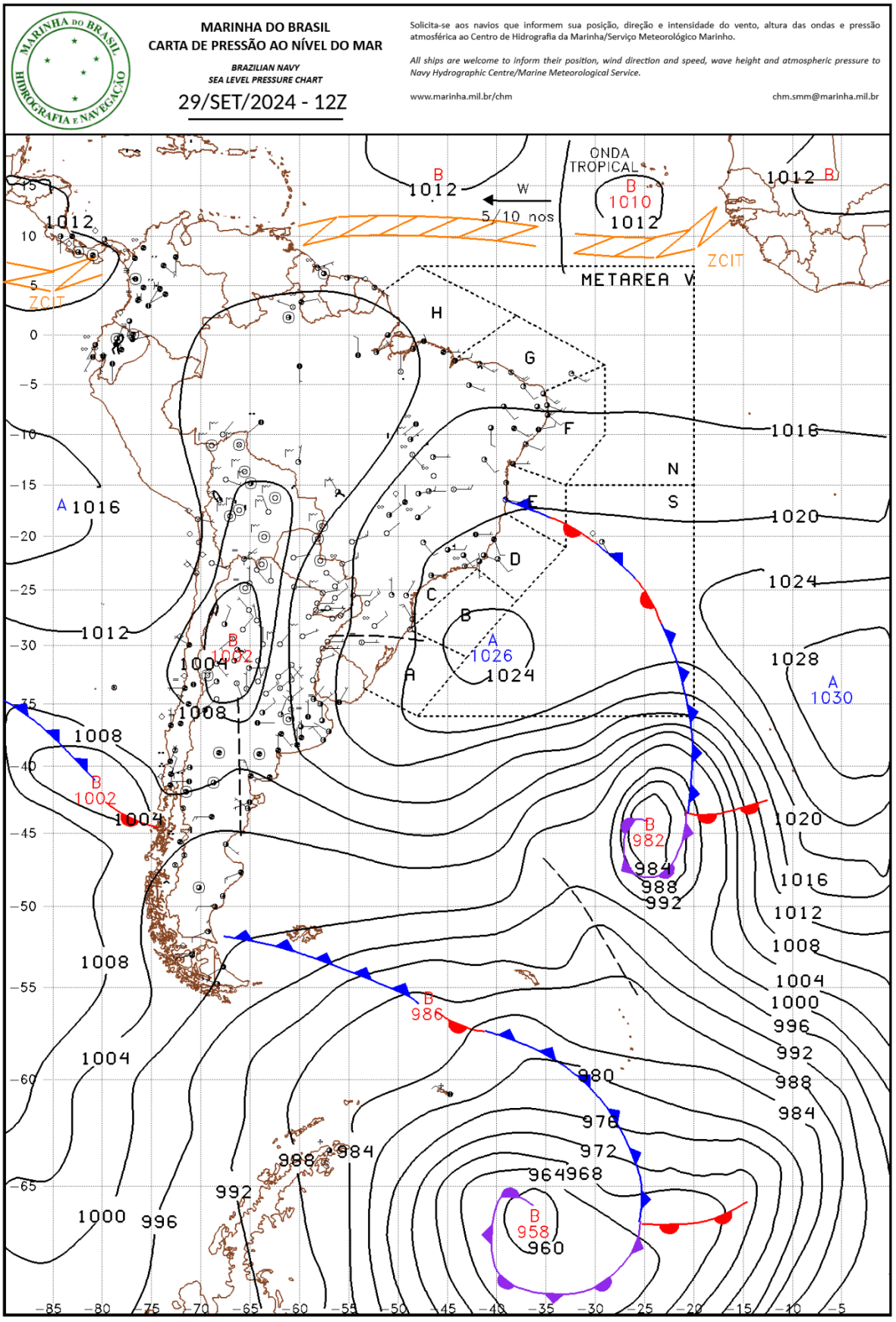
Anexo 5 - Carta Sinótica (22/09/2024 - 00z)



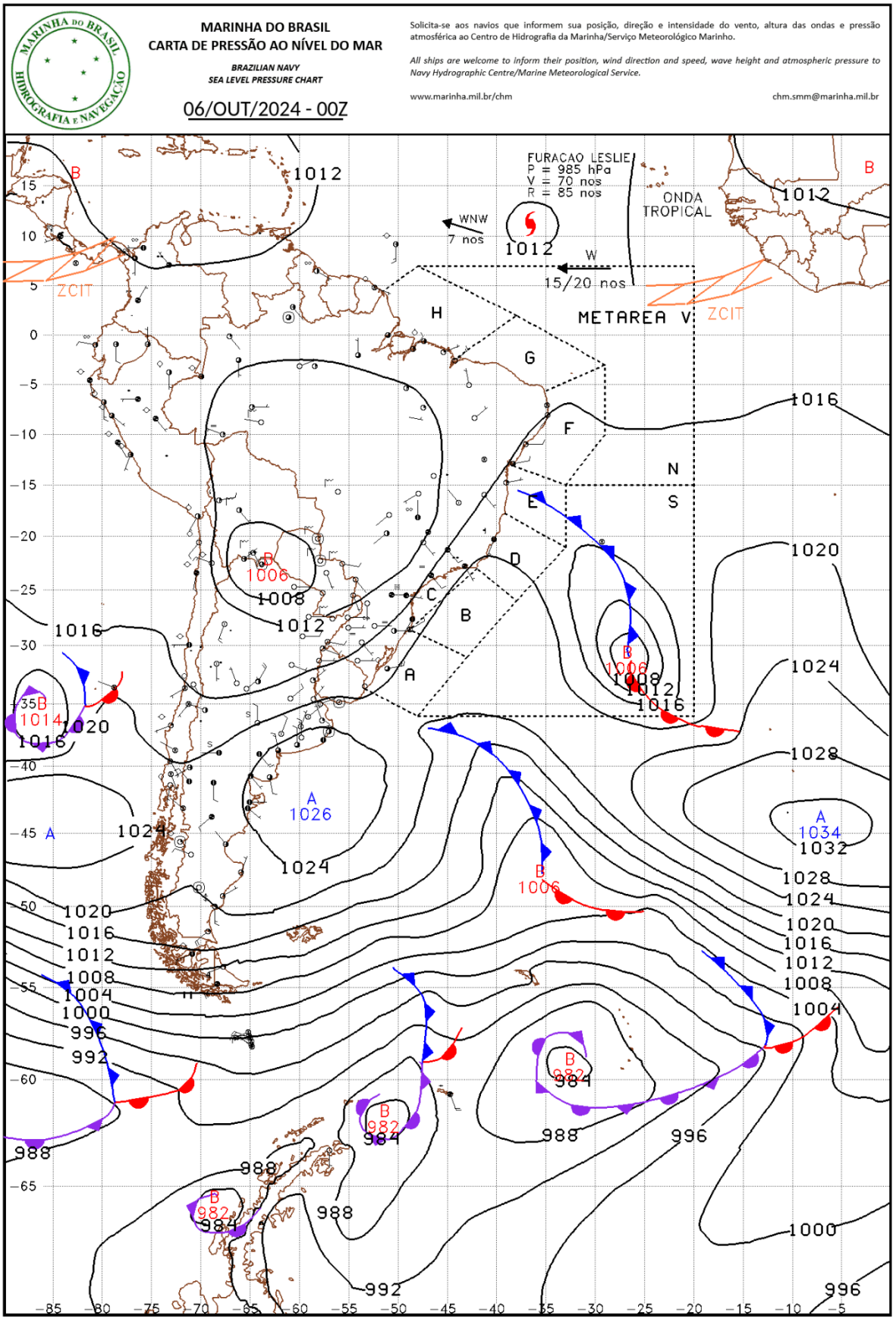
Anexo 6 - Carta Sinótica (22/09/2024 - 12z)



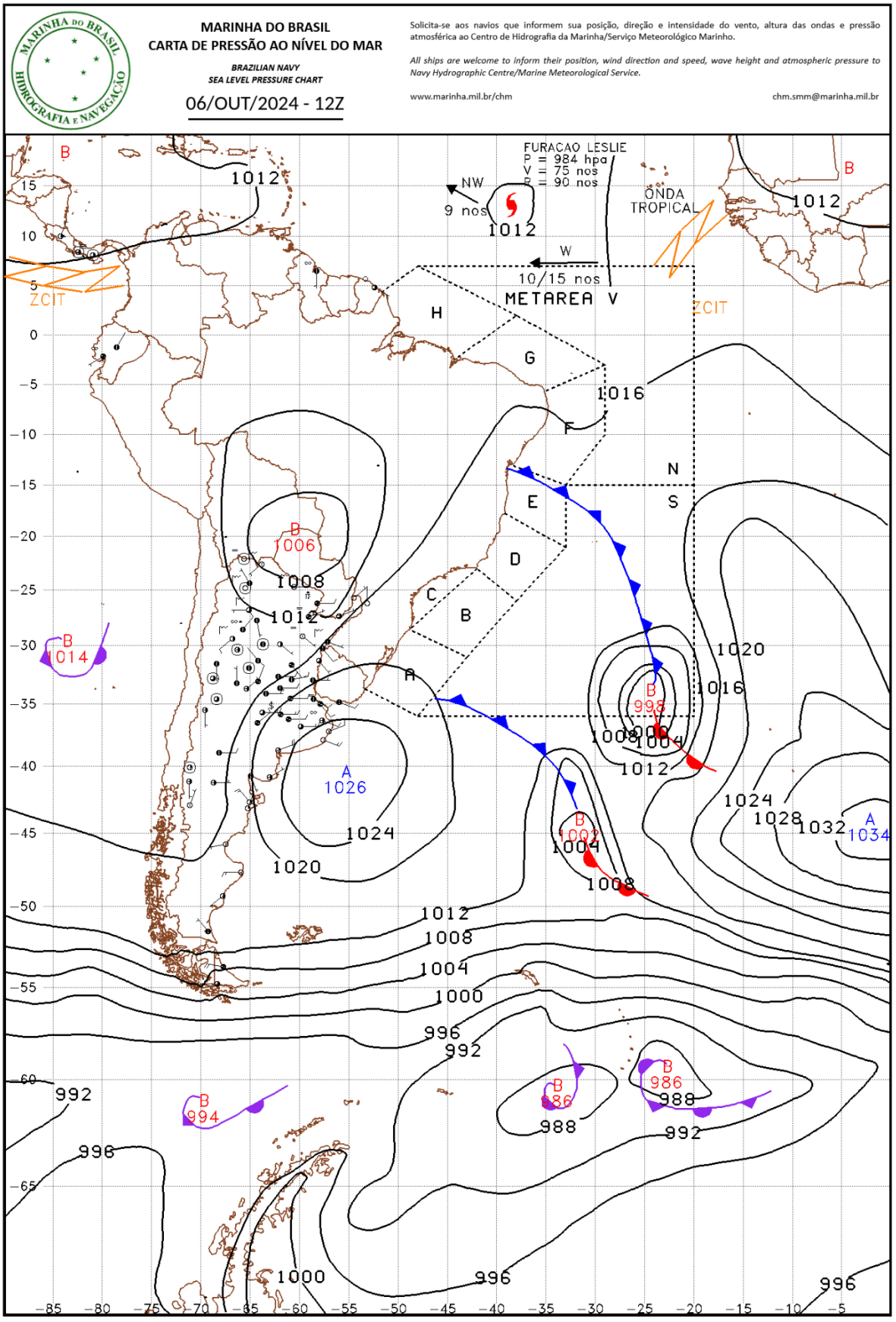
Anexo 7 - Carta Sinótica (29/09/2024 - 00z)



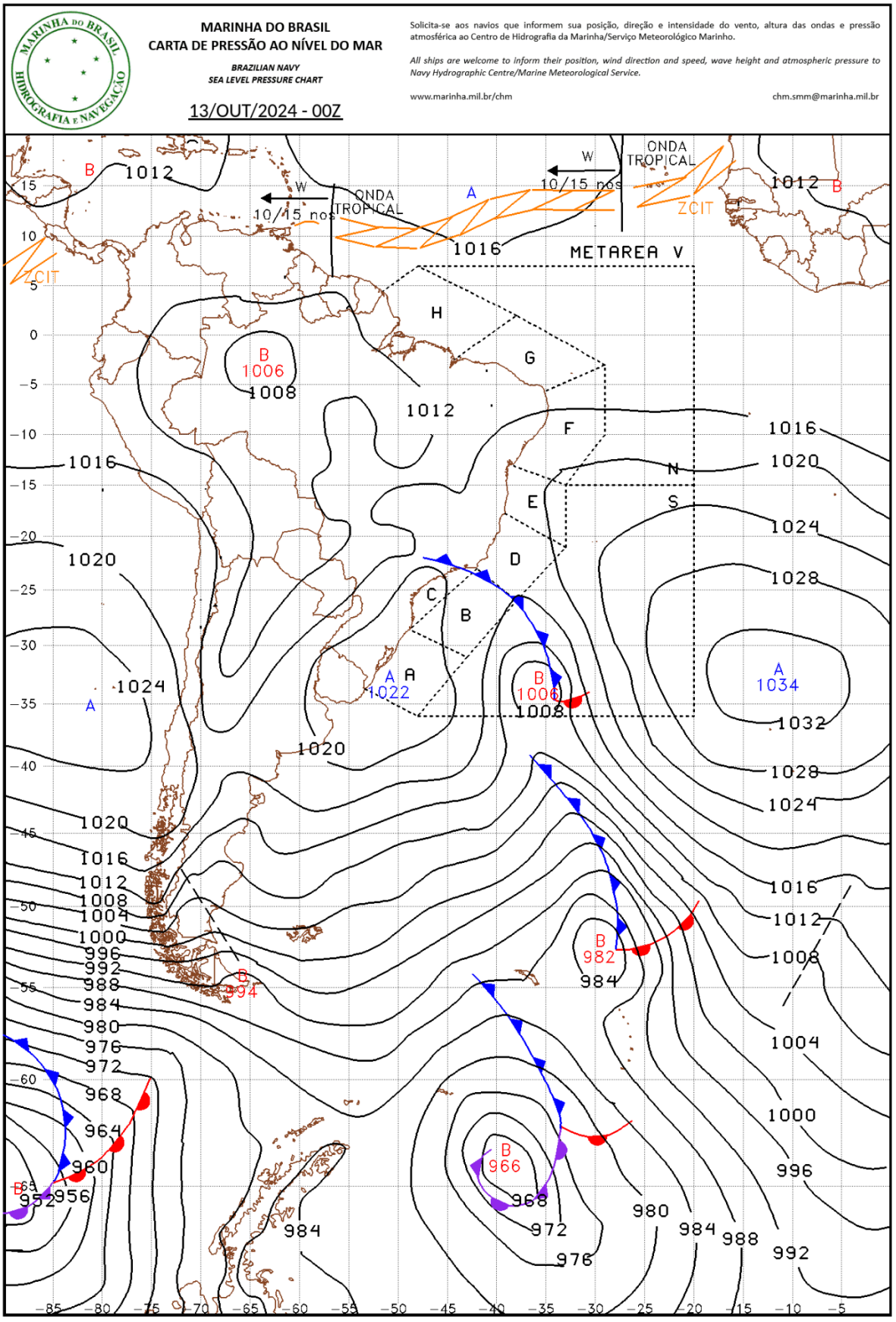
Anexo 8 - Carta Sinótica (29/09/2024 - 12z)



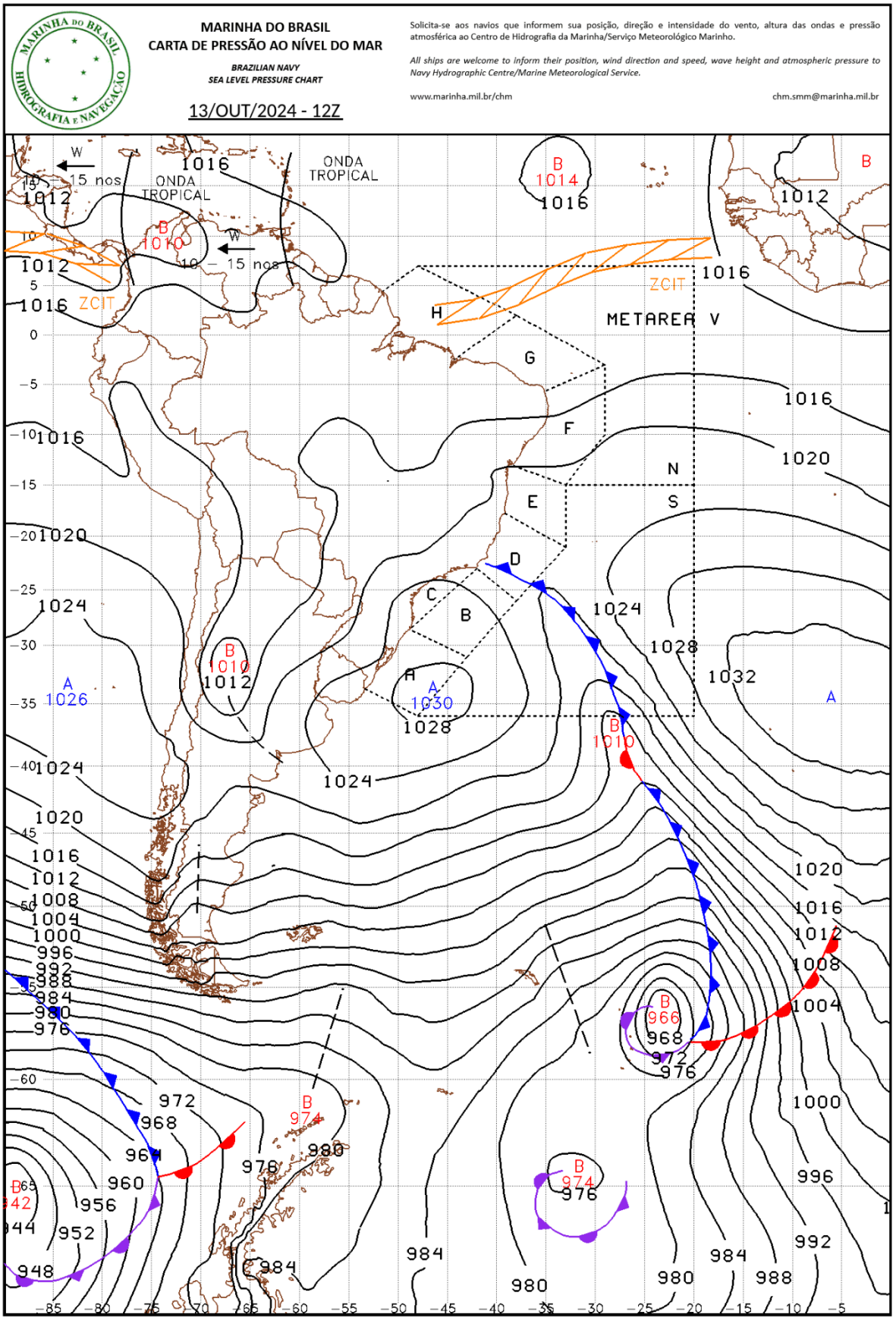
Anexo 9 - Carta Sinótica (06/10/2024 - 00z)



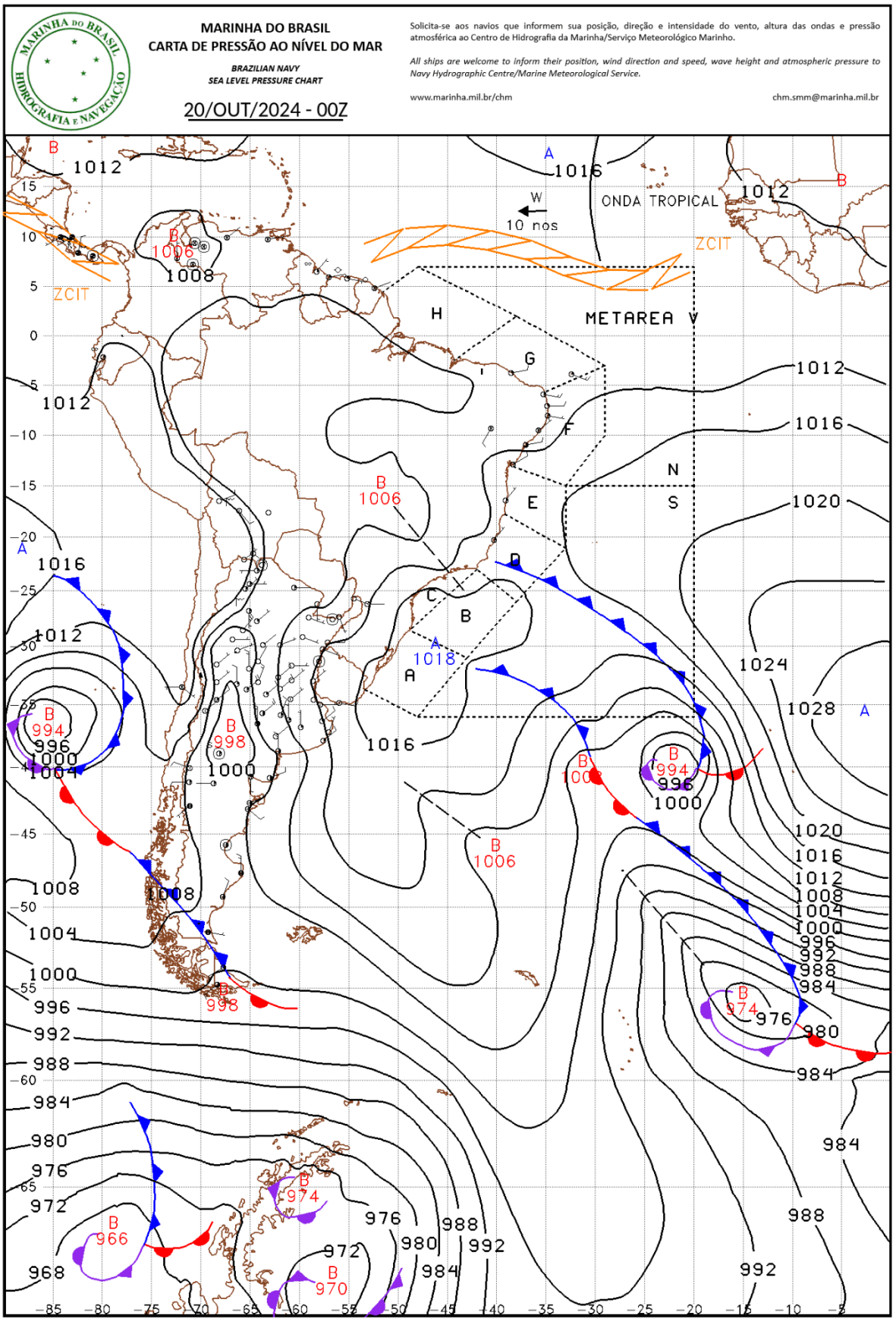
Anexo 10 - Carta Sinótica (06/10/2024 - 12z)



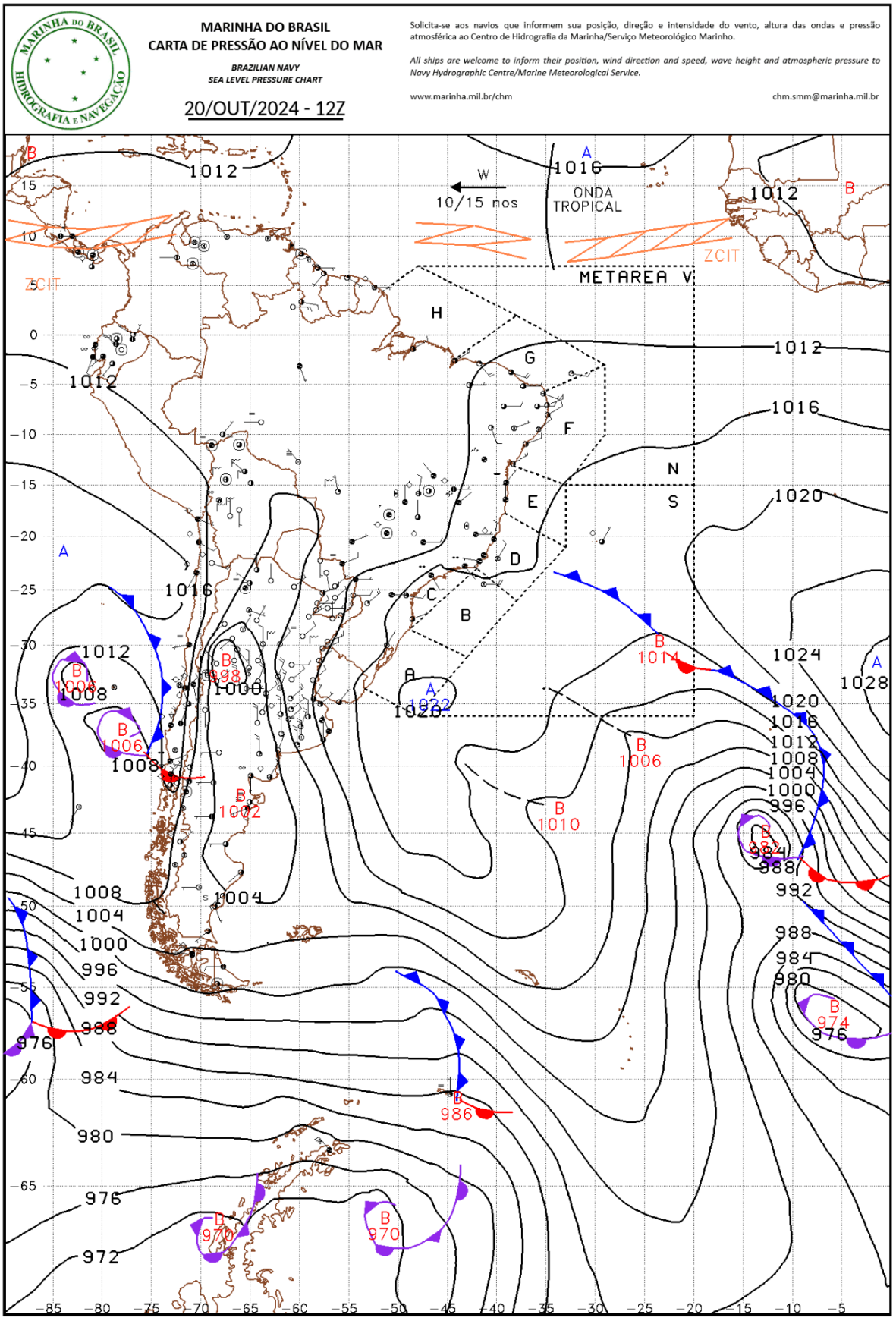
Anexo 11 - Carta Sinótica (13/10/2024 - 00z)



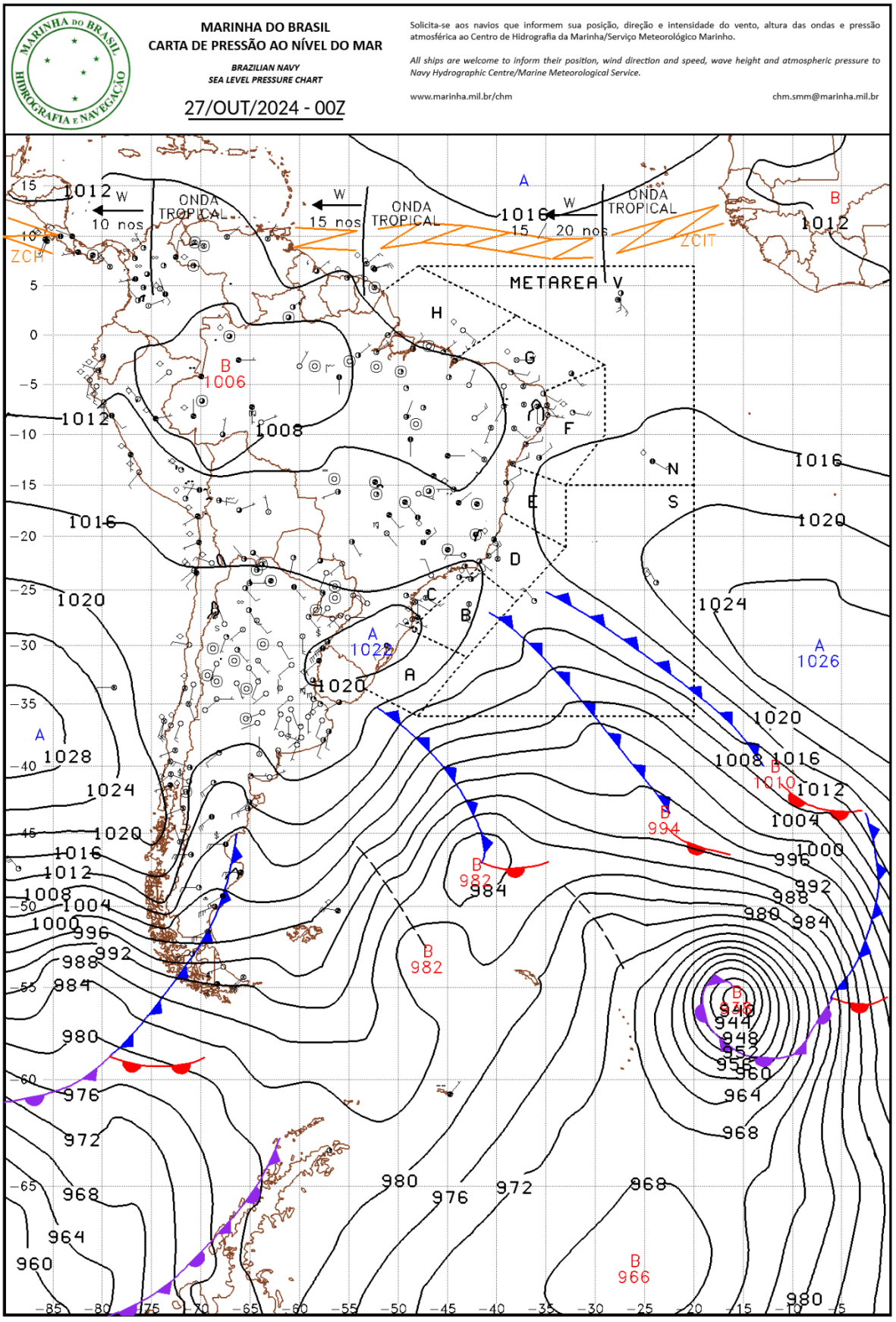
Anexo 12 - Carta Sinótica (13/10/2024 - 12z)



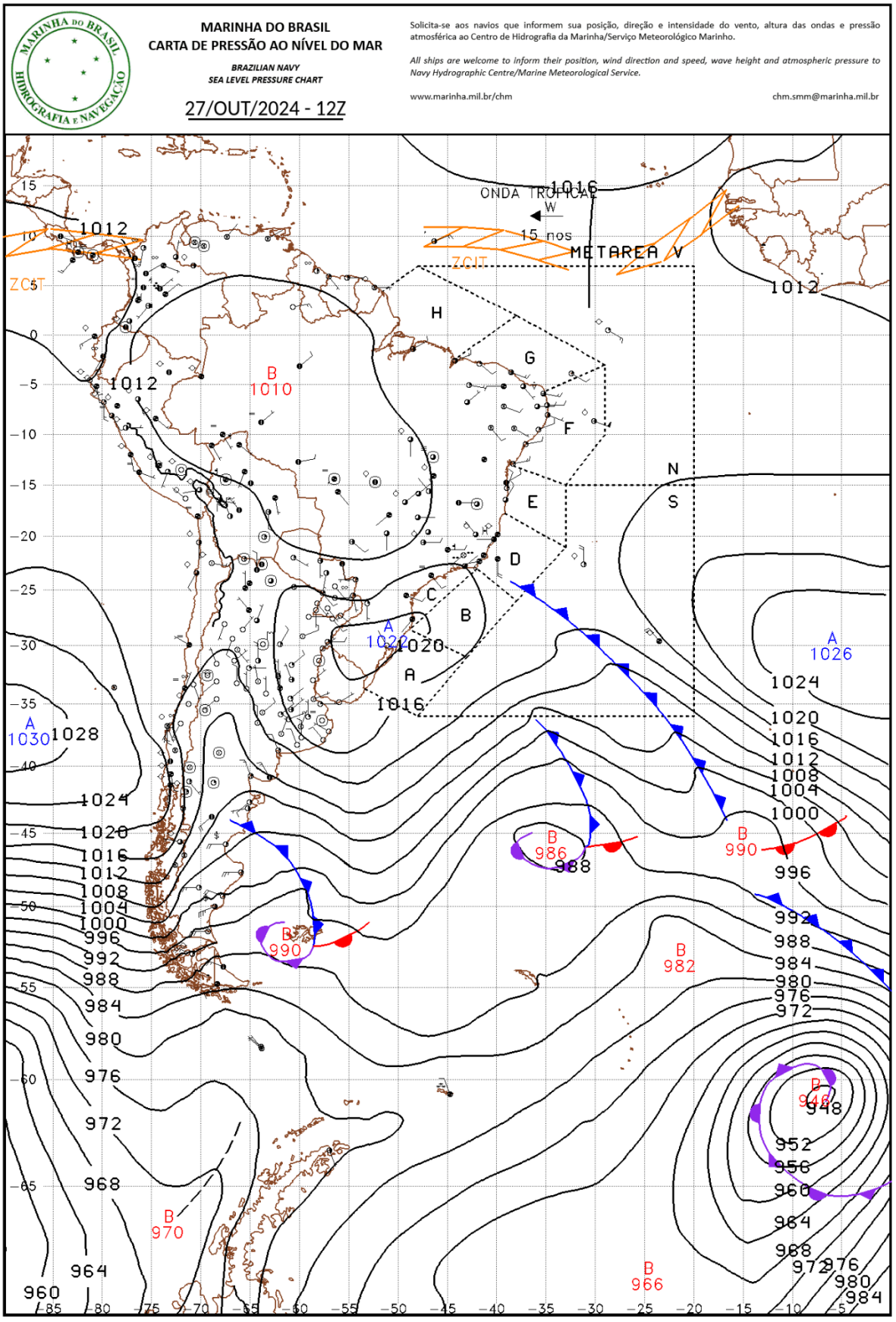
Anexo 13 - Carta Sinótica (20/10/2024 - 00z)



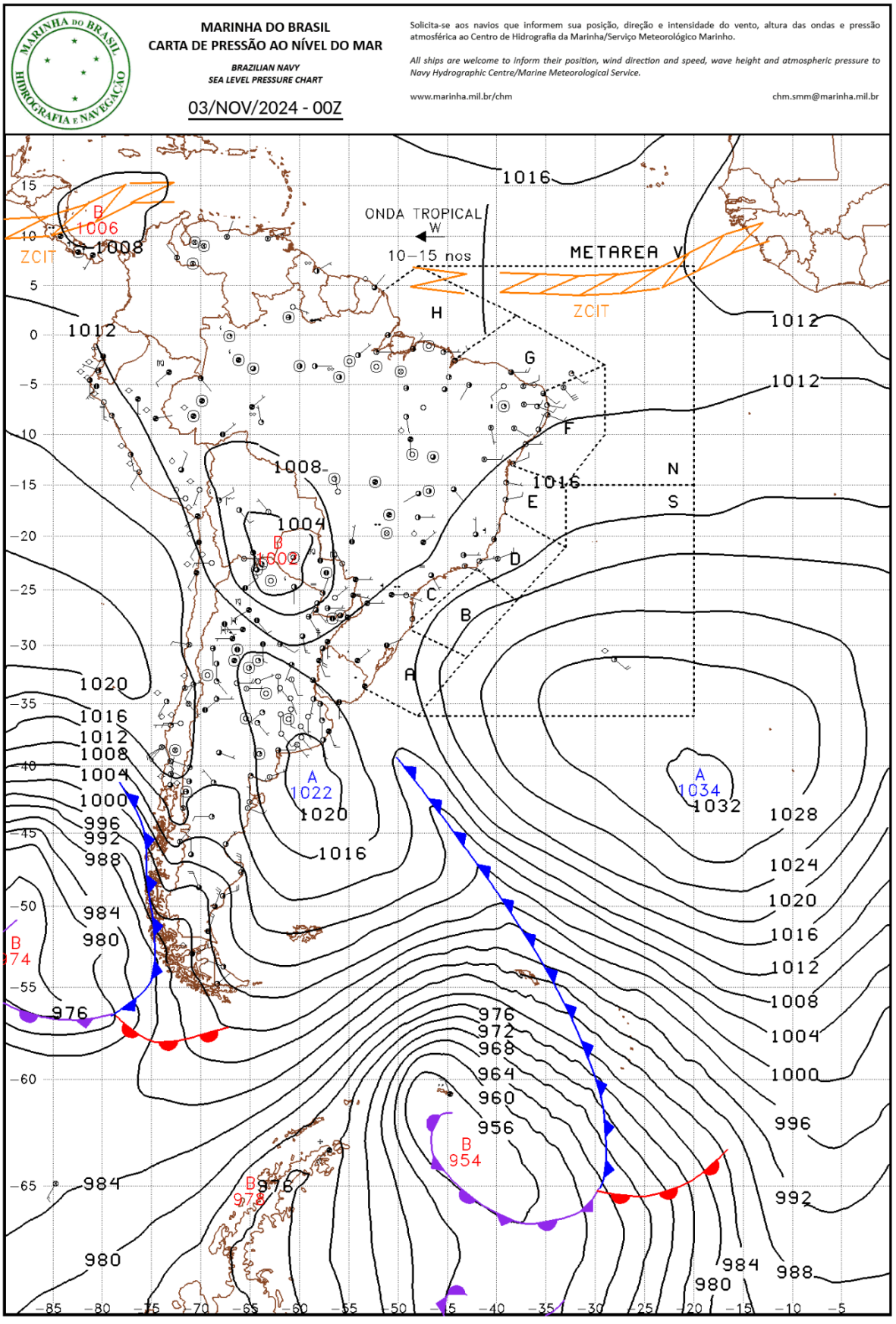
Anexo 14 - Carta Sinótica (20/10/2024 - 12z)



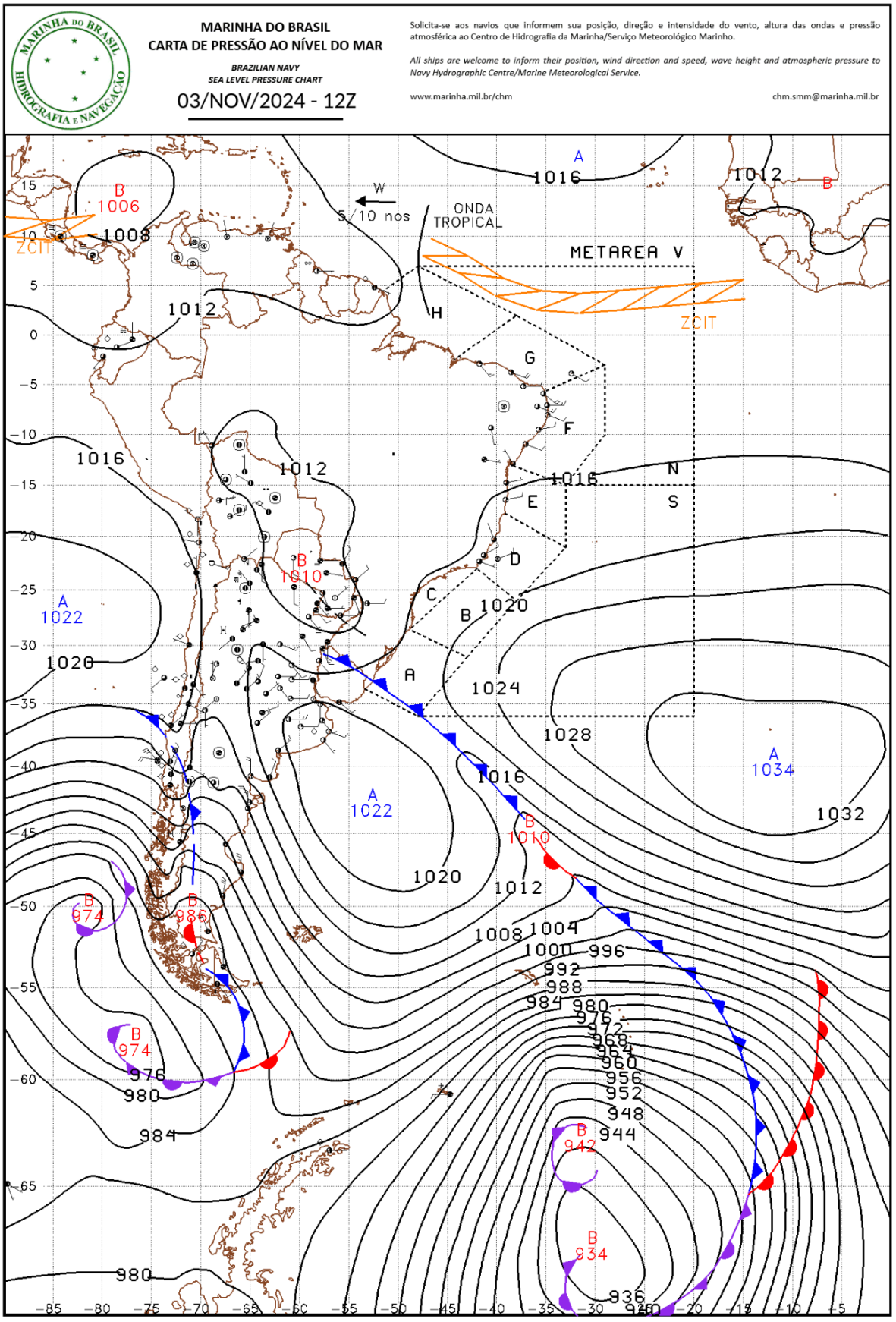
Anexo 15 - Carta Sinótica (27/10/2024 - 00z)



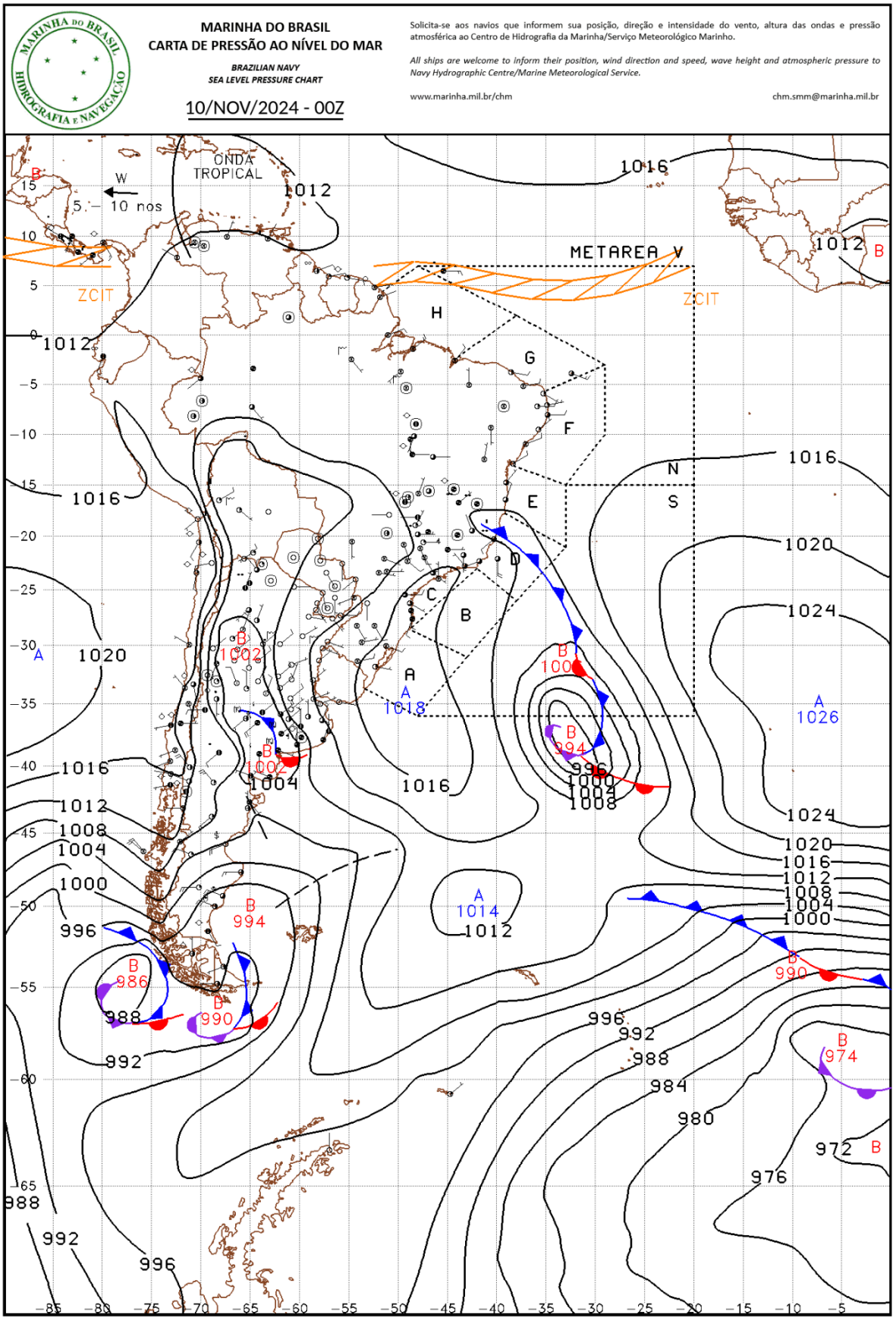
Anexo 16 - Carta Sinótica (27/10/2024 - 12z)



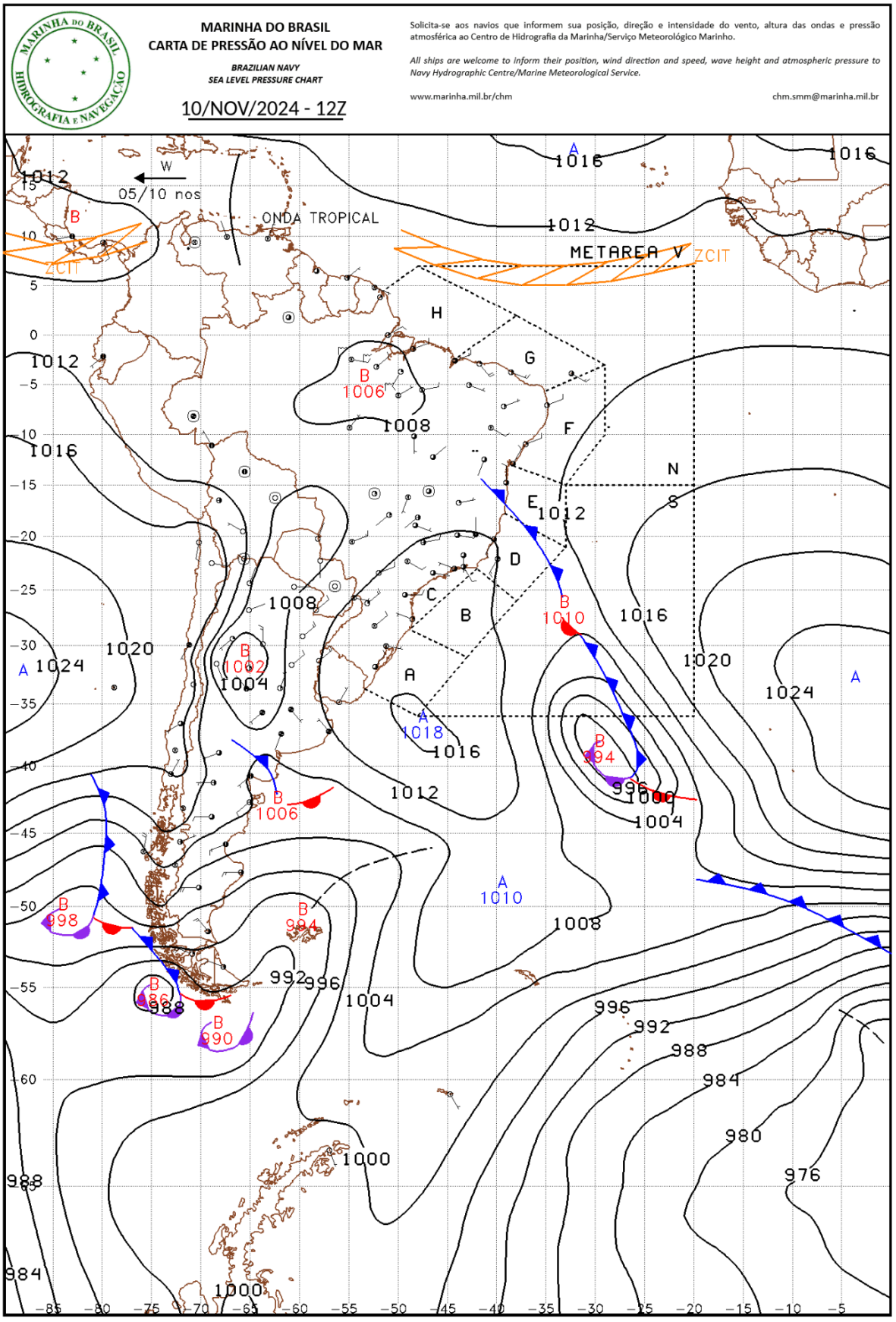
Anexo 17 - Carta Sinótica (03/11/2024 - 00z)



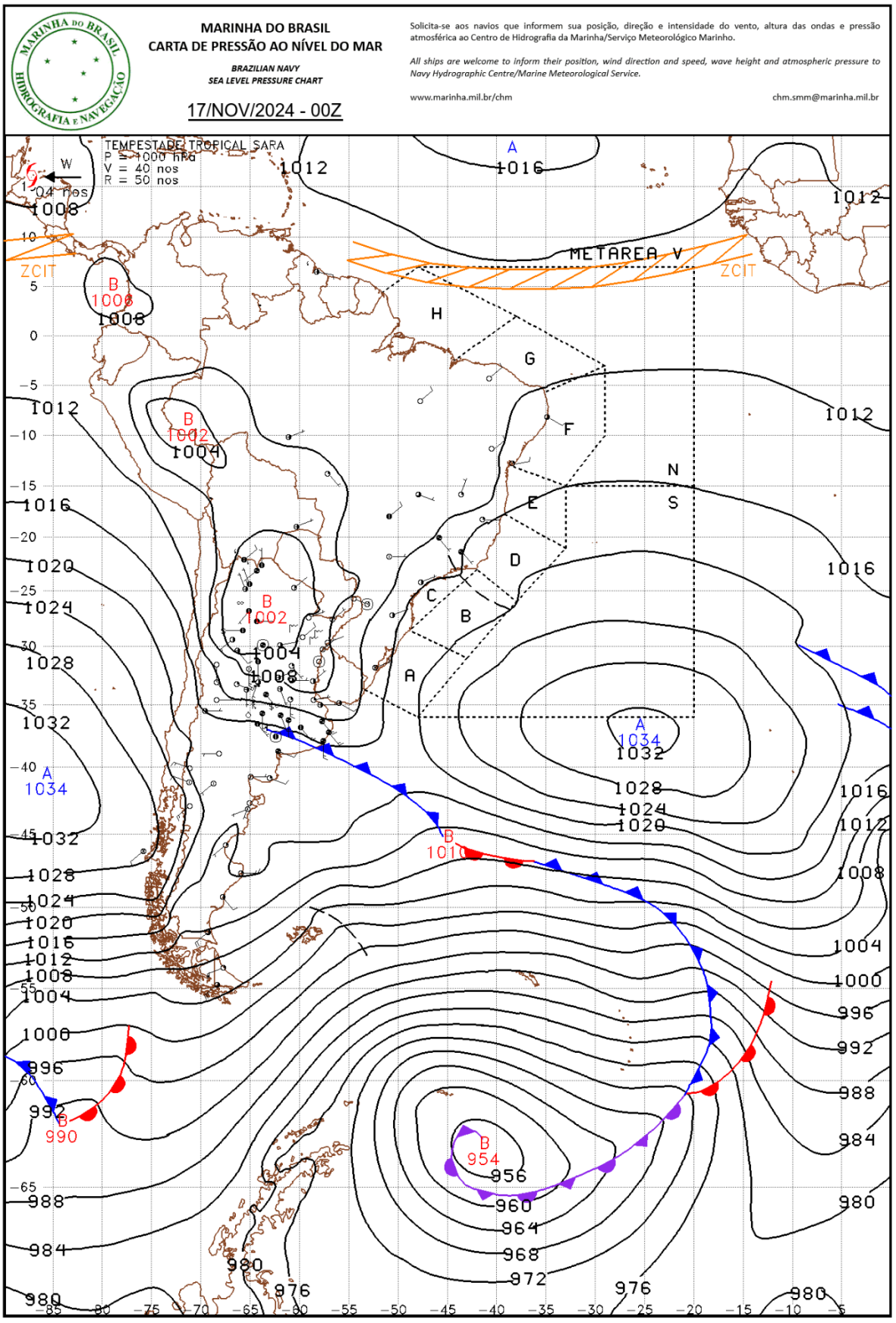
Anexo 18 - Carta Sinótica (03/11/2024 - 12z)



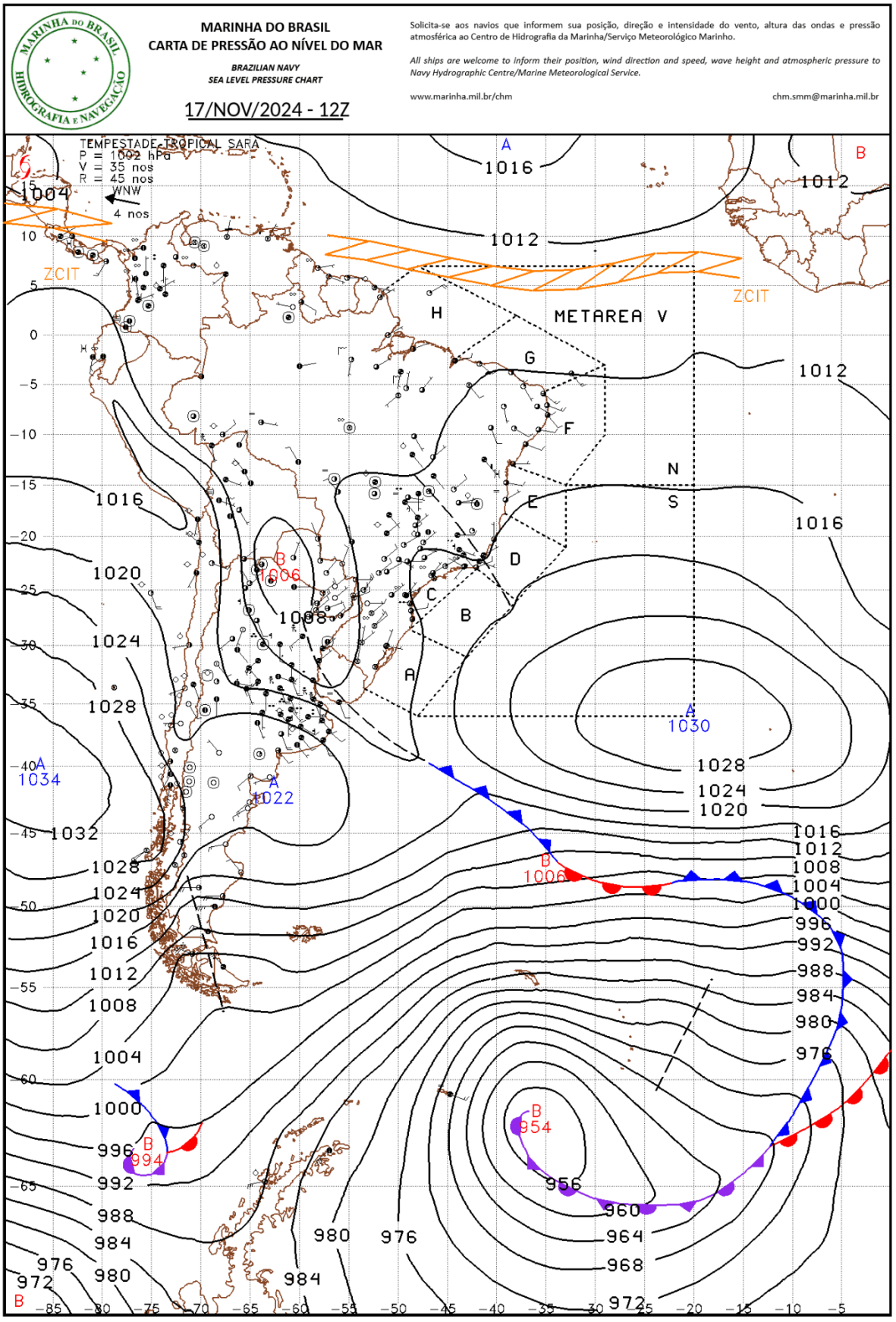
Anexo 19 - Carta Sinótica (10/11/2024 - 00z)



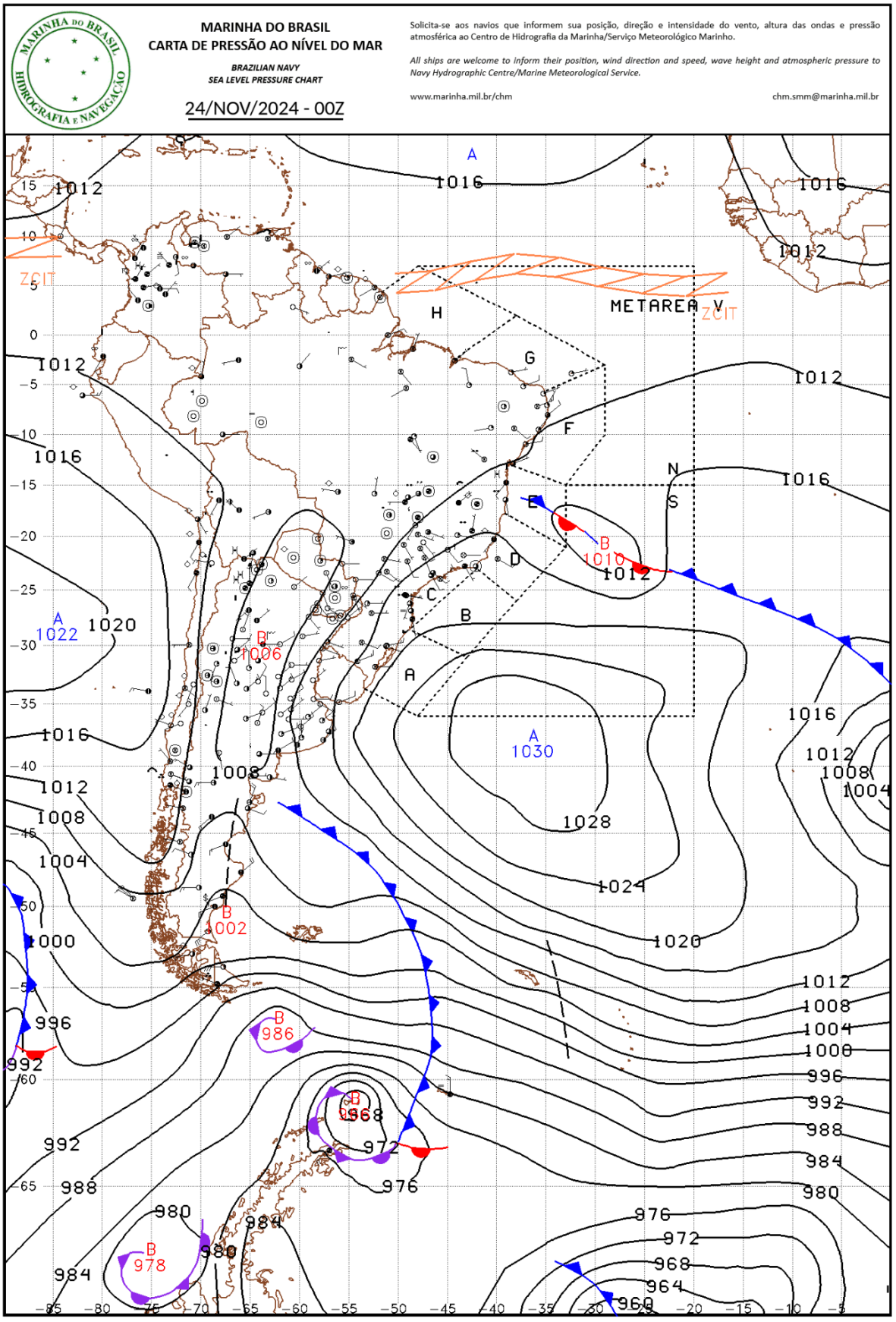
Anexo 20 - Carta Sinótica (10/11/2024 - 12z)



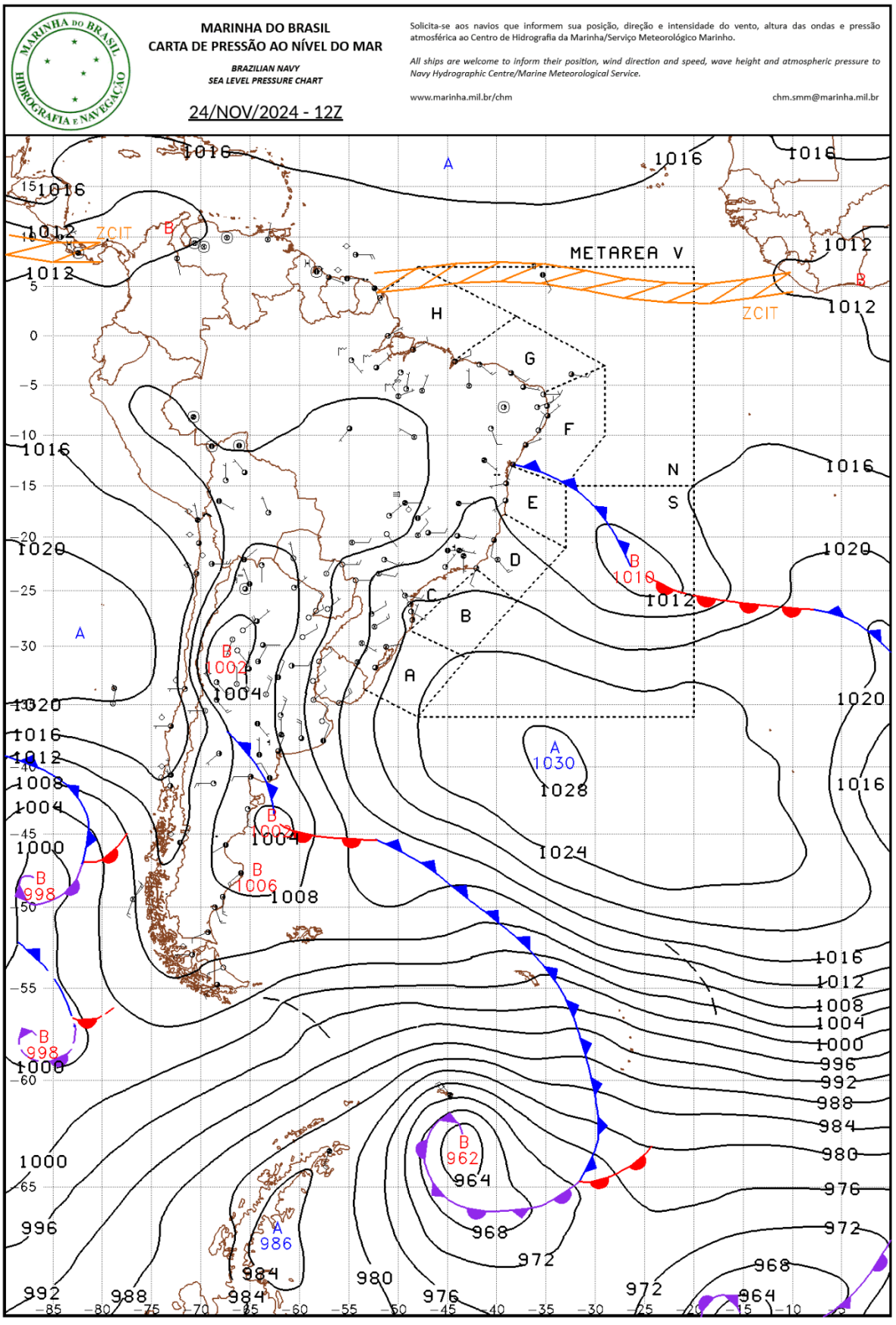
Anexo 21 - Carta Sinótica (17/11/2024 - 00z)



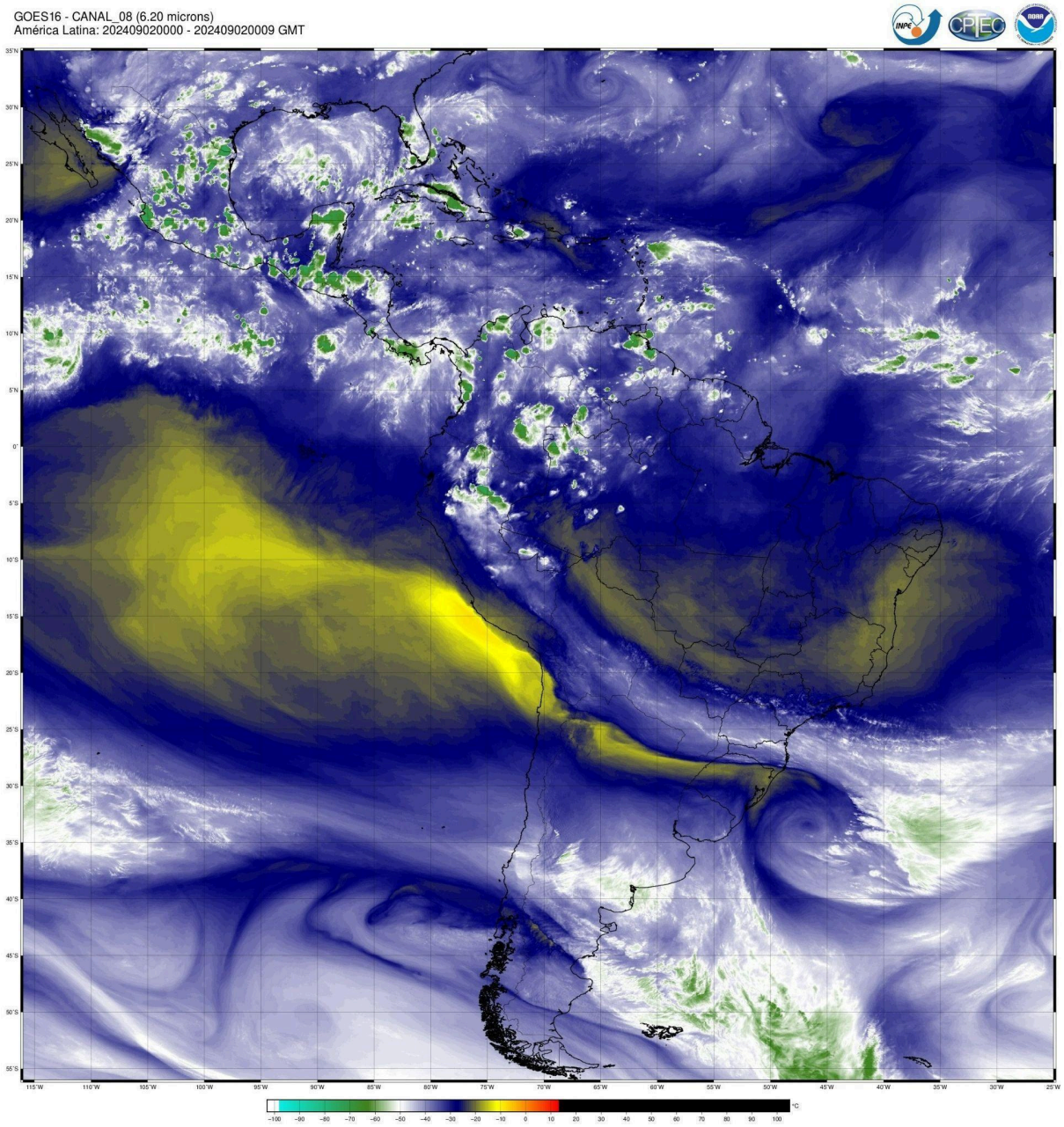
Anexo 22 - Carta Sinótica (17/11/2024 - 12z)



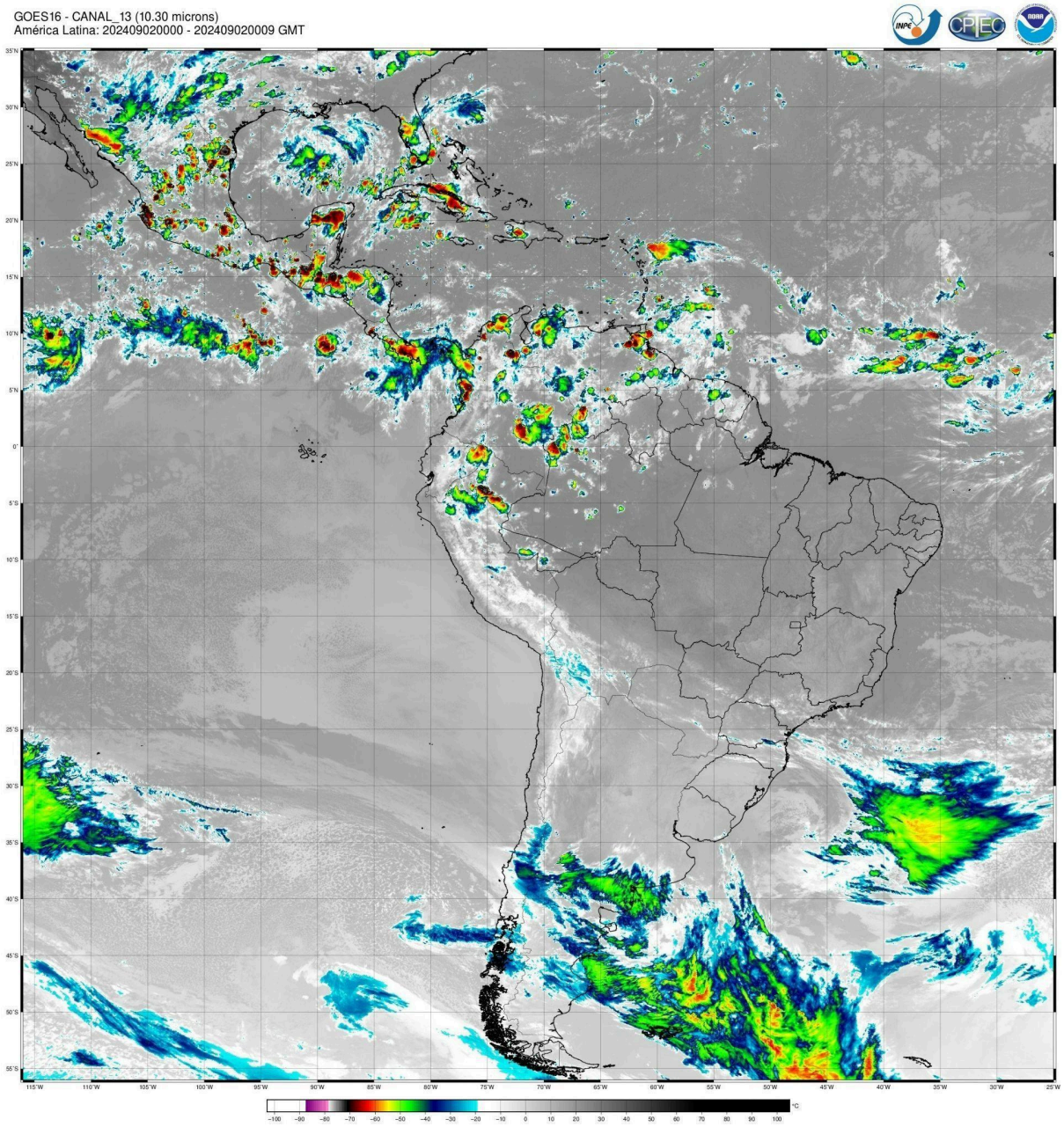
Anexo 23 - Carta Sinótica (24/11/2024 - 00z)



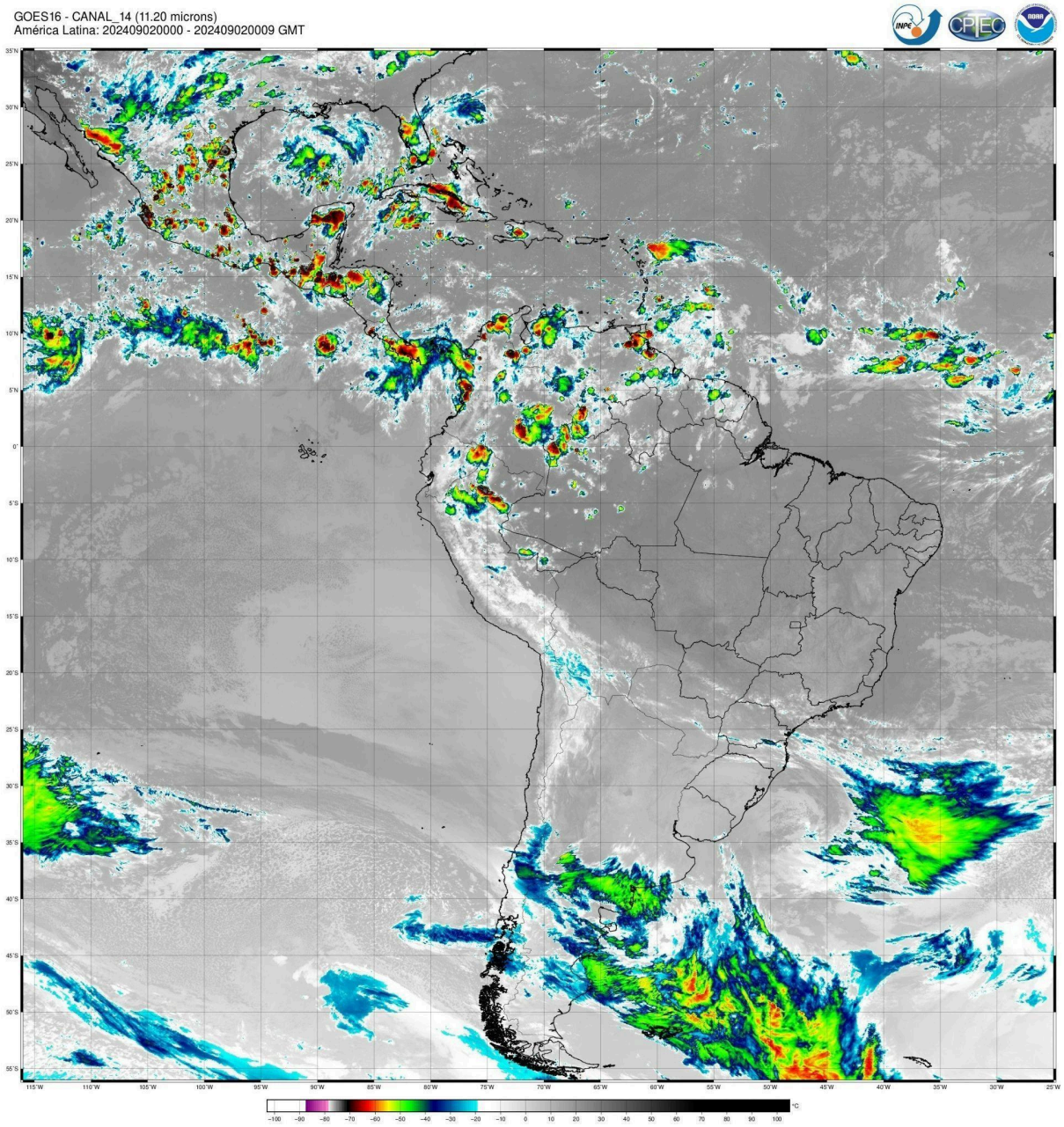
Anexo 24 - Carta Sinótica (24/11/2024 - 12z)



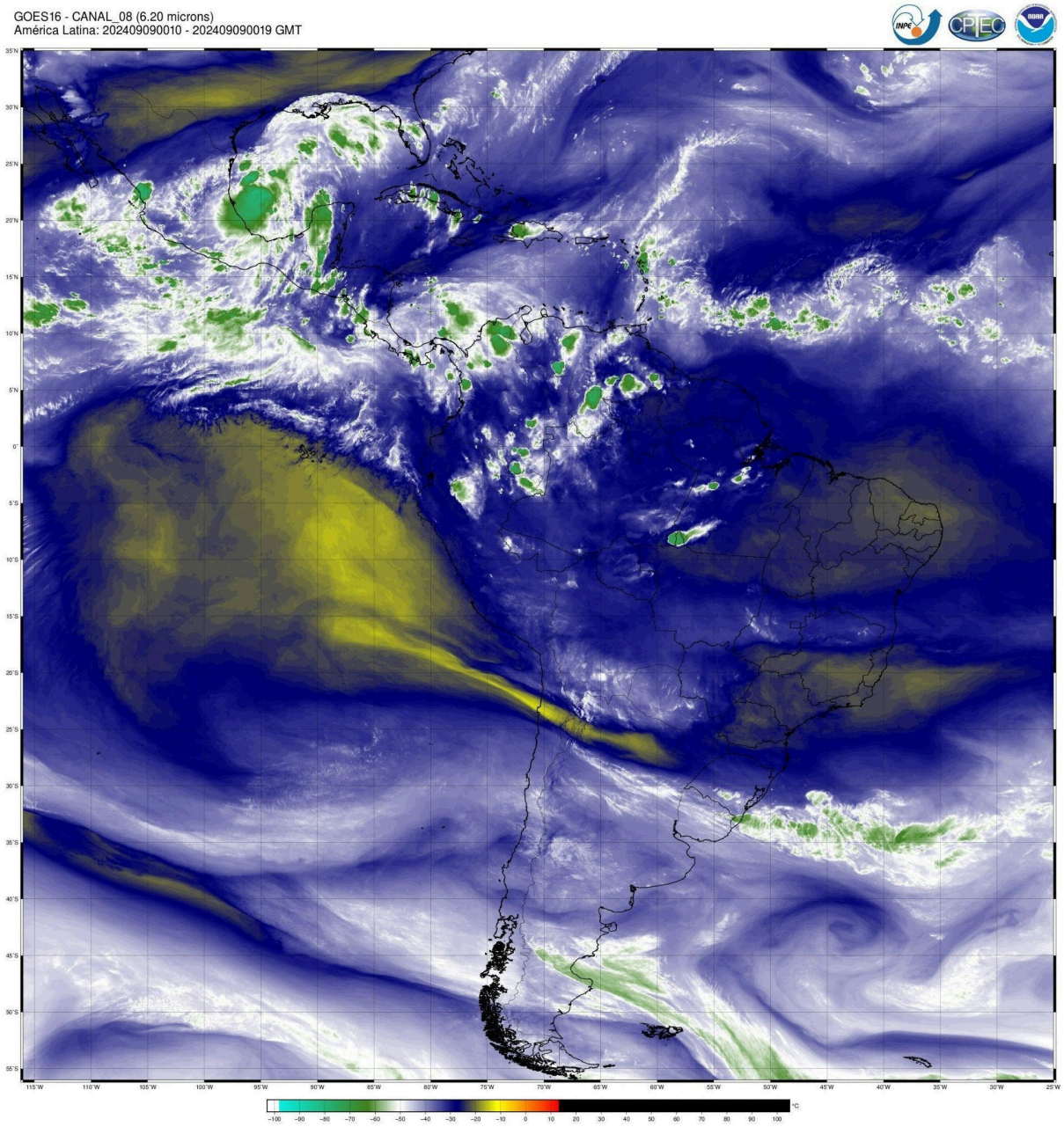
Anexo 25 - GOES 16 - Canal 08 (02/09/2024)



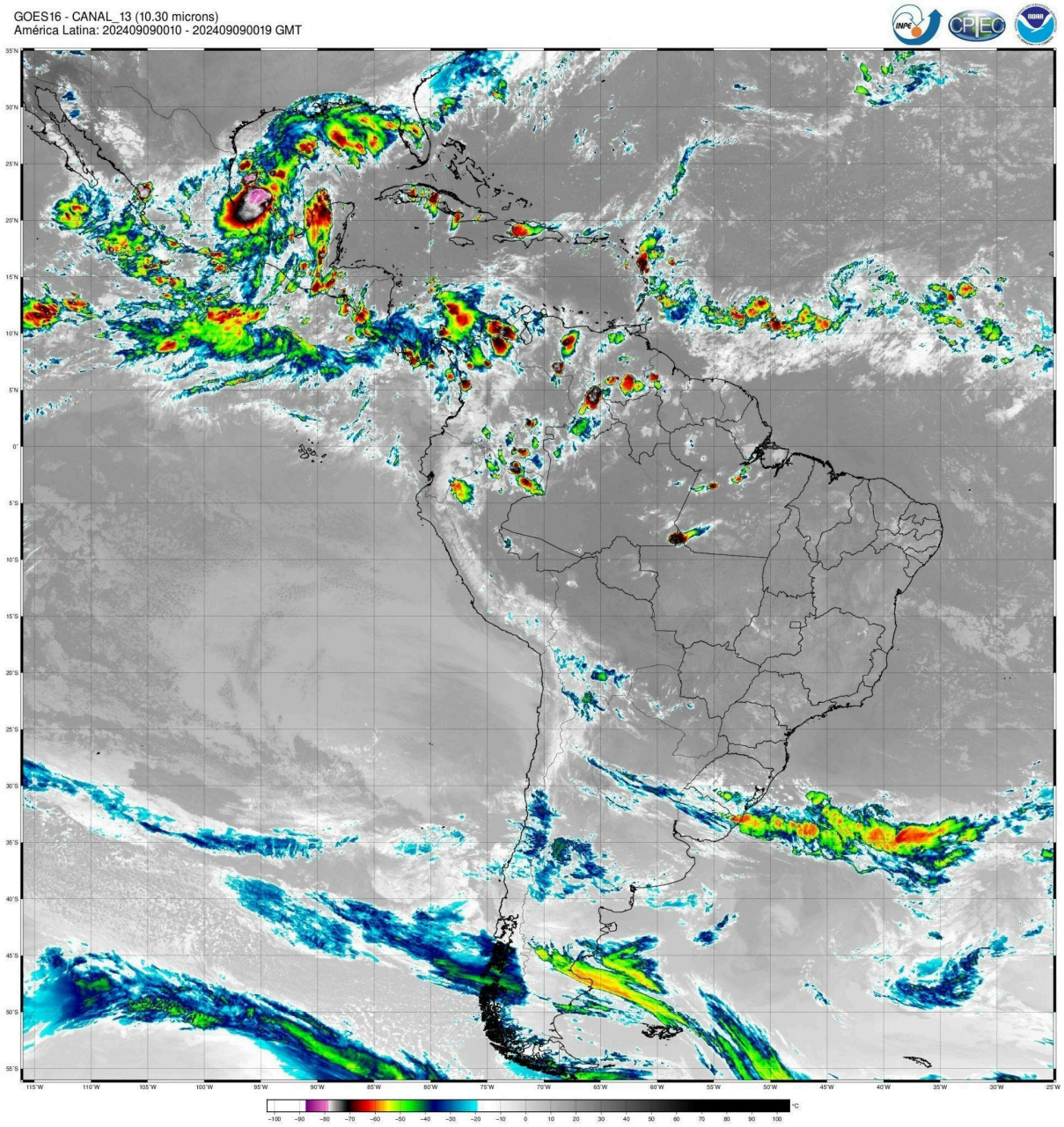
Anexo 26 - GOES 16 - Canal 13 (02/09/2024)



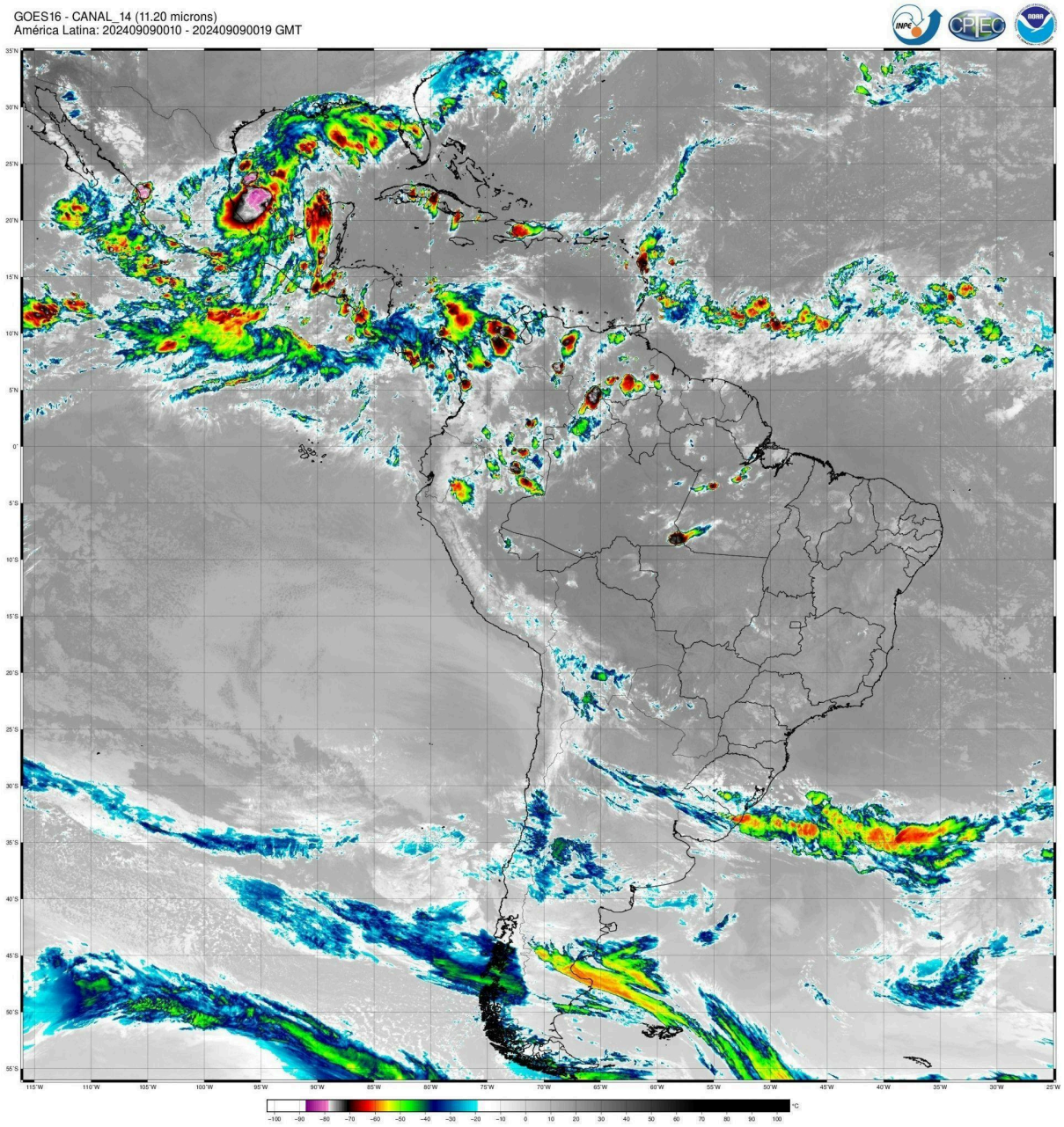
Anexo 27 - GOES 16 - Canal 14 (02/09/2024)



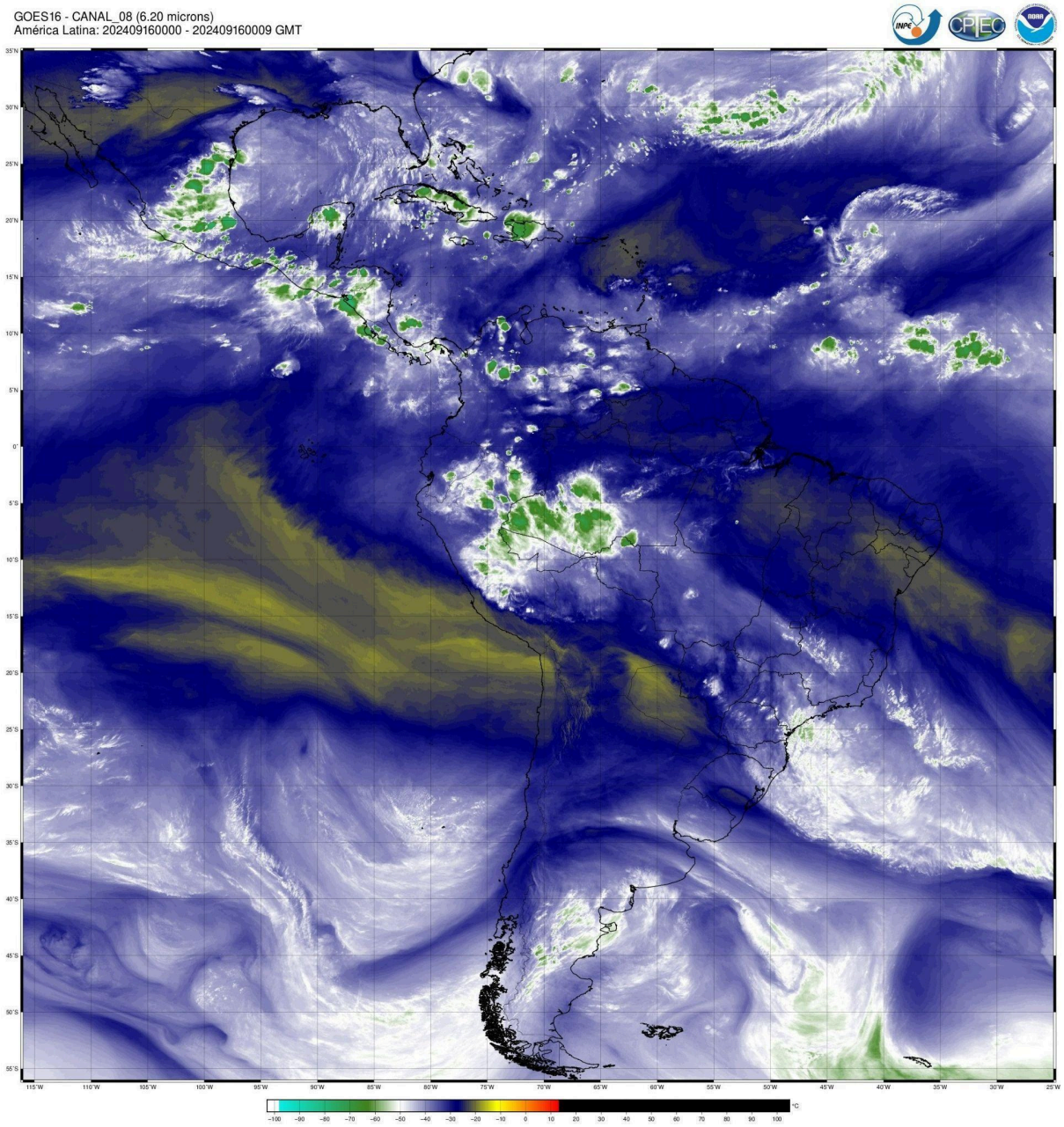
Anexo 28 - GOES 16 - Canal 08 (09/09/2024)



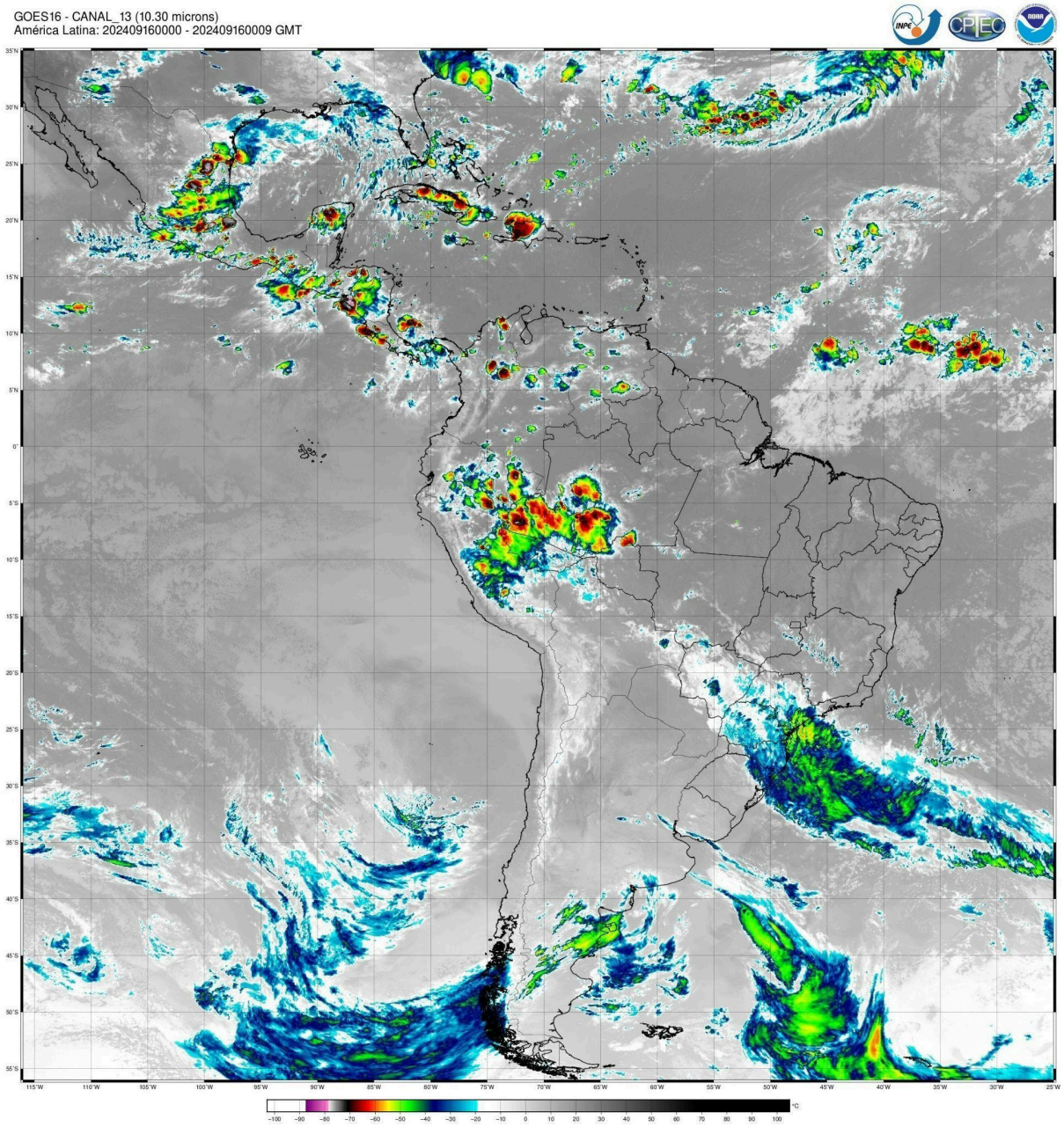
Anexo 29 - GOES 16 - Canal 13 (09/09/2024)



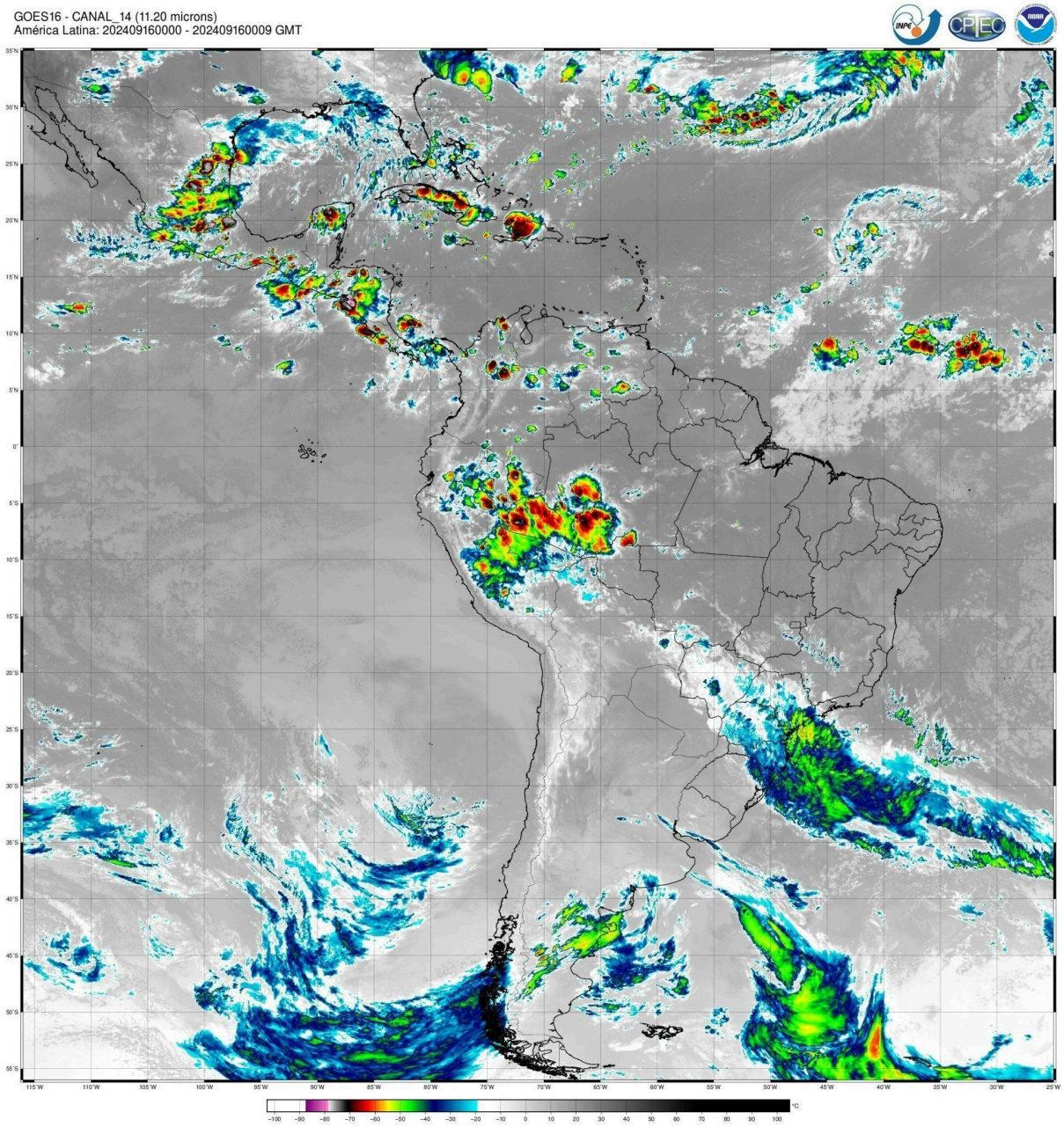
Anexo 30 - GOES 16 - Canal 14 (09/09/2024)



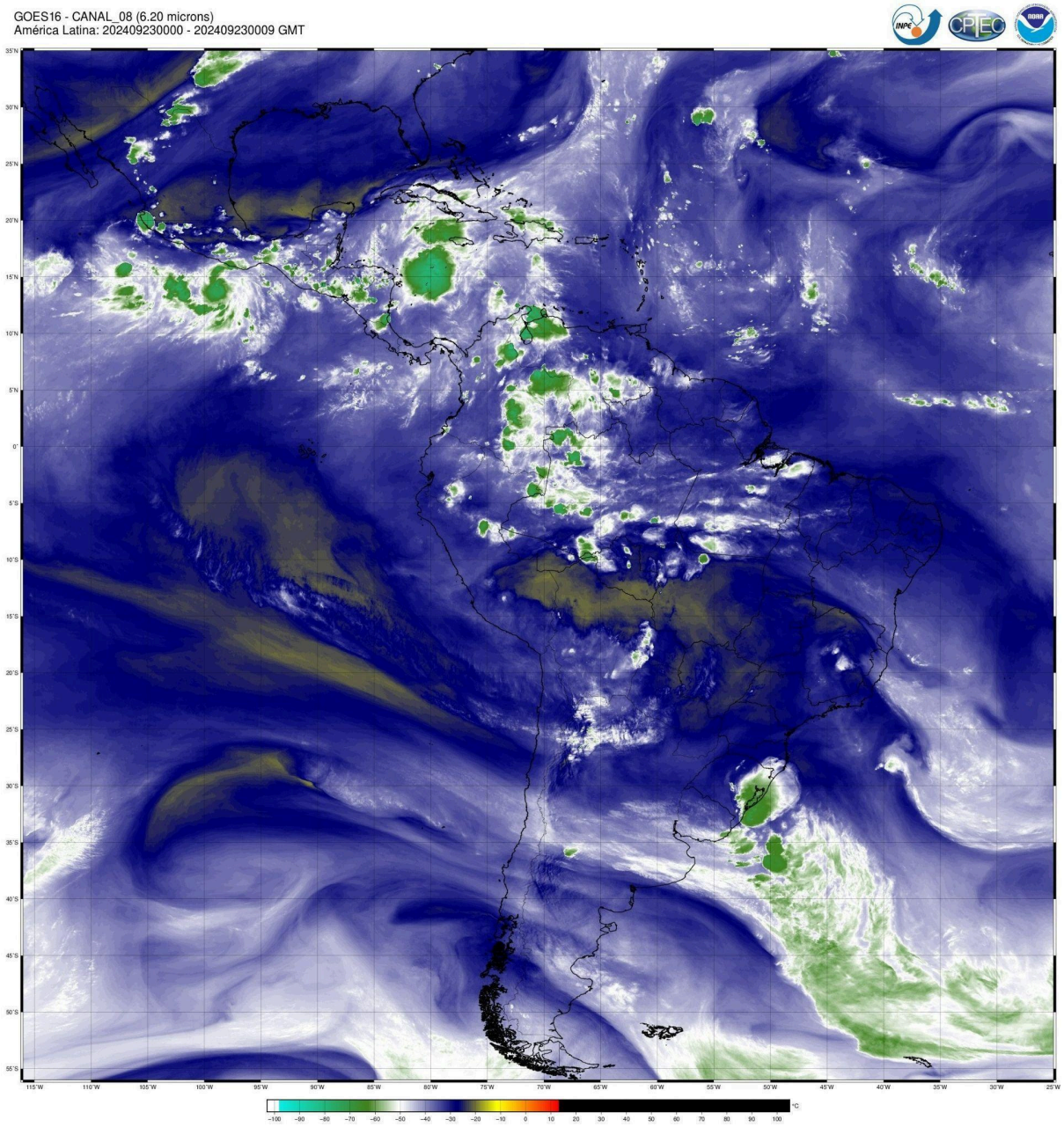
Anexo 31 - GOES 16 - Canal 08 (16/09/2024)



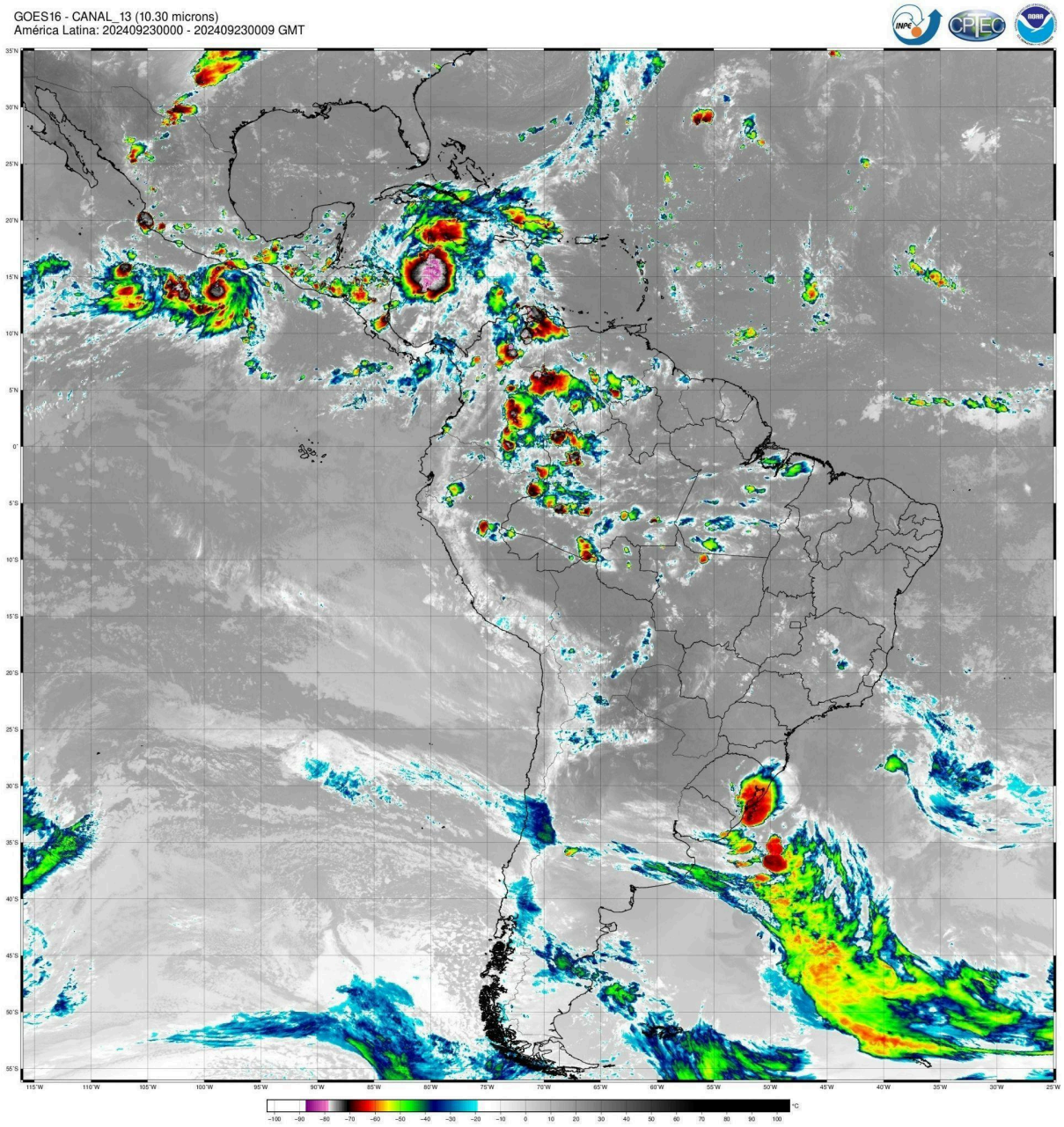
Anexo 32 - GOES 16 - Canal 13 (16/09/2024)



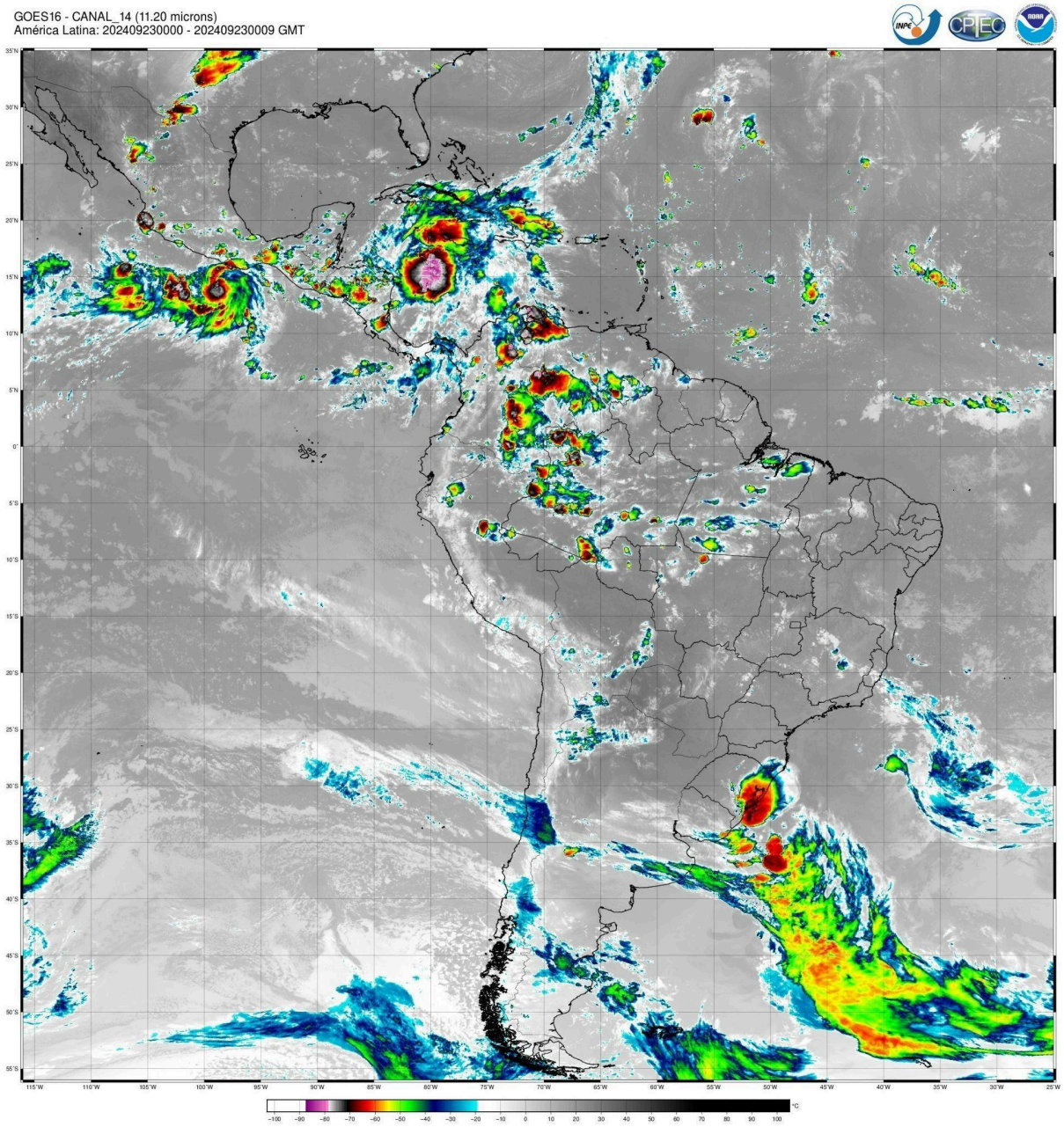
Anexo 33 - GOES 16 - Canal 14 (16/09/2024)



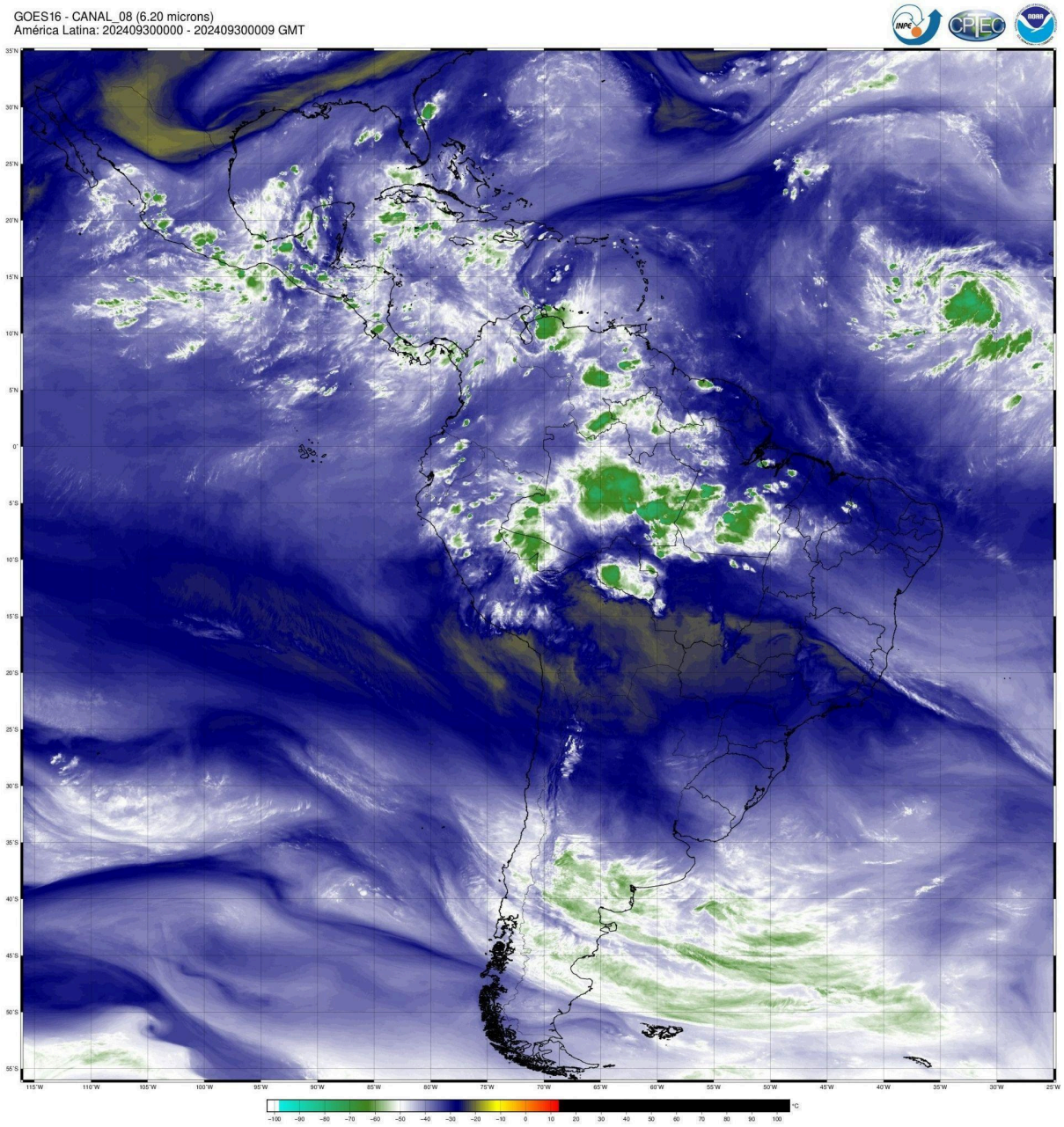
Anexo 34 - GOES 16 - Canal 08 (23/09/2024)



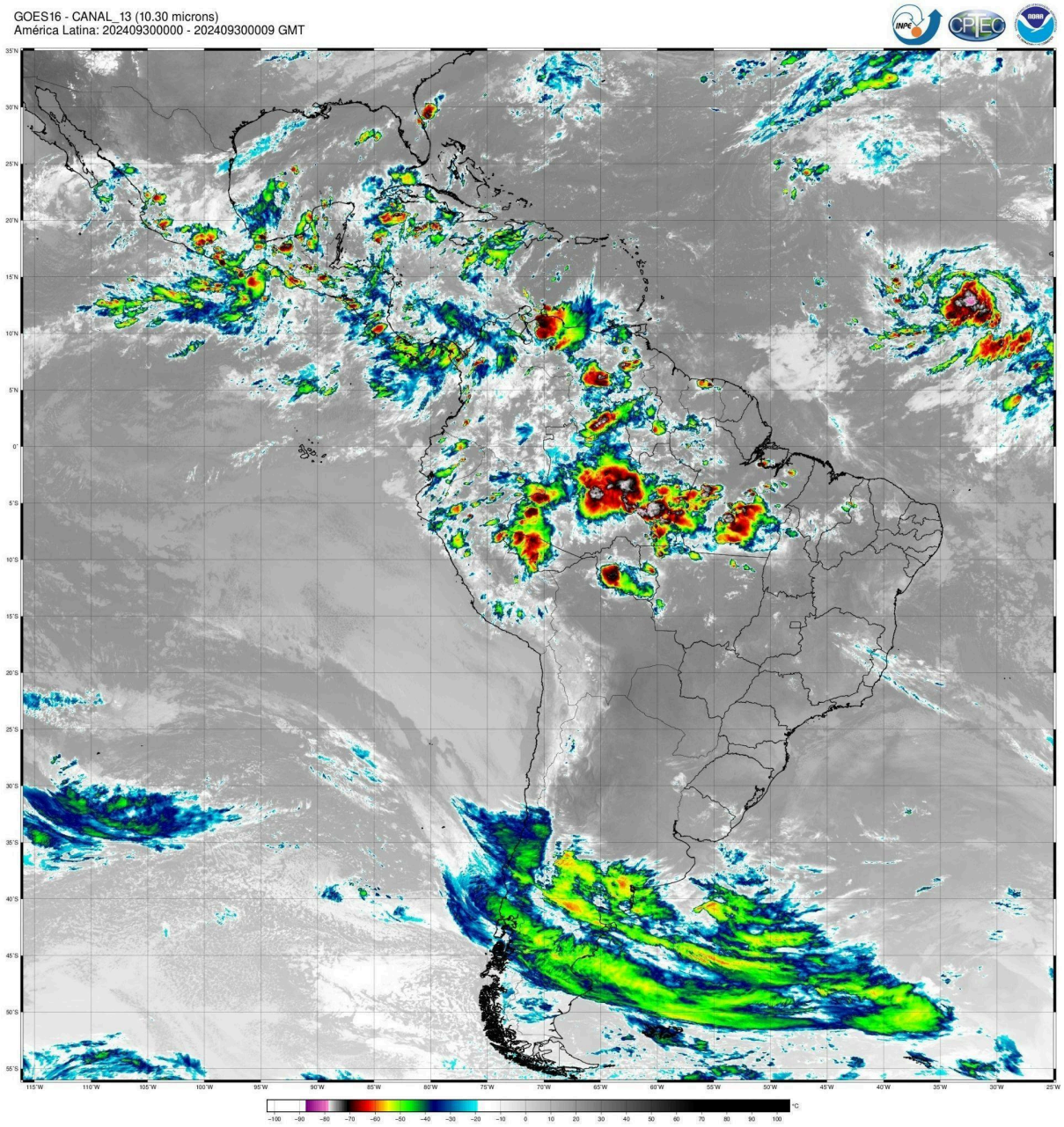
Anexo 35 - GOES 16 - Canal 13 (23/09/2024)



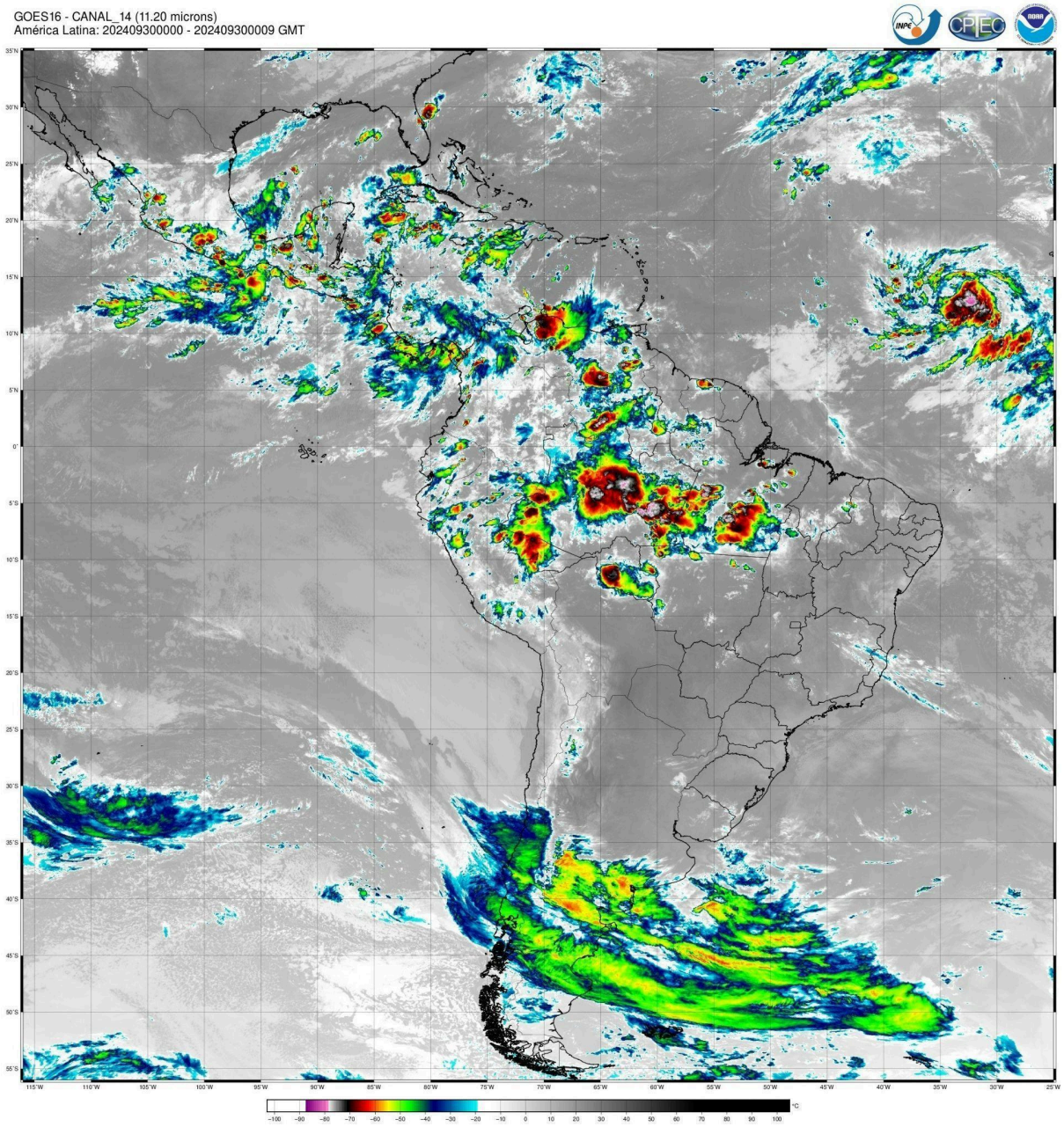
Anexo 36 - GOES 16 - Canal 14 (23/09/2024)



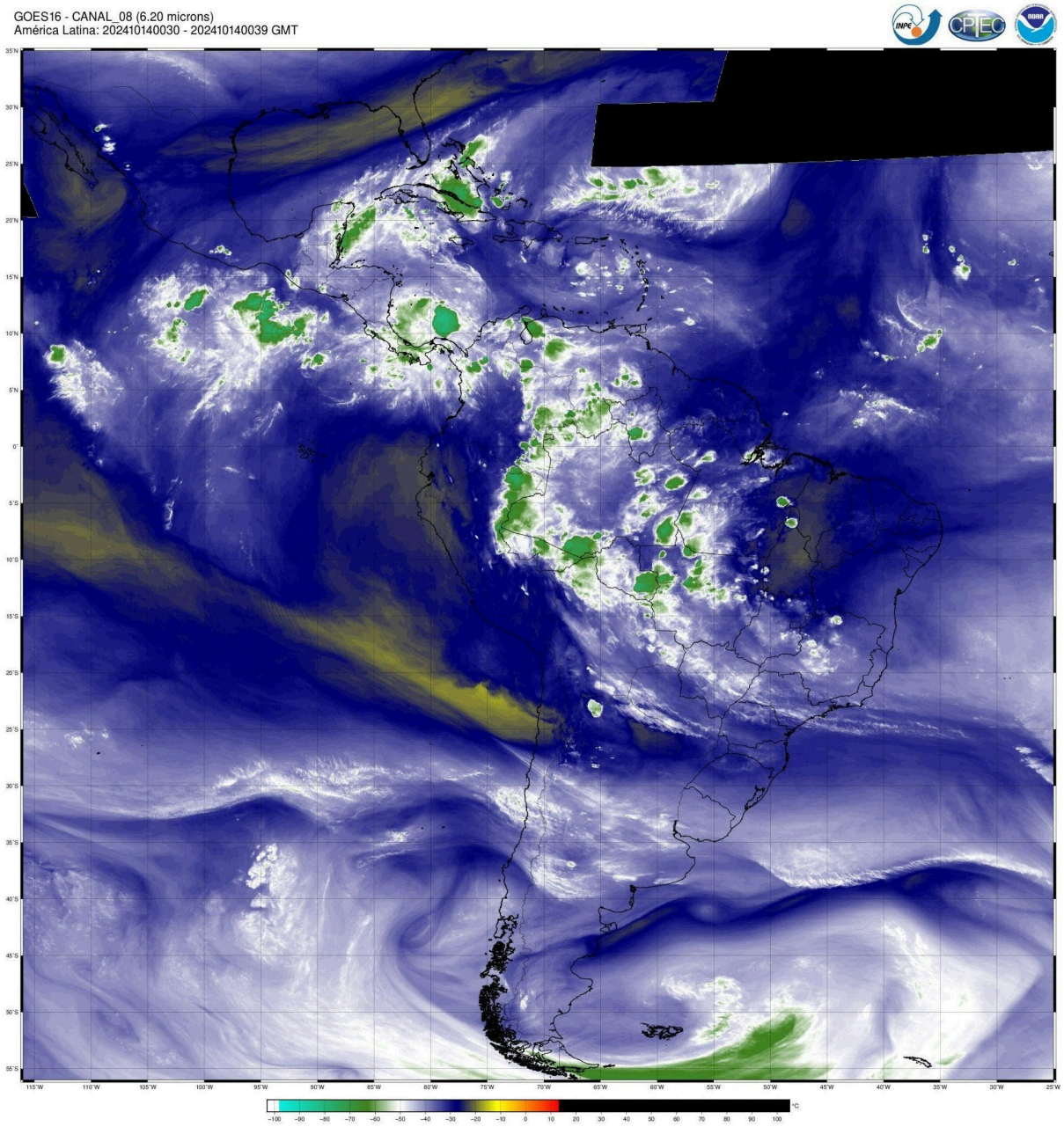
Anexo 37 - GOES 16 - Canal 08 (30/09/2024)



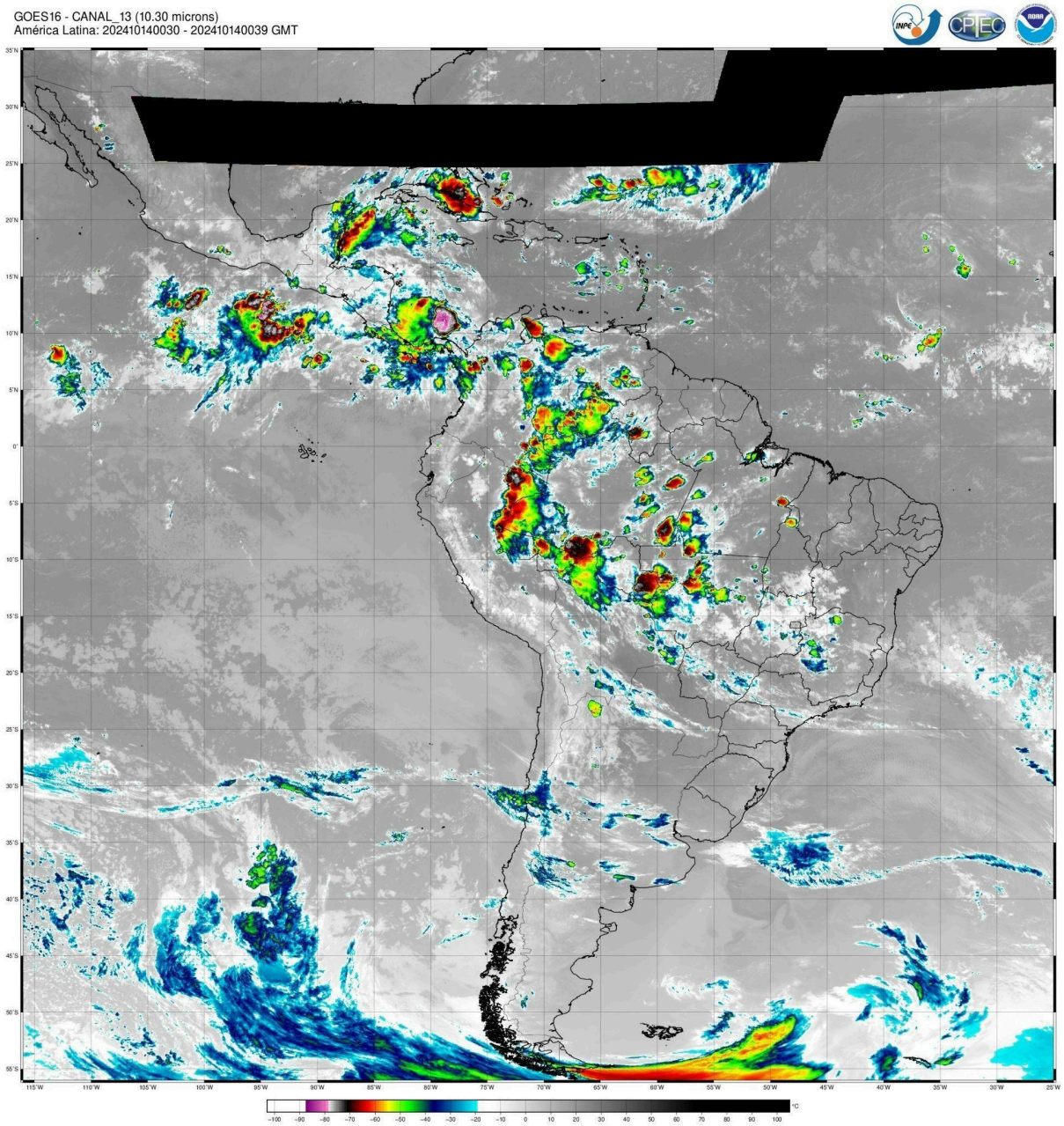
Anexo 38 - GOES 16 - Canal 13 (30/09/2024)



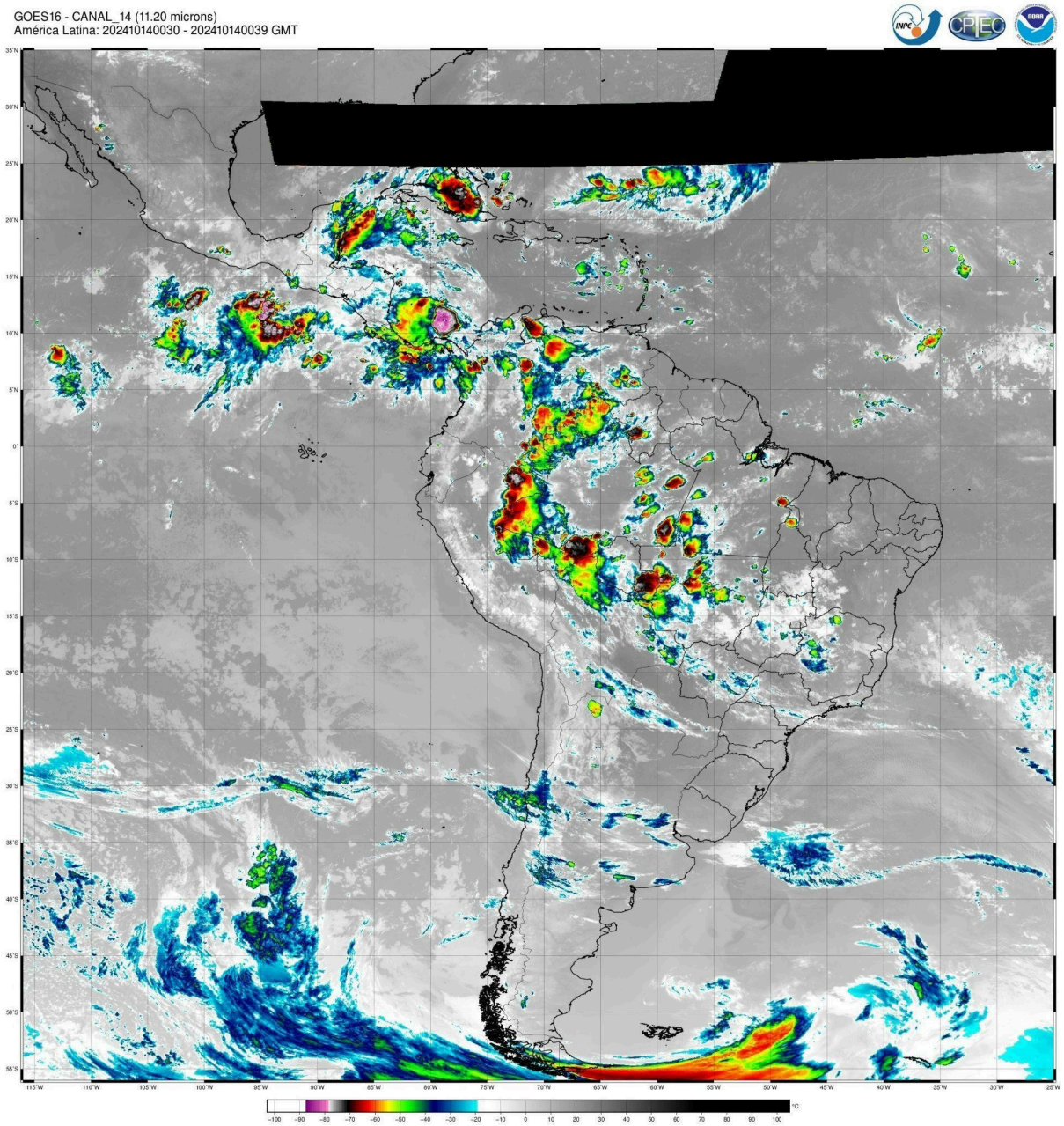
Anexo 39 - GOES 16 - Canal 14 (30/09/2024)



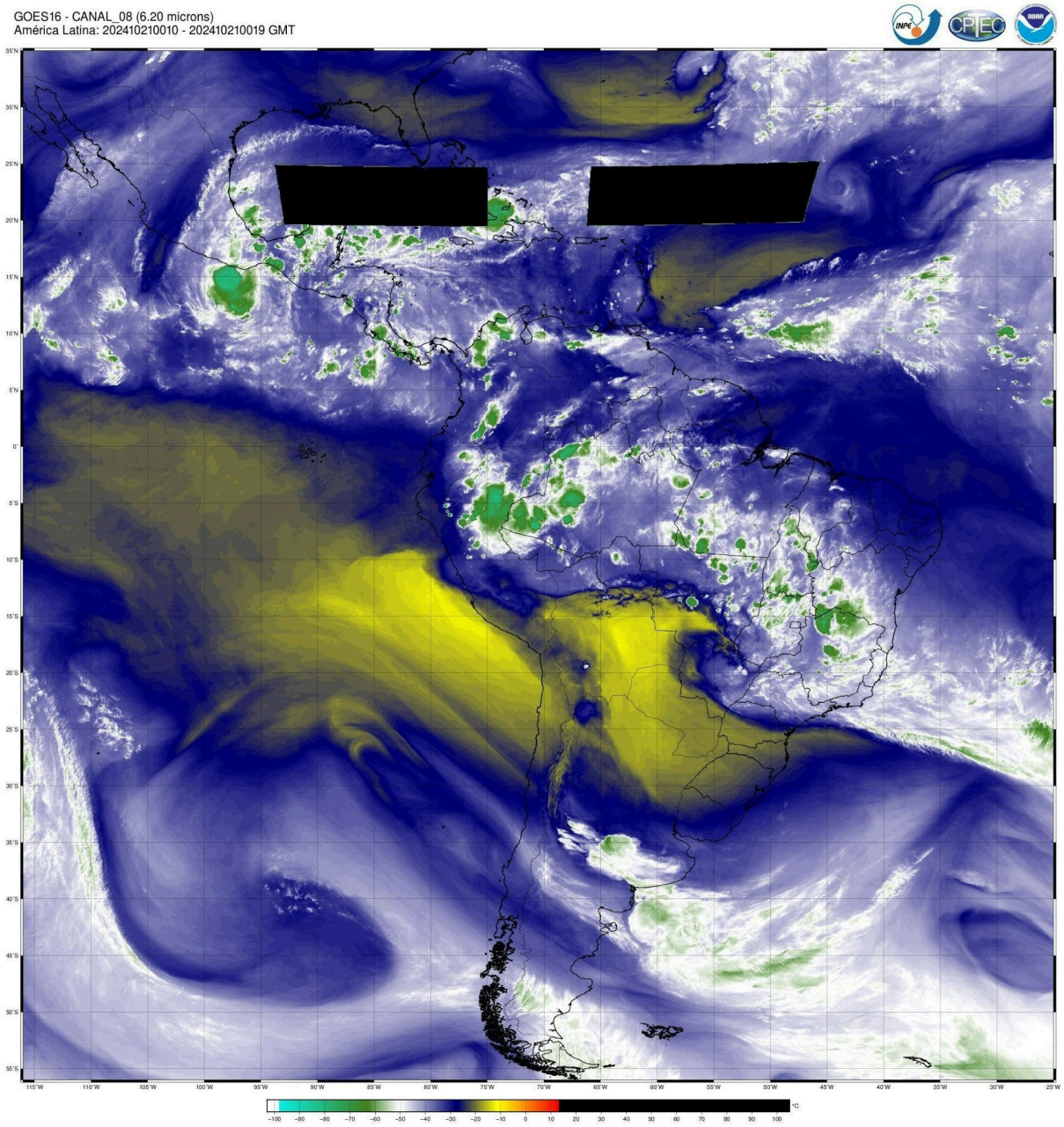
Anexo 40 - GOES 16 - Canal 08 (14/10/2024)



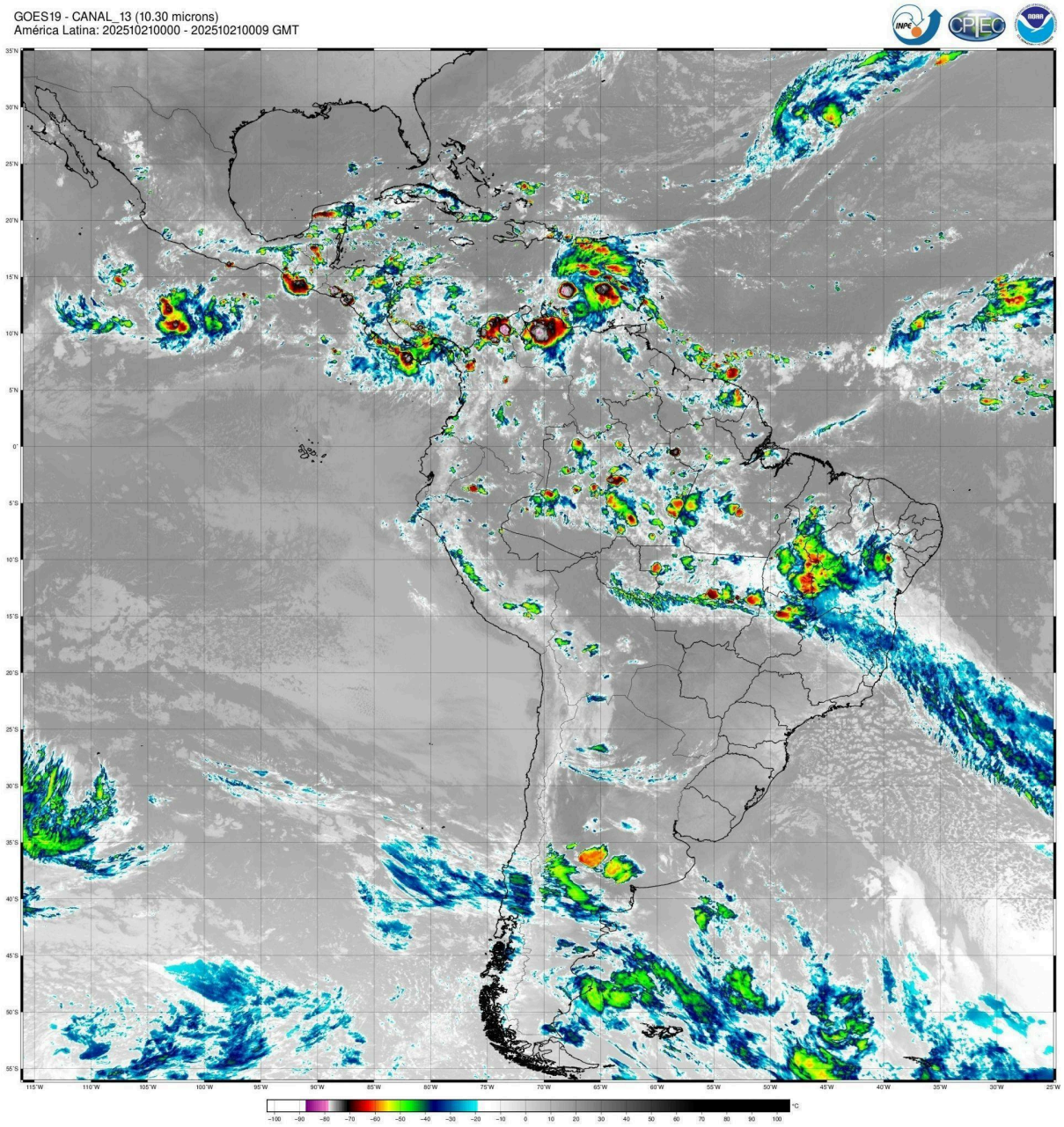
Anexo 41 - GOES 16 - Canal 13 (14/10/2024)



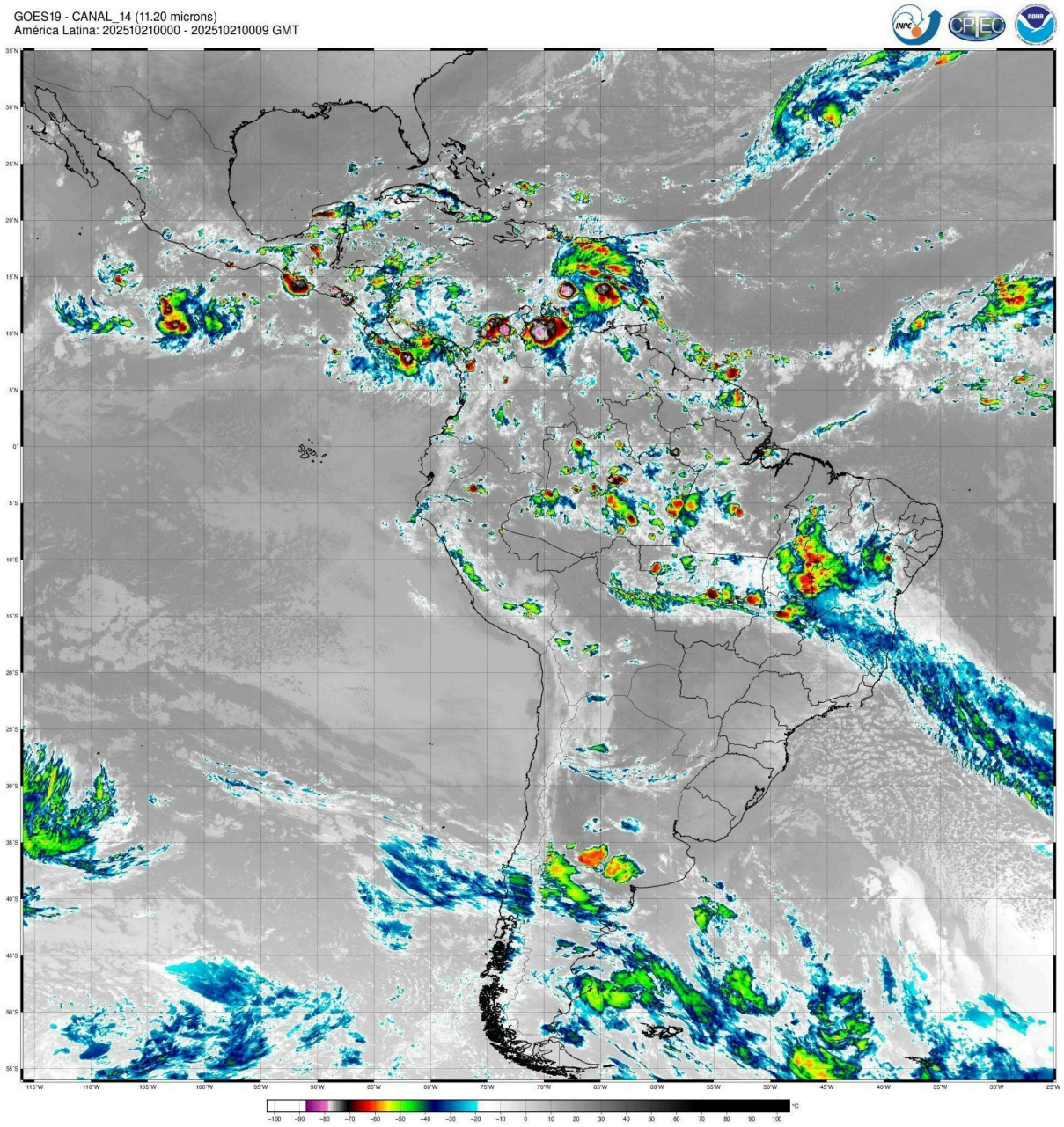
Anexo 42 - GOES 16 - Canal 14 (14/10/2024)



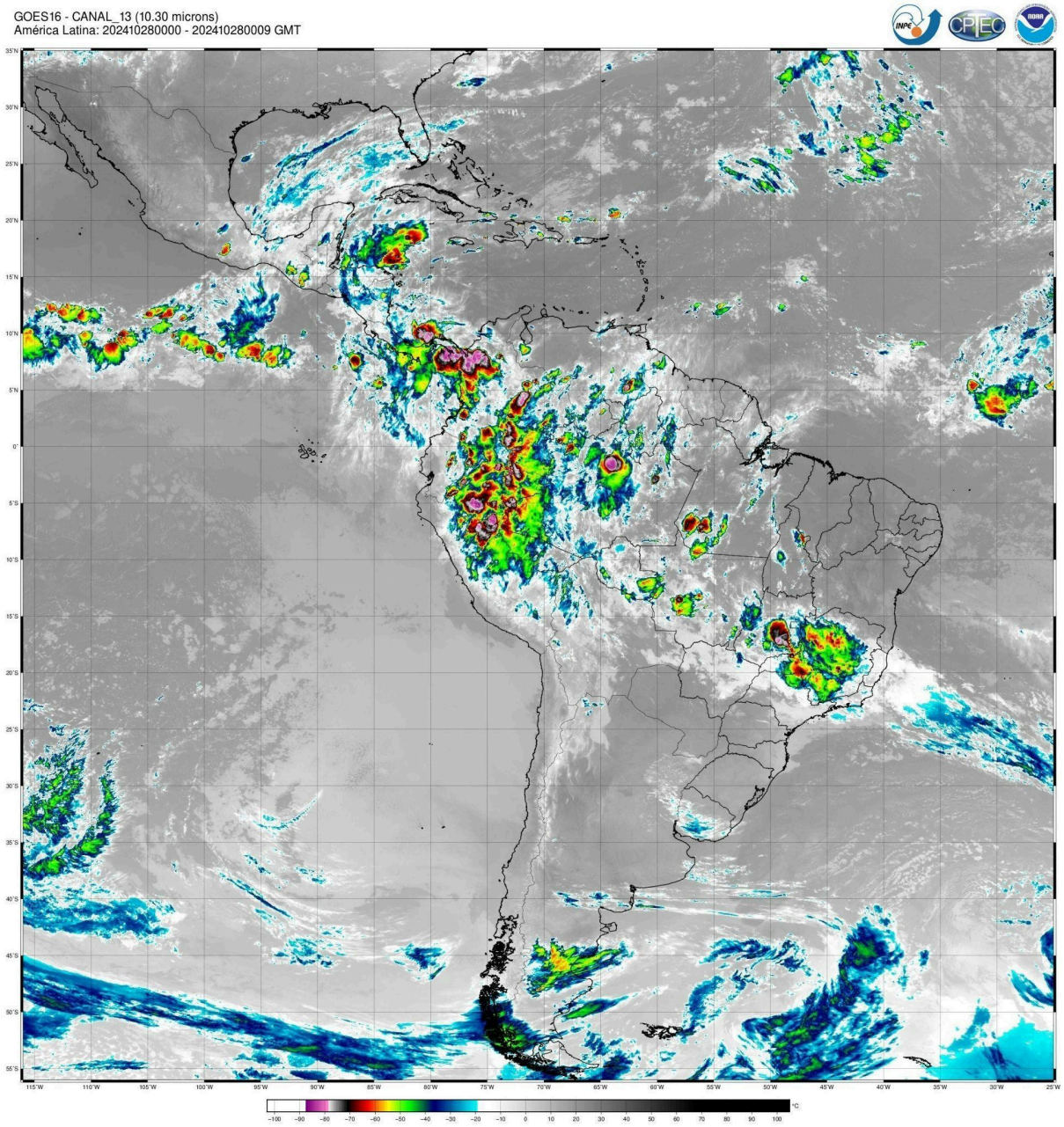
Anexo 43 - GOES 16 - Canal 08 (21/10/2024)



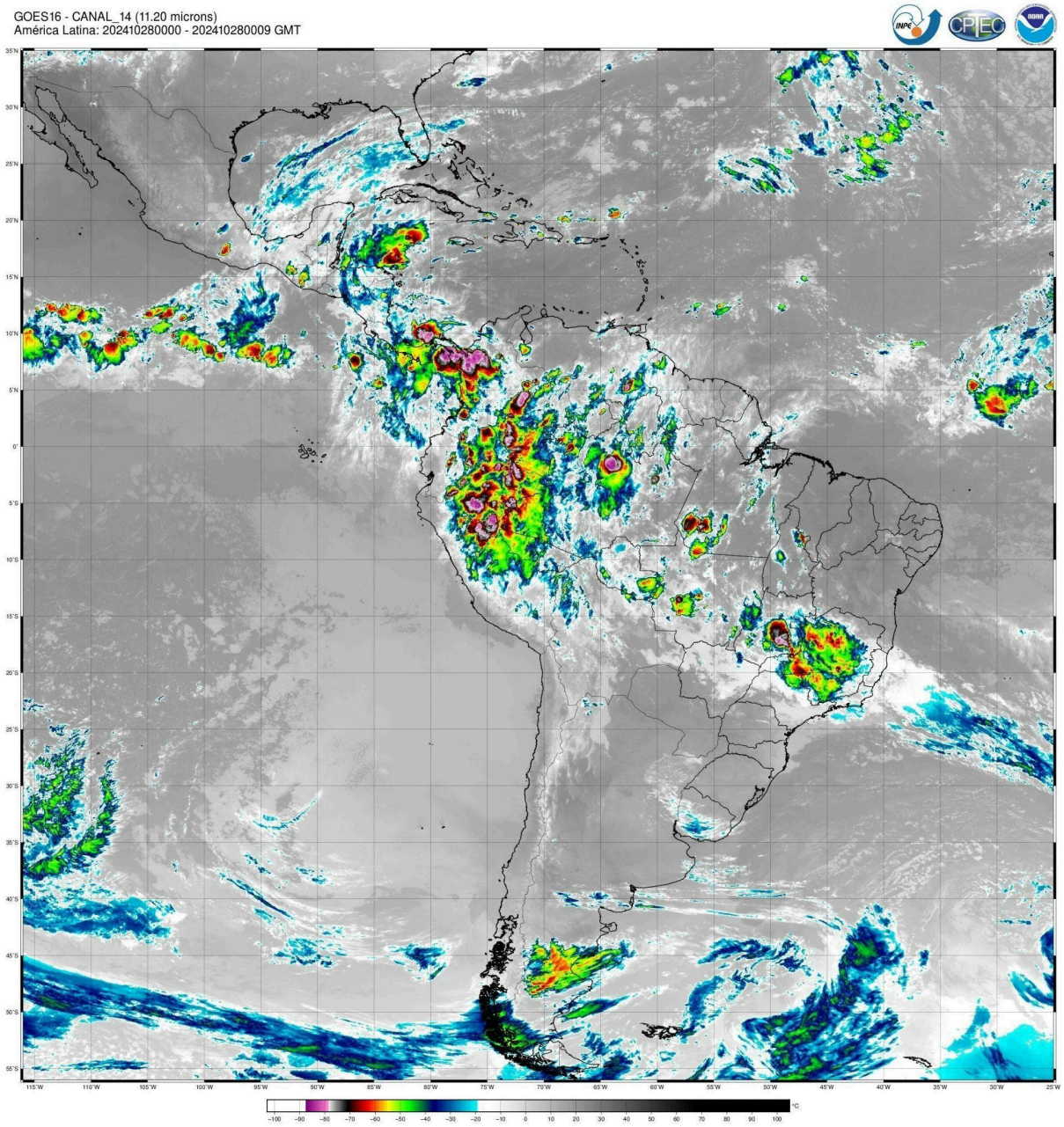
Anexo 44 - GOES 16 - Canal 13 (21/10/2024)



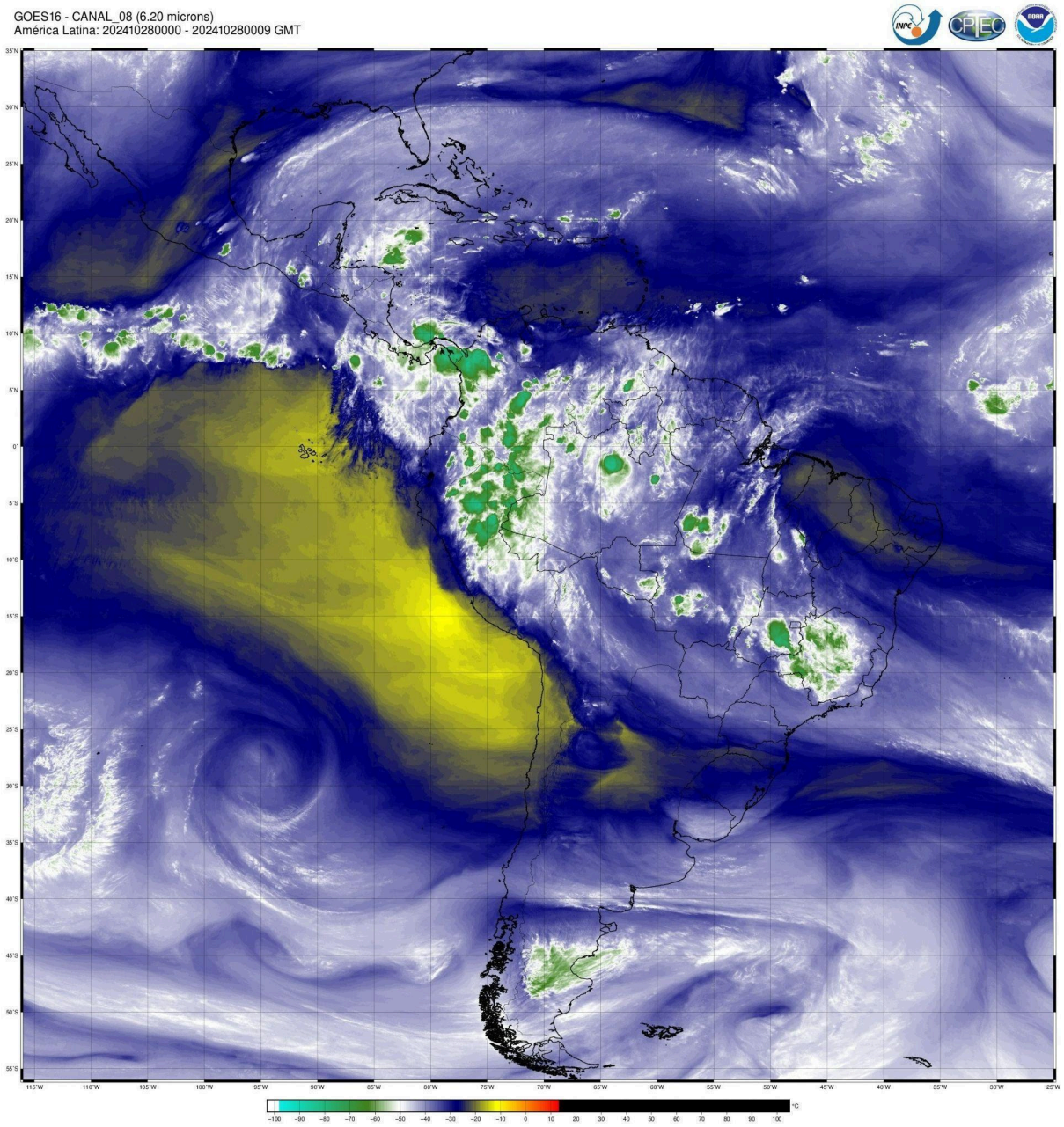
Anexo 45 - GOES 16 - Canal 14 (21/10/2024)



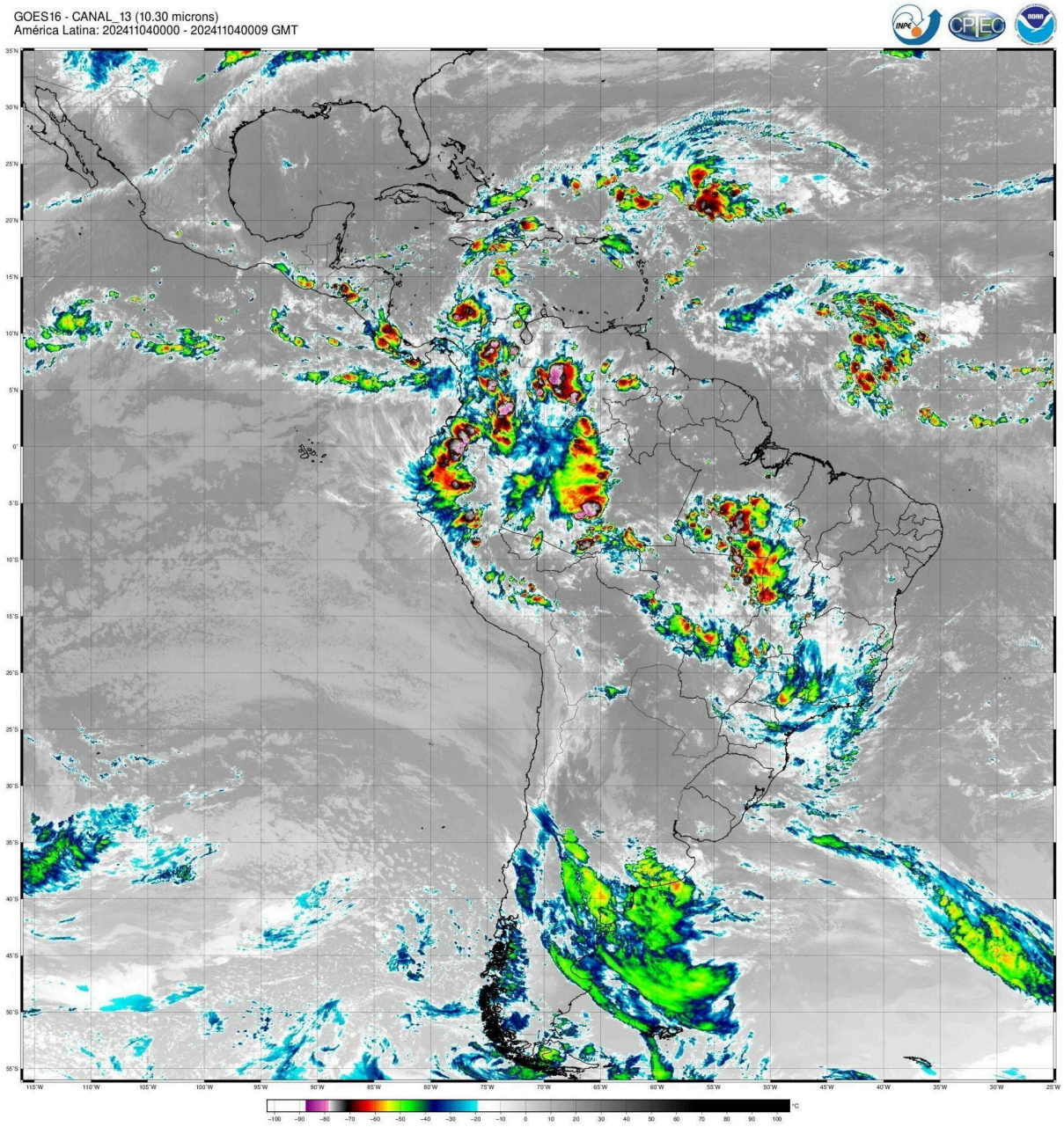
Anexo 46 - GOES 16 - Canal 13 (28/10/2024)



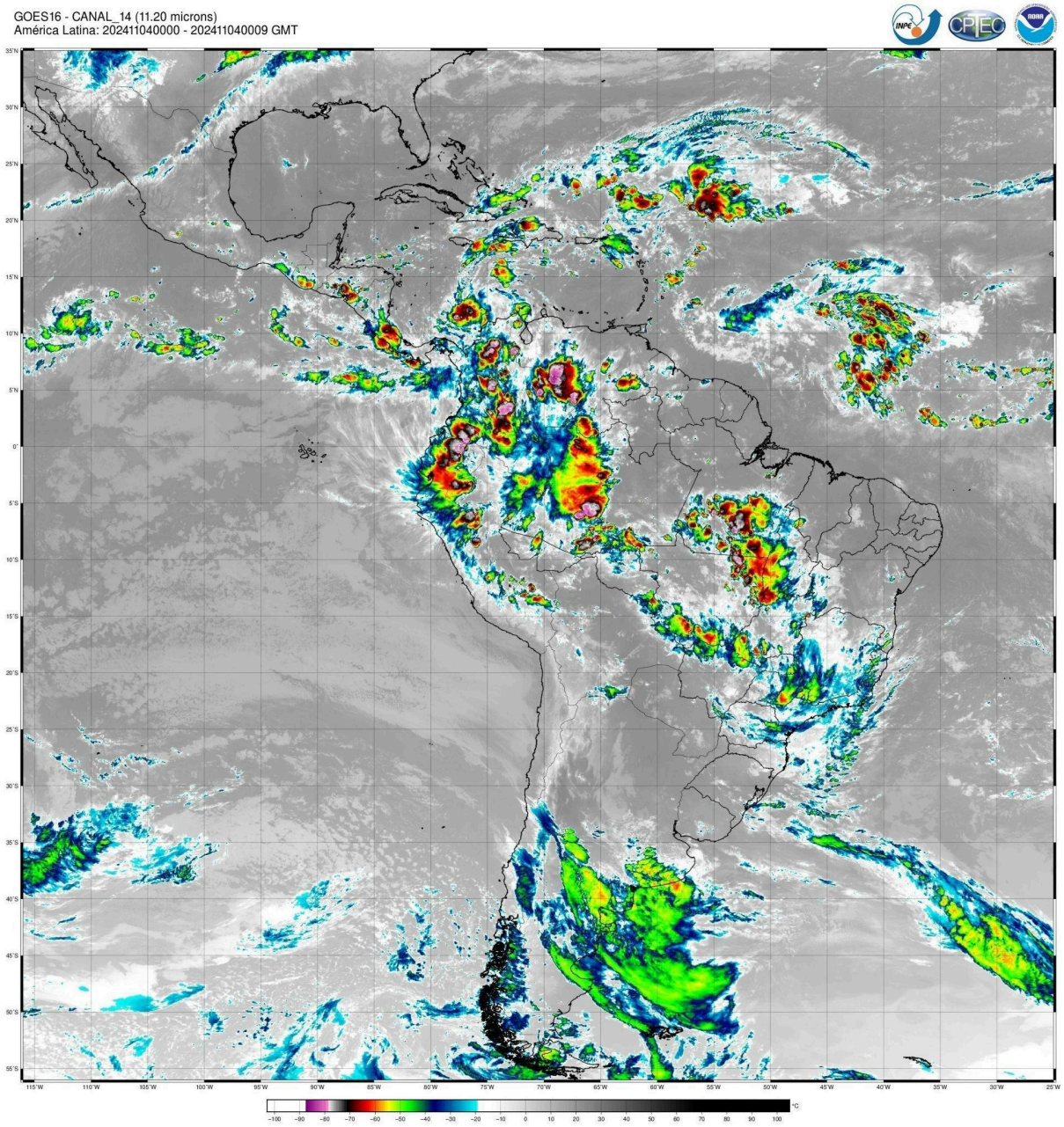
Anexo 47 - GOES 16 - Canal 14 (28/10/2024)



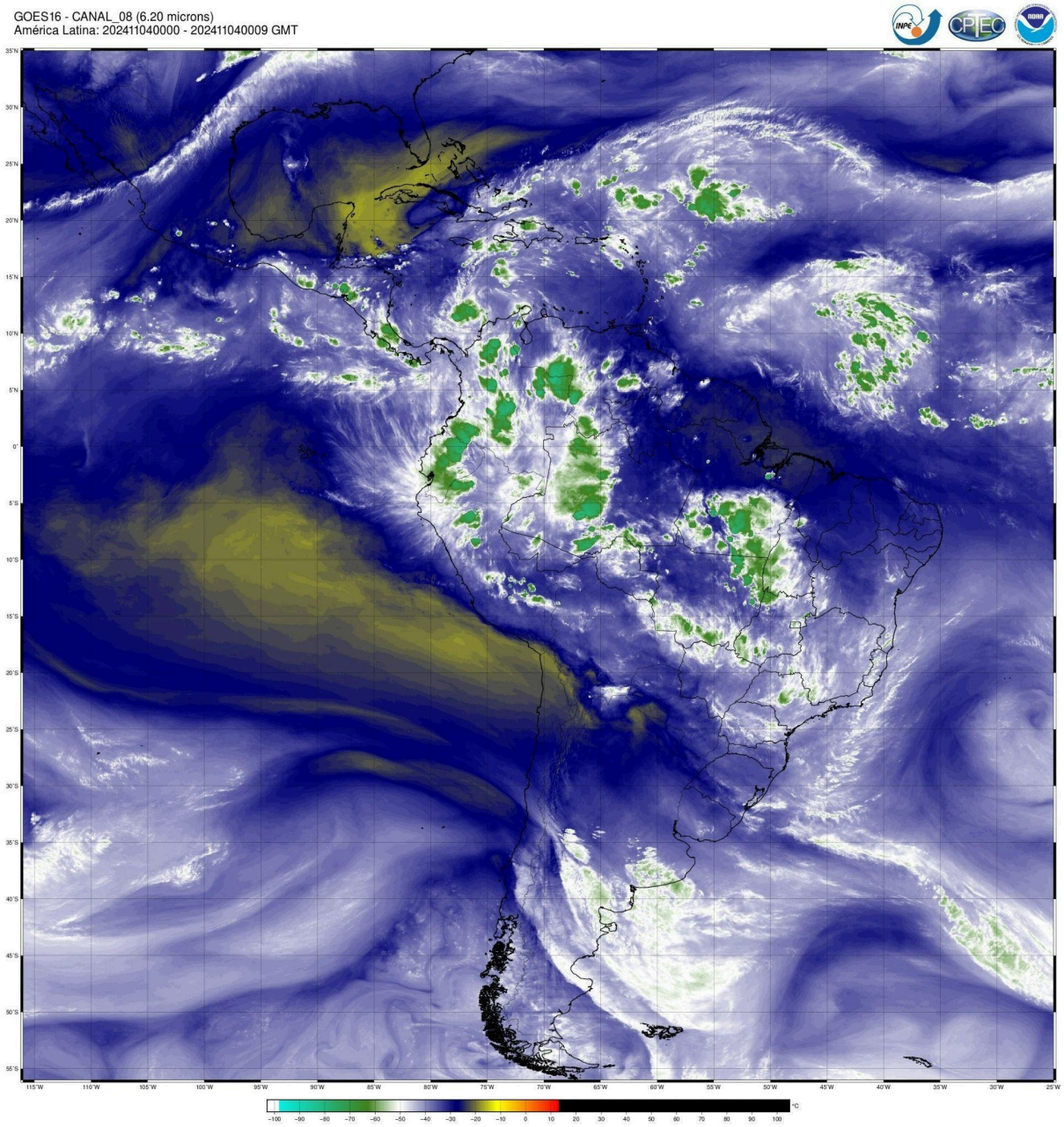
Anexo 48 - GOES 16 - Canal 08 (28/10/2024)



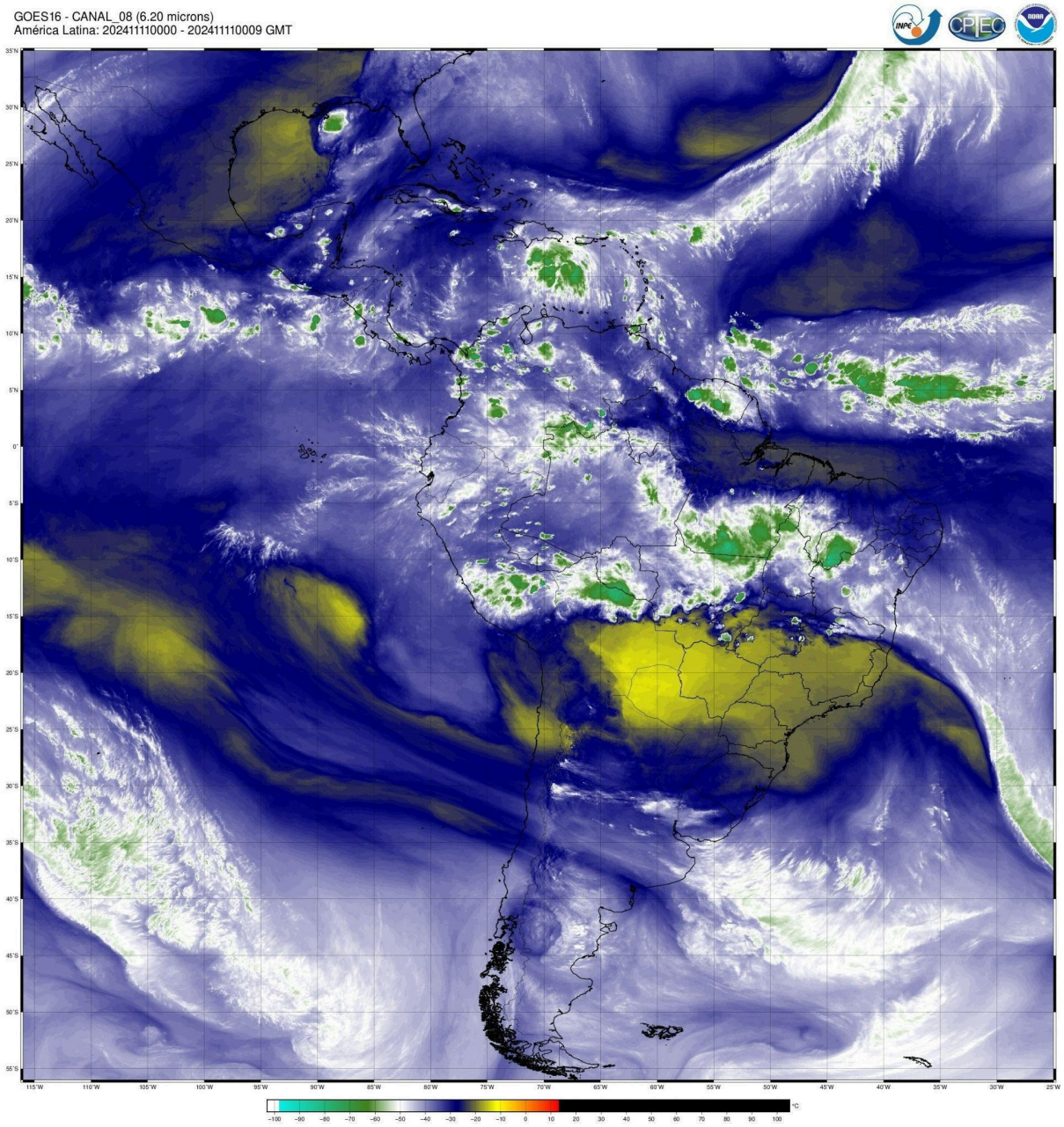
Anexo 49 - GOES 16 - Canal 13 (04/11/2024)



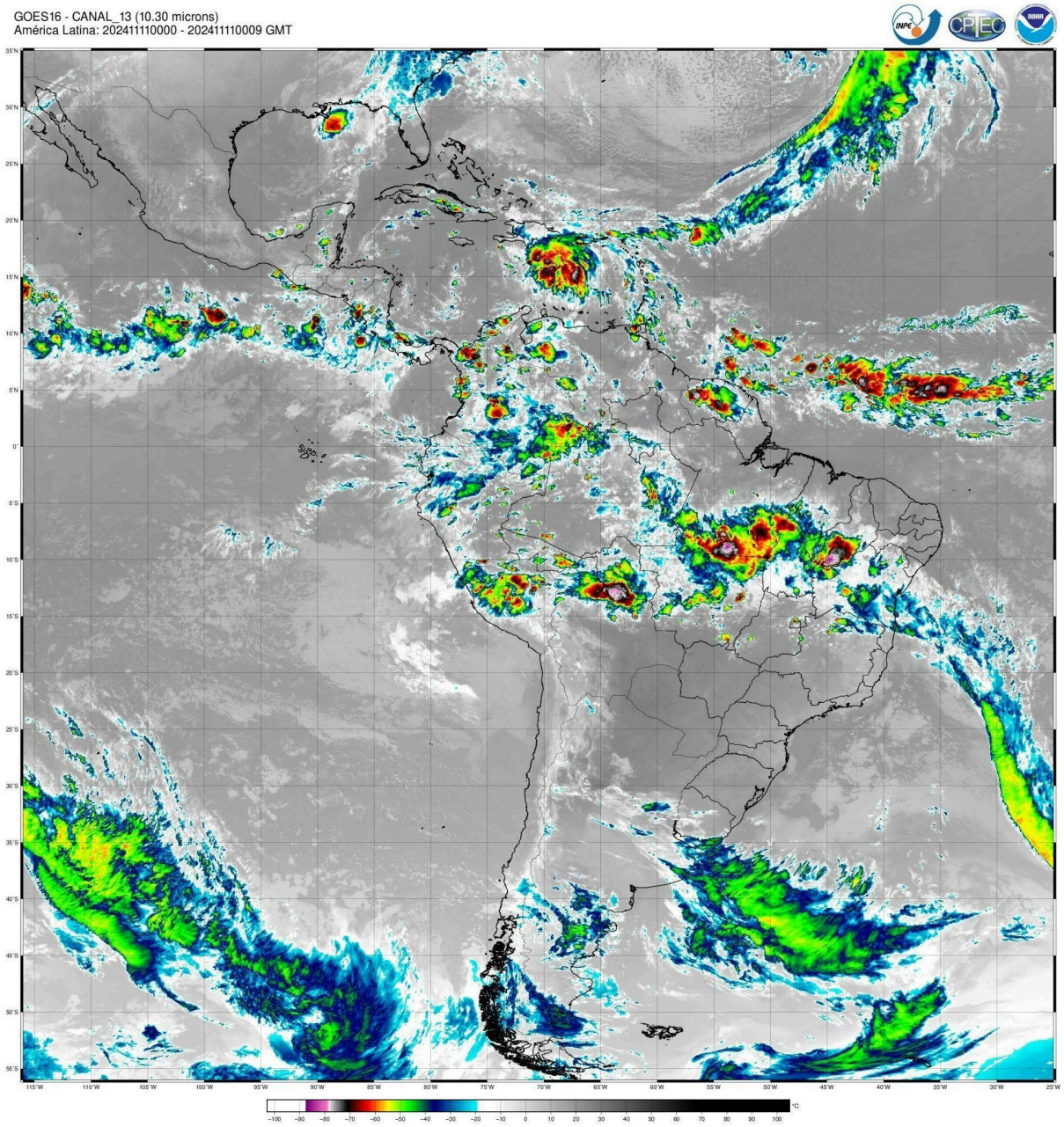
Anexo 50 - GOES 16 - Canal 14 (04/11/2024)



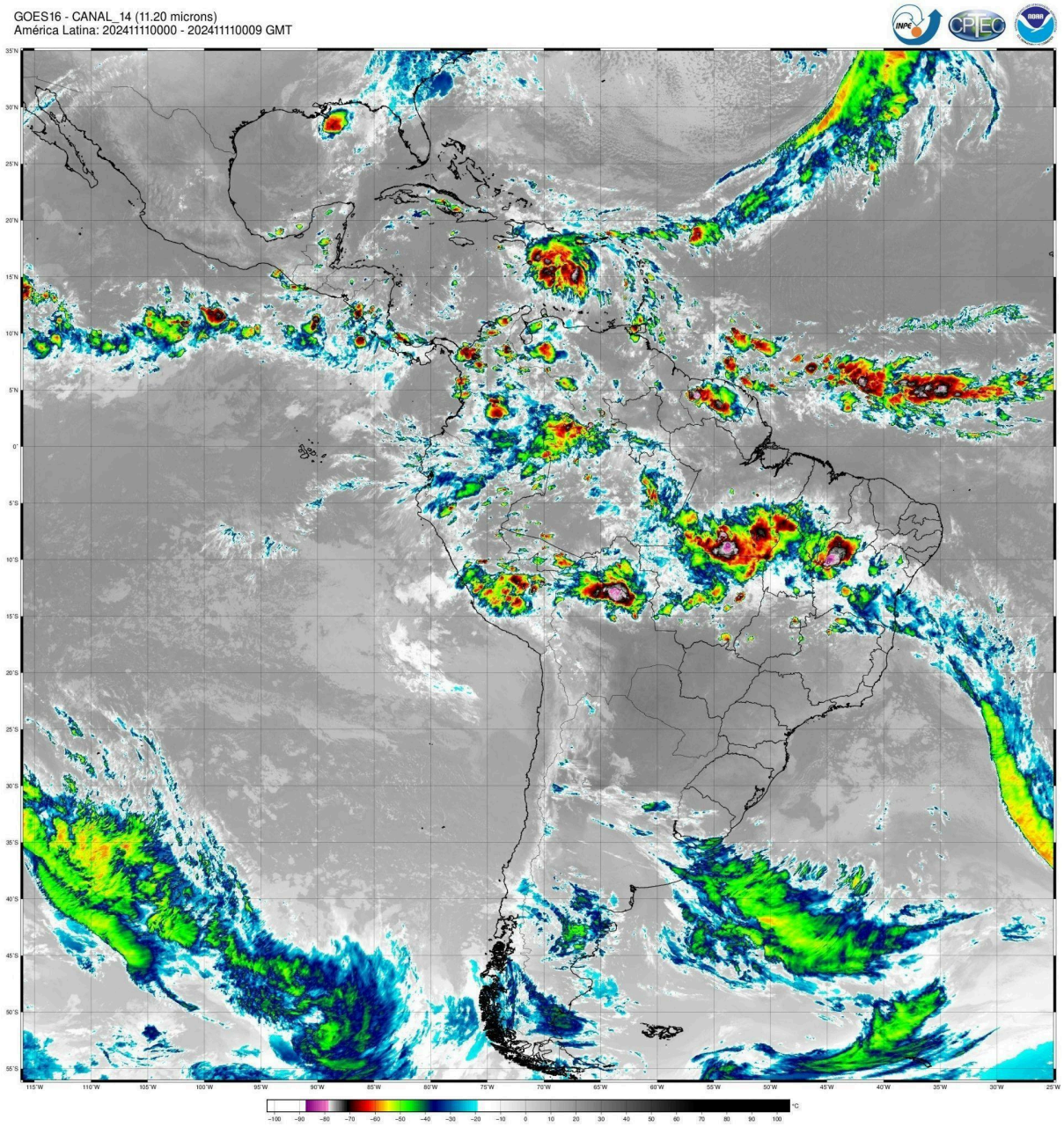
Anexo 51 - GOES 16 - Canal 08 (04/11/2024)



Anexo 52 - GOES 16 - Canal 08 (11/11/2024)



Anexo 53 - GOES 16 - Canal 13 (11/11/2024)



Anexo 54 - GOES 16 - Canal 14 (11/11/2024)