

TRANSFORMAÇÕES ESPACIAIS E IMPACTOS NO CAMPO TERMAL DE
MACAÉ.

Paloma Arantes Machado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador (es): José Ricardo de Almeida França

Andrews José de Lucena

Rio de Janeiro

Julho de 2015

TRANSFORMAÇÕES ESPACIAIS E IMPACTOS NO CAMPO TERMAL DE
MACAÉ.

Paloma Arantes Machado

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM METEOROLOGIA.

Examinada por:

Prof. Dr. José Ricardo de Almeida França

Prof. Dr. Andrews José de Lucena

Prof. Dr. Leonardo de Faria Peres

Dra. Daniela França

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2015

Machado, Paloma Arantes

Transformações espaciais e impactos no campo termal de Macaé./ Paloma Arantes Machado. – Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2015.

XXII, 132 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: José Ricardo de Almeida França

Andrews José de Lucena

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN
Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 67-73.

1. Expansão urbana. 2. Temperatura de superfície. 3. Macaé. I. De Almeida França, José Ricardo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Transformações espaciais e impactos no campo termal de Macaé.

As primícias dos meus agradecimentos quero levar à Deus, àquele quem me criou, me sustenta, e me renova a cada manhã.

Quero agradecer ao Bernardo, por ter me apoiado e me sustentado em todo tempo, principalmente nos momentos de desespero. Muito obrigada!

Agradeço ao meu pai, Marcelo, e minha mãe, Fátima, que sempre cuidaram de mim com muito amor, me ajudando a crescer e tornar-me a mulher que sou hoje.

Agradeço o apoio da minha família, e em especial, minha irmã Marcele, amada da minha vida. Minha irmã tão querida que sempre esteve ao meu lado, me dando forças quando eu achava que não conseguiria.

Meu coração se alegra em ter um sogro e uma sogra tão maravilhosos como os meus! Muito obrigada, Augusto e Vera Machado por tudo que vocês sempre fazem na minha vida e para minha família. Vocês são fundamentais na minha vida!

Agradeço a companhia dos meus amigos que fazem meus finais de semana mais felizes! Natália, Beto e Marcella, a presença de vocês me faz muito bem!

À minha amiga Debora Duarte, que desde a graduação se tornou minha companheira, amiga, madrinha e uma irmã em Cristo incrível! Muito obrigada por suas palavras sempre tão sábias.

Agradeço ao meu orientador José Ricardo, que, com muita paciência (E quanta paciência!! rs), não desistiu de mim nessa trajetória.

Ao querido orientador, Andrews, muito obrigada por todo apoio, palavras de força, idas à Barra da Tijuca, aulas pelo Skype e muito mais! Muito obrigada mesmo!

Agradeço ao professor Leonardo Farias que, além de me ceder sua sala de estudos, me aturou com tantas “perguntinhas” em seus momentos de concentração, rs.

Agradeço ao amigo Vítor Miranda, que entregou horas de sua dedicação a minha pesquisa, principalmente com o “pavor” dos geógrafos: os cálculos! Valeu pela força!! Você vai longe com sua dedicação.

Aos amigos que fizeram parte dos meus dias na UFRJ, Suzzana e Gustavo. Valeu pela força e momentos de descontração! E Rebeca, que me acompanhou bem de perto nos períodos mais estressantes do trabalho.

Agradeço à geógrafa Gisele Borges, que me ajudou com os mapas de uso do solo.

À Daniela França, que me socorreu de última hora de forma muito atenciosa.

Muito obrigada a todos que me acompanharam de perto ou de longe, orando, ou me incentivando, e aos que muitas vezes me ajudaram a não desistir.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

TRANSFORMAÇÕES ESPACIAIS E IMPACTOS NO CAMPO TERMAL DE MACAÉ.

Paloma Arantes Machado

Julho/2015

Orientadores: José Ricardo de Almeida França

Andrews José de Lucena

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

Este trabalho analisa o comportamento temporoespacial da temperatura de superfície continental (TSC) na área urbana de Macaé, embasada no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de área construída (IBI), e no uso e cobertura do solo. As análises foram feitas através de imagens do sensor TM, abordo do satélite Landsat 5. Através do sensoriamento remoto foram gerados mapas de TSC, NDVI, IBI, e uso e cobertura do solo, para um episódio dos anos 80, 90, 2000, e 2010, o que possibilitou uma análise temporal, espacial e sazonal. Os resultados mostraram que, junto ao crescimento da área urbana de Macaé, surgiram pontos favoráveis à formação de ilhas de calor, evidenciando que as áreas edificadas são mais quentes.

Palavras chave: (TSC; Landsat; expansão urbana; Macaé)

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SPATIAL TRANSFORMATION AND THE IMPACTS ON THE MACAÉ'S
THERMAL FIELDS

Paloma Arantes Machado

July/2010

Advisors: José Ricardo de Almeida França

Andrews José de Lucena

Department: Meteorology

This work analyzes the behavior in time and space of land surface temperature (TSC) in the urban area of Macaé, based on vegetation index (NDVI), built area index (IBI), and use and land cover. Analyses were performed by TM sensor images, aboard the Landsat 5. Through remote sensing were generated TSC maps, NDVI, IBI, and use and land cover, for an episode of 80, 90, 2000 and 2010, which enabled a temporal analysis, spatial and seasonal. The results showed that, with the growth of the urban area of Macaé, there were points favorable to the formation of heat islands, showing that the built-up areas are warmer.

Key words: (TSC; Landsat; urban sprawl; Macaé)

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
Capítulo 2 – Revisão bibliográfica	4
2.1. Análise do campo termal	4
2.1.1. Clima urbano: ilha de calor – histórico, definição e estudos de caso	4
2.1.2. Circunstâncias favoráveis à formação de ilha de calor.....	9
2.1.3. Efeitos da ilha de calor	11
2.2. Sensoriamento remoto	11
2.3. Impactos causados por indústrias	17
Capítulo 3 – Área de estudo	20
3.1. Aspectos Socioeconômicos	22
3.2. Aspectos físicos	25
Capítulo 4 – Materiais e Métodos	27
4.1. Materiais	28
4.1.1. Dados de sensoriamento remoto.....	28
4.2. Métodos	31
4.2.1. Seleção e processamento de imagens	31
4.2.2. Mapas de uso e cobertura do solo.....	34
4.2.3. Mascaramento de nuvens e do oceano	36
4.2.4. Temperatura de superfície continental (TSC)	37
4.2.5. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	40
4.2.6. Índice de área construída (IBI)	41
4.1.7. Identificação de áreas favoráveis à ilhas de calor.....	42

Capítulo 5 – Resultados	43
5.1. Análise temporoespacial do uso e cobertura do solo.....	43
5.2. Temperatura de superfície continental (TSC)	47
5.2.1. Análise sazonal da TSC.....	47
5.2.2. Análise temporoespacial da TSC.....	51
5.3. Análise temporoespacial do NDVI.....	54
5.4. Análise temporoespacial do IBI	58
5.5. A TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo, e com os índices NDVI e IBI	
Capítulo 6 – Considerações finais	64
Referências bibliográficas	68

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema de ilha de calor de uma região metropolitana.	6
Figura 3.1: Localização do município de Macaé.....	20
Figura 3.2: Recorte da área de estudos. Fonte: Base de dados cartográficos, IBGE.....	21
Figura 3.3: Número de habitantes em Macaé (RJ) no período de 1974 a 2014	22
Figura 3.4: Evolução da população urbana e rural de Macaé entre 1960 e 2010	23
Figura 3.5: Evolução da densidade populacional de Macaé entre 1960 e 2010.....	23
Figura 3.6: Relevo da região de Macaé.....	24
Figura 4.2: Imagem Landsat-5 da órbita ponto 216/75, referente ao dia 4-09-2010, onde está localizado o município de Macaé, região destacada em vermelho.....	29
Figura 5.1: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos 80 (imagem do dia 23/03/1985).....	43
Figura 5.2: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos 90 (imagem do dia 30/07/1991).....	43
Figura 5.3: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos 2000 (imagem do dia 09/01/2005).....	44
Figura 5.4: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos de 2010 (imagem do dia 23/03/2010).....	45
Figura 5.5: Mapa de TSC do dia 09/01/2005.....	47
Figura 5.6: Mapa de TSC do dia 04/07/2005.....	47
Figura 5.7: Mapa de TSC do dia 23/03/2010.....	48
Figura 5.8: Mapa de TSC do dia 04/09/2010.....	49
Figura 5.9: Mapa de TSC do dia 23/03/1985.....	51
Figura 5.10: Mapa de TSC do dia 30/07/1991.....	51

Figura 5.11: Mapa de TSC do dia 09/01/2005.....	52
Figura 5.11: Mapa de TSC do dia 23/03/2010.....	52
Figura 5.12: Mapa de NDVI do dia 23/03/1985 representando os anos 80.....	55
Figura 5.13: Mapa de NDVI do dia 30/07/1991 representando os anos 90.....	55
Figura 5.14: Mapa de NDVI do dia 09/01/2005 representando os anos 2000.....	56
Figura 5.15: Mapa de NDVI do dia 23/03/2010 representando os anos de 2010.....	56
Figura 5.16: Mapa de IBI representando os anos 80.....	58
Figura 5.17: Mapa de IBI representando os anos 90.....	59
Figura 5.18: Mapa de IBI representando os anos 2000.....	59
Figura 5.19: Mapa de IBI representando os anos de 2010.....	60
Figura 5.20: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 23/03/1985).....	61
Figura 5.21: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 30/07/1991).....	61
Figura 5.22: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 09/01/2005).....	62
Figura 5.23: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 23/03/2010).....	62

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Estudos sobre clima urbano que utilizaram o sensoriamento remoto termal.....	13
Tabela 4.1: Principais informações sobre a plataforma Landsat (Landsat 1 ao 8).....	27
Tabela 4.2: Banda espectral do Landsat 5.....	28
Tabela 4.3: Relação de imagens Landsat 5 utilizadas nesse trabalho.....	30
Tabela 4.4: Constantes de calibração para os canais de 2 a 6 dos sensores do Landsat 5.....	32
Tabela 4.5: Valores do ESUN para o Landsat 5.....	32

CAPÍTULO 1 – Introdução

1.1. Considerações iniciais

A produção do espaço urbano no Brasil foi intensificada a partir de 1940, intimamente ligada ao processo de industrialização no país. A urbanização transformou não somente a importância das grandes e médias cidades, como também suas estruturas morfológicas, gerando, assim, consequências positivas (criação de infraestrutura, saneamento, serviços) e negativas (poluição atmosférica, crescimento acelerado/desordenado) (CARVALHO *et al.*; 2010).

As cidades grandes e médias vêm enfrentando, junto ao seu crescimento econômico e demográfico, uma transformação no uso e cobertura da terra, e impactos ambientais que tem gerado consequências como ilhas de calor – ou *stress* térmico -, compactação dos solos que desencadeiam em *run-off*, e até mesmo mudança na circulação do ar local (NASCIMENTO *et al.*, 2009; FREITAS & DIAS, 2004; CAMARGO *et al.*, 2006).

O crescimento populacional e a expansão da área urbana geram impactos ambientais que podem ser intensificados pelas constantes modificações do espaço, acarretando um desequilíbrio na interação Terra-atmosfera. Com isso, o novo espaço construído, constantemente modificado devido a diferentes formas de usar e ocupar a terra, impermeabilização do solo, indústrias, diminuição de áreas vegetadas, pode alterar os elementos meteorológicos. A apropriação do espaço pelo homem acarretou nos ambientes intraurbanos e rural-urbanos, modificações no campo térmico, proporcionando em inúmeras cidades do mundo uma diferença no tempo de absorção da energia solar de comprimento de ondas curtas (durante o dia), e sua reemissão da energia solar de ondas longas para a Atmosfera (durante a noite). Com isso, tem sido possível perceber a contribuição do homem para o aumento da temperatura durante o dia e resfriamento mais lento durante a noite (AYOADE, 1988; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; MONTEIRO, 2003).

A ilha de calor é um “produto do clima urbano” (OKE, 1987), e tem sido relacionada aos impactos ambientais do clima, resultante de intensa urbanização em cidades médias e grandes. As mudanças na cobertura da superfície modificam o fluxo de energia, devido à capacidade térmica de absorção dos materiais de construção usados na

cidade (FEITOSA *et al.*, 2011). Diferentes técnicas têm sido empregadas em estudos sobre o clima urbano, como séries de dados temporais (HOMAR *et al.*, 2010; LUCENA, 2012), transectos móveis e fixos espalhados em diversos pontos da cidade (SUN *et al.*, 2009), modelagem atmosférica (OLESON *et al.*, 2010, LUCENA, 2012) e sensoriamento remoto (CHEVAL *et al.*, 2009, LORENA, 2012; ANDRADE *et al.*, 2007).

Analisar o clima urbano através de dados de séries temporais é comum, e muitas vezes mostram o efeito da ilha de calor urbano, embora seja necessária a aplicação de outra técnica conjunta para uma avaliação mais consistente. Em estudos recentes, uma ferramenta muito utilizada para detectar ilhas de calor é o sensoriamento remoto, sendo apontado como um método essencial na análise do campo termal (VOOGT e OKE, 2003; GRIMOND, 2006). Os sensores de satélites capturam imagens da superfície da Terra, permitindo visualizar e quantificar uma mudança no ambiente ao longo do tempo, além da possibilidade de descrever, classificar, e detectar propriedades físicas deste ambiente (LUCENA, 2012).

Outro problema ambiental resultante do crescimento dos núcleos urbanos é a instalação dos complexos industriais, que na maioria das vezes estão no centro das cidades. Os impactos ambientais promovidos pelas indústrias não são prerrogativas do Brasil, visto que, países europeus conhecem problemas semelhantes, mas buscam iniciativas que conjuguem qualidade de vida e crescimento econômico. Há uma gama de problemas atribuídos aos impactos ambientais causados por complexos industriais: poluição sonora, poluição de águas, do solo, do ar, etc. As indústrias químicas, sobretudo as de Petróleo, têm sido grande causadora de problemas ambientais, emitindo gases poluentes e materiais particulados para atmosfera, além do vazamento e despejo de óleos nos oceanos (LEAL *et al.*, 2008).

A instalação de uma indústria em cidades de médio/pequeno porte pode modificar, além da rotina social e econômica, os aspectos ambientais do local. Alguns municípios do estado do Rio de Janeiro assumiram novas características (socioeconômicas, ambientais), após a implantação de indústrias. O caso de Macaé, município da região norte do RJ, enquadra-se nesta situação. A população de Macaé aumentou consideravelmente, sobretudo, de 1991 a 2010 (de 100.895 para 206.728 mil habitantes, respectivamente), como resultado do crescimento da indústria petrolífera na

cidade. As transformações conduzidas, inclusive, pela indústria nesta região, podem causar impactos ambientais de diferentes magnitudes, incluindo no clima urbano local.

Dentro deste contexto, o objetivo principal deste trabalho é fazer uma análise temporoespacial da temperatura de superfície continental (TSC) nos últimos 30 anos na área urbanizada de Macaé e seus arredores, identificar possíveis áreas favoráveis à ocorrência de ilha de calor, e identificar a expansão da área urbana de Macaé relacionada com a indústria do petróleo na Bacia de Campos. A crescente urbanização e alteração do uso e cobertura do solo de Macaé trazem consigo a interação do clima com as atividades humanas. Deste modo, os objetivos específicos foram traçados da seguinte forma:

- ⇒ Mapear a temperatura da superfície continental (TSC) no tempo e no espaço na área urbanizada de Macaé e seus arredores, através de imagens termais do Landsat 5;
- ⇒ Analisar a espacialização da TSC apoiada na classificação de uso e cobertura do solo, no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), e no índice de área construída (IBI);
- ⇒ Correlacionar a TSC, o NDVI e o IBI com expansão da área urbana de Macaé.

O presente estudo está estruturado em 6 capítulos. O capítulo 1 discorre sobre a introdução, contextualizando a urbanização e seus reflexos no clima urbano, impactos ambientais promovidos por indústrias, e os objetivos desta pesquisa. No capítulo 2 está a fundamentação teórica do trabalho, onde foram revisadas literaturas específicas sobre clima urbano, aplicação do sensoriamento remoto no clima urbano, e impactos ambientais causados especificamente por indústria petrolífera. O capítulo 3 apresenta a área de estudos, com as descrições dos aspectos socioeconômicos e físicos da região. No capítulo 4 foram descritos os métodos e ferramentas que serão utilizados na análise temporoespacial da temperatura de superfície em Macaé. No capítulo 5 estão apresentados os resultados obtidos através da análise dos mapas gerados a partir de imagens do satélite Landsat 5. Por fim, o capítulo 6 com considerações finais e principais apontamentos da pesquisa.

CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfica

2.1. Análise do campo termal

2.1.1. Clima urbano: Ilha de calor - histórico, definição e estudo de caso.

A análise sobre o comportamento do campo térmico tem sido objeto de estudos em diferentes áreas acadêmicas que envolvem o clima urbano, juntamente com a análise do crescimento das cidades de grande e médio porte. Os estudos contemporâneos das disciplinas ligadas ao meio-ambiente dão ênfase às transformações ocorridas nos espaços urbanos, pois é neste espaço que visualizamos as alterações e influências da sociedade (ANDRADE *et al.*, 2010). Segundo RIZWAN *et al.* (2007) a ilha de calor é um problema ambiental e a principal manifestação do clima urbano, embora também considere outros problemas pertinentes ao clima, como poluição atmosférica e inundações.

O processo de urbanização pode alterar o balanço de radiação do Sistema superfície-atmosfera, de modo que haja aumento nos valores de temperatura do ar, devido às alterações no uso e cobertura da terra (GARTLAND, 2008). Para Andrade *et al.*(2010), as modificações que ocorrem nos elementos climáticos geram grande repercussão ecológica, pois afetam diretamente a população, seja através do desconforto térmico ou pela produção de poluentes que se concentram em áreas prejudiciais à paisagem urbana.

Os estudos concernentes ao tema ilha de calor (IC) tiveram início na Europa no século XIX, com o cientista inglês Luke Howard, embora somente em meados do século XX este fenômeno tenha sido denominado de “ilha de calor” Landsberg (1956), MANLEY (1958), e CHANDLER (1965), compararam a temperatura da cidade com a da região rural, e perceberam que a cidade apresentara temperaturas anuais superiores em até 2°C. Outros estudos sobre IC foram produzidos nas últimas décadas, abordando diferentes perspectivas, como VOOGT e OKE (2003) que destacaram a forma, intensidade e localização do núcleo mais quente da IC; ROTH (2007) selecionou os principais trabalhos de IC em regiões subtropicais; TAHA (1997) descreveu as causas e efeitos da IC correlacionando o calor produzido por atividades humanas à intensificação da IC.

No Brasil, a temática sobre ilha de calor começou a ser estudada a partir da década de 1980, e reflexões sobre tal tema acompanhou o desencadeamento de discussões sobre o macrotema “mudanças climáticas globais”, impulsionada pelo ECO-92. Na década de 80, LOMBARDO (1985) escreveu sobre ilha de calor nas metrópoles, analisando o caso da cidade mais urbanizada do Brasil, São Paulo, e nos últimos anos a produção de trabalhos sobre tal tema tem avançado no país (AMORIM *et al.* 2009; MOREIRA & GALVÍNIO, 2009; ANDRADE *et al.* 2007; MORAES *et al.* 2005; AMORIM, 2005; LUCENA *et al.*, 2013)

A ilha de calor pode ser definida como uma medida de diferença, e não uma medida absoluta da temperatura (VOOGT, 2002). Com isso, a IC remete-se ao padrão espacial do contorno das isotermas que formam uma ou várias “ilhas”, onde pode ser identificado um gradiente térmico elevado no limite entre as áreas rurais e urbanas, ou até mesmo dentro do próprio espaço urbano. A IC também pode ser definida como: “o calor característico das áreas urbanas quando comparadas com seus arredores (não urbanizados) e, geralmente, refere-se ao aumento na temperatura do ar, mas pode igualmente referir-se ao calor relativo da superfície ou materiais subsuperficiais” (LUCENA, 2012). A ilha de calor pode apresentar três aspectos principais, relacionados à sua forma, intensidade e localização do núcleo (região mais aquecida). Além disso, apresenta-se de diferentes formas em cada cidade devido à época do ano, tempo atmosférico, momento do dia, localização geográfica, e propriedades térmicas dos materiais que compõe a superfície (LUCENA, 2012).

A IC pode variar em diferentes aspectos, como: variação, diária, sazonal, variação espacial, e variação temporal. O período mais favorável para ocorrência de ilha de calor é durante o dia, tanto no horário de maior aquecimento diurno, quanto no momento de resfriamento noturno (SUN *et al.*, 2009). No período de inverno e verão, os sistemas atmosféricos atuantes em cada região, irão influenciar nas características da IC, sendo esta mais intensa em condições atmosféricas mais secas, e menos intensa em condições mais úmidas (ROTH, 2007). Espacialmente, a IC pode variar de acordo com as características da superfície local, como cobertura vegetal, corpos hídricos e áreas edificadas. Além disso, os efeitos topográficos nas circulações locais são influenciados pela posição e pela latitude (FAST e MCCORCLE, 1990). Temporalmente, a variação da IC ocorre em consequência das diferentes taxas de resfriamento entre áreas urbanas e rurais, uma vez que, estadiferenciação nas taxas de resfriamento ocorre em função da

superfície urbana, das condições atmosféricas, e até da sazonalidade. A **Figura 2.1** mostra um esquema clássico de ilha de calor em uma região metropolitana, onde os ambientes apresentam diferentes temperaturas de acordo com o grau de urbanização.

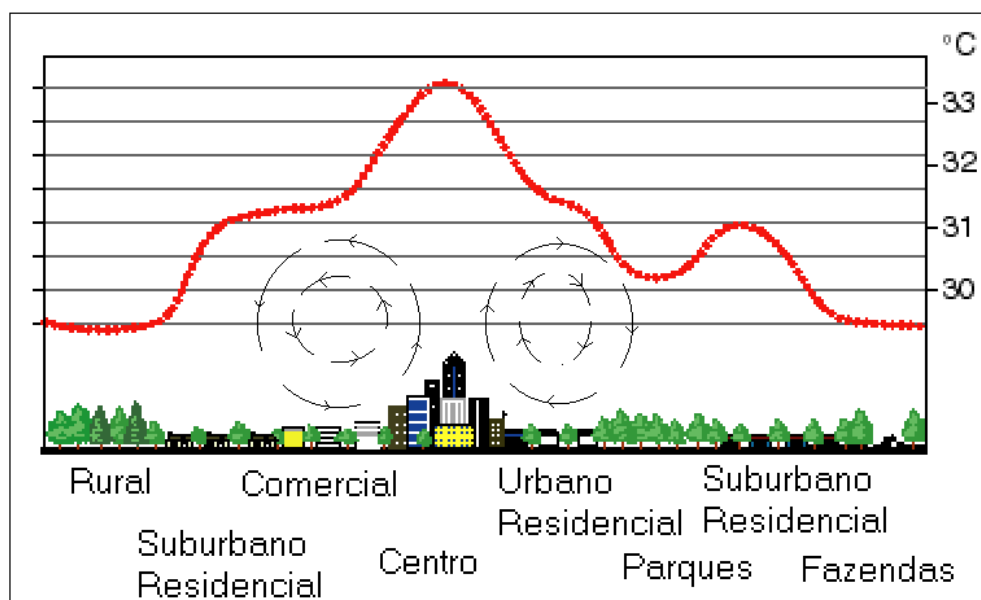


Figura 1: Esquema de ilha de calor de uma região metropolitana. FONTE: Adaptado de Heat Island Group - Livermore National Labs.

Assim, como pode ser visto na **Figura 2.1**, o ponto que apresenta a temperatura mais elevada encontra-se entre o ambiente comercial e urbano residencial – o centro da cidade. De acordo com OKE e MAXWELL (1974), a intensidade da ilha de calor pode estar associada ao tamanho da população local, ou seja, as cidades mais populosas estão mais propícias à maior intensidade de ilha de calor. Para CHRISTOFOLETTI (1999), o crescimento da população desencadeou o aumento da demanda de alimentos e combustíveis, e, conseqüentemente, a expansão de áreas agrícolas que, por sua vez, alteram a cobertura da superfície. A mudança do clima em áreas urbanizadas pode ser considerada, então, como “categoria de impactos antropogênicos”, e a ilha de calor uma consequência dentro desta categoria. Todavia, CHRISTOFOLETTI (1999) ressalta que a mudança de temperatura não pode ser apenas atribuída ao processo de uso da terra e da urbanização, uma vez que, também é possível encontrar essa mudança nos oceanos.

Estudos sobre a variação de temperatura entre o centro e seus arredores e o clima urbano, foram feitos para algumas cidades e/ou regiões brasileiras: LUCENA, (2012)

analisou a IC para a RMRJ; BRANDÃO (1996) falou sobre o clima urbano do Rio de Janeiro; MONTEIRO & MENDONÇA (2003) e LOMBARDO (1985) escreveram sobre IC na metrópole São Paulo; CACHO-LIMA & ANUNCIAÇÃO (2009) analisaram a IC na cidade de Campo Grande - Mato Grosso do Sul; LORENA (2013) analisou o campo térmico de Vitória- ES; TARIFA (1977) e ANDRADE *et al.*(2007) estudaram IC em São José dos Campos- SP). Trabalhos sobre IC para cidades médias e pequenas são mais raros. Boa parte dos estudos analisou a mudança no uso e cobertura do solo através da metodologia de sensoriamento remoto, série temporal de dados de estações meteorológicas, e modelagem numérica.

LORENA *et al.* (2013) analisaram o campo térmico da área urbana do município de Vitória, no estado do Espírito Santo. O efeito da ilha de calor foi detectado a partir da análise de imagens do satélite TM/Landsat 5, órbita de ponto 215/074, de 14/07/2011, e fotografias aéreas, juntamente com documentos criados por informações do Plano Diretor da cidade. Através do processamento das imagens em software de Sistema de Informação Geográfica (SIG), obtiveram mapas de uso e ocupação do solo e do campo termal, cruzando estas informações, para então analisarem o comportamento térmico para cada área de acordo com o uso predominante. Os resultados mostraram que a maior temperatura média do ar de Vitória ocorre na área classificada como “Industrial” com temperatura de 23,76°C. Enquanto a menor temperatura foi verificada na área classificada como “área verde”, com 20,21°C.

LUCENA (2012), estudou a ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro através da análise de séries temporais de estações meteorológicas (1951-2009), de imagens do Landsat 5 e 7 (1984-2010), e de modelagem atmosférica a partir do modelo de previsão numérica de tempo MM5. Todas as técnicas utilizadas reforçam, a partir de sua abrangência, que as áreas urbanas são mais quentes, e que as áreas ao redor também mostram ilhas de calor. Os resultados mostraram que as áreas urbanas da metrópole são mais quentes, demonstrando que a RMRJ é um espaço sensível à ocorrência de ilha de calor. O trabalho indica uma sistematização da classificação do uso do solo, e foram adotadas poucas classes de solo para a uma grande área de estudo.

ANDRADE *et al.* (2010), fizeram uma análise da formação do campo térmico na cidade de Irati, no Paraná. A partir do levantamento das características principais da cidade de Irati, e de 12 postos de coletas de temperatura, foi possível perceber as

diferentes realidades socioambientais na área de estudo, e, assim, identificar a influência da dinâmica urbana na variação do campo térmico. Os resultados identificaram a formação de ilhas de calor dentro da área de estudo. A área mais quente fica na região central da cidade, mas, ao mesmo tempo no período noturno, se torna uma área sem diferenciação com o seu entorno, apresentando valores de temperatura que induzem à formação de uma ilha de frescor. Por fim, os autores destacam que a estrutura urbana exerce influência na variação espacial da temperatura do ar, embora haja dúvidas quanto à gênese, pois os fatores físicos (relevo, vegetação e água) parecem influenciar de forma semelhante à estrutura urbana, na formação de ilha de calor.

ANDRADE *et al.* (2007), estudaram a formação de ilha de calor na cidade de São José dos Campos (SP), utilizando o canal infravermelho termal do Landsat 5 no dia 10/06/2006, e o aerotransportado HSS nos dias 30 e 31/05/2006, verificando também o comportamento diurno e noturno do fenômeno. Apoiados nas ideias de que a diminuição de áreas verdes, o aumento de áreas impermeáveis (asfalto), e as construções que dificultam a circulação do ar, vêm junto ao crescimento urbano, os autores identificaram que na área mais urbana da cidade as temperaturas são maiores (20 a 24°C) do que nas áreas onde havia predomínio de cobertura vegetal (pastagem, cultura, mata ou capoeira) e proximidades com corpos d'água (16 a 18°C). Os autores perceberam ainda que na área industrial da cidade ocorrem picos de temperatura, com amplitudes de até 4°C maior que a temperatura do sítio urbano em geral. Por último, observaram uma ilha de calor urbana em São José dos Campos com amplitude térmica de 6 a 8°C às 10hs da manhã. Algumas áreas da cidade com espaçamento entre os prédios dificultando a passagem de ar apresentaram amplitude térmica de 10°C.

SOUZA e FERREIRA (2012) usaram dados do TM e ETM+ para analisar o padrão espacial da temperatura de superfície terrestre (TST) da cidade de Goiânia (GO) para os anos de 2002 e 2011. Eles estimaram a TSC através da comparação entre a imagem termal produzida por meio da banda 6 do ETM+ e o produto MOD11A1, que apresentou boa correlação (r^2 de 0,70). Estes autores concluíram que a área urbanizada de Goiânia se apresentou potencialmente mais quente em 2011 do que em 2002.

A temática sobre ilha de calor tem sido abordada, principalmente, pelos dados de sensoriamento remoto na faixa do infravermelho. Isto pode ser visto através dos esforços da comunidade científica no desenvolvimento de sensores termais com

diferentes tipos de resoluções espaciais e espectrais (TM, ETM+ e ASTER) (CAMARGO *et al.*, 2006).

Para entender de forma mais detalhada a ilha de calor é importante compreender: as circunstâncias favoráveis à sua formação e quais são os seus efeitos.

2.1.2. Circunstâncias favoráveis à formação da ilha de calor

Segundo OKE (1982; 1987; OKE *et al.*, 1991), uma área da cidade com alta concentração de fontes de calor torna-se favorável à formação de uma ilha de calor. Com isso, o ponto da cidade que concentra materiais com características térmicas de alta condução de calor (edificações, asfalto, adensamento populacional, etc.) apresenta maiores contrastes térmicos quando comparados aos pontos da cidade com áreas vegetadas e menos habitada. Para Lombardo (1985), a ilha de calor pode ser atribuída aos seguintes fatores: efeitos da transformação de energia no interior da cidade, com formas específicas (estruturas verticais artificialmente criadas); cores e materiais de construção (condutibilidade); Redução do resfriamento causado pela diminuição da evaporação (poucas áreas verdes, transporte de água da chuva através de canalização); Produção de energia antropogênica através da emissão de calor pelas indústrias, trânsito e habitações.

Durante a noite a terra perde calor através da liberação de radiação infravermelha para a atmosfera e para o espaço, mas essa perda de calor pode ser compensada através da emissão de fontes como indústrias, veículos, e materiais de construção relativamente densos. Os centros urbanos apresentam uma taxa de evaporação mais baixa, salientando a diferença de temperatura em relação aos seus arredores.

A superfície dos centros urbanos pode propiciar a formação da IC através de construções pouco espaçadas que reduzem a perda de calor radiativo – principalmente no período noturno; os telhados das construções que diminuem a perda de calor convectivo da superfície e próximo à superfície. As propriedades térmicas da superfície apresentam uma superfície termal maior, contendo e suportando mais calor. A pavimentação dada às ruas dos centros urbanos e as edificações reduzem a evaporação, além de concentrarem mais calor sensível. O calor antropogênico, ou seja, o calor liberado através de veículos, construções, e atividades econômicas, também podem

ajudar na formação de IC, além disso, a poluição liberada por atividades humanas torna a atmosfera mais quente e propícia a emitir radiação em direção à superfície (VOOGT, 2003).

O aumento da velocidade do vento e a advecção fria podem diminuir a intensidade da IC, contrapondo-se ao seu transporte horizontal de calor (advecção quente) que pode reforçar a IC. Quando os ventos de escala sinótica estão fracos o aquecimento da área urbana fica maior em relação aos arredores. As nuvens e a umidade também colaboram no controle da magnitude da IC. As nuvens diminuem o resfriamento radiativo da superfície, ou seja, elas “impedem” que a radiação terrestre seja liberada para o espaço. A umidade quando está muito elevada diminui a intensidade da IC, enquanto que a umidade mais baixa favorece a intensidade da IC, pois permite maior radiação da superfície (VOOGT, 2003).

Um fator importante para compreendermos o padrão espacial e temporal da ilha de calor é a camada limite planetária (CLP). A CLP é a região da atmosfera, junto à superfície, diretamente influenciada por movimentos turbulentos decorrentes das trocas de momentum, calor e vapor d’água que ocorrem entre superfície terrestre e a atmosfera. A CLP corresponde a uma camada de 1 ou 2km a partir da superfície terrestre, onde os movimentos turbulentos ocorrem numa escala temporal de uma hora ou menos. A extensão vertical pode variar entre 300 e 1.500 m, durante o dia, e entre 100 e 300 m durante a noite. As forçantes que induzem estas trocas entre a atmosfera e a superfície são o atrito com a superfície, a evaporação, a transpiração, a transferência de calor, a emissão de poluentes e modificações no escoamento induzidos pela topografia. A CLP é importante devido à grande parte das atividades humanas originarem-se, ocorrerem e gerarem consequências dentro desta camada (BERNARDES, 2006). A ilha de calor ocorre dentro da CLP e conjuga as condições apresentadas na CLP. Há também, outras estratificações da atmosfera urbana, proposto por Oke (1981): Camada Intraurbana ou de dossel (CLD), e Camada Limite da Influência Urbana (CLU). A primeira (“*canyons* urbanos”) é produzida pelos processos em microescala localizados nas ruas, entre as edificações, e abaixo do nível dos telhados. A segunda consiste na camada que se estende acima do nível dos telhados, onde a rugosidade, proporcionada pela presença de prédios relativamente altos, provoca uma aerodinâmica particular. Os ventos são fracos, embora ocorra um aumento da turbulência e no arrasto produzido pela fricção do ar (LUCENA, 2012).

2.1.3. Efeito da ilha de calor

Para Pereira Filho (2000) há evidência do efeito da ilha de calor urbana e de mudanças rápidas na umidade do ar associadas à penetração da brisa marítima. Em seu trabalho sobre chuvas de verão e enchentes na grande São Paulo, Pereira Filho concluiu que seus resultados sugeriram que os efeitos de ilha de calor e da brisa marítima desempenham papel importante no desenvolvimento de células convectivas muito intensas na região metropolitana de São Paulo (RMSP). Com isso, as circulações horizontais e verticais mais intensas devidas à ilha de calor, combinadas à umidade marítima durante a tarde, podem explicar os altos índices de chuvas encontrados no evento de 5 de fevereiro de 1998 na RMSP.

Os efeitos da ilha de calor sobre o espaço urbano são, quase sempre, negativos. Um efeito bem perceptível é o desconforto térmico para ser humano, o que pode acarretar no aumento do consumo de energia através do uso de refrigeradores de ar e a elevação do nível de ozônio na troposfera (ROSENFELD et al., 1998). Mais grave ainda são pessoas debilitadas, como idosos e doentes, que podem vir a óbito devido ao calor (CHANGNON ET al., 1996).

2.2. Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é uma das mais bem sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoramento dos recursos terrestres em escala global. Esta ferramenta vem evoluindo desde sua criação, na década de 60 (juntamente com o desenvolvimento da área espacial), e contava com poucas bandas – hoje já são centenas de bandas, e a resolução espacial de muitas imagens já é maior que 1 metro, possibilitando suas aplicações nas áreas de levantamentos de recursos naturais e mapeamentos temáticos, monitoração ambiental, detecção de desastres naturais, etc. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi um dos precursores desta ferramenta no hemisfério sul, consolidando seu uso no Brasil (MENESES & ALMEIDA, 2012).

O sensoriamento remoto é o termo que se refere à obtenção de imagens à distância da superfície da Terra, através de aparelhos denominados de sensores remotos (RUDORFF, 2013). Para LIOU (2002) o sensoriamento remoto é uma tecnologia capaz

de obter imagens e verificar o campo térmico da superfície da Terra, através da captação e do registro da energia refletida pela superfície, sem que ocorra contato físico entre o sensor e a superfície terrestre. MENESES & ALMEIDA (2012) discursam como clássica a seguinte definição de sensoriamento remoto: “*Sensoriamento remoto é uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto.*” Contudo, esses autores destacam uma definição considerada “mais científica”, que seria: “*Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres*”.

Com uma vasta área de aplicação, o sensoriamento remoto vem sendo muito utilizado em estudos sobre o clima urbano, incluindo a avaliação de ilha de calor urbana a partir de bandas termais. O trabalho de RAO (1972) foi o pioneiro no assunto de IC utilizando sensores. Este autor mapeou a temperatura de superfície das cidades ao longo da costa do médio Atlântico a partir da banda termal (10.2-12.5 μm) do satélite TIROS 1 (Television IR Operational Satellite). Ainda na década de 70, CALRSON *et al.* (1977) e MATSON *et al.* (1978), usaram dados termais do sensor AVHRR para analisar ilha de calor. Os primeiros autores analisaram a TS diurna em Los Angeles e encontraram um gradiente maior nas áreas industriais e centrais em relação às áreas vegetadas. Da mesma forma, MATSON *et al.* (1978), também encontraram maiores temperaturas nas áreas industriais da região centro oeste dos EUA.

Outro trabalho clássico é o de ROTH *et al.* (1989) que também usaram dados da faixa termal do AVHRR para comparar os efeitos da ilha de calor urbana com índice de vegetação em diferentes cidades da costa oeste da América do Norte. Estes autores verificaram que as temperaturas da área industrial das cidades estavam mais elevadas em comparação às áreas vegetadas, e que durante a noite a diferença de temperatura diminuía entre essas duas áreas. WANG *et al.* (1990) estudaram ilha de calor na China a partir da década de 70, e encontraram um aumento de 0.1 K em cada década. OWEN *et al.* (1998) estudaram o impacto da urbanização nos arredores de State College (PA) através da análise da cobertura vegetal fracionada e umidade da superfície também pelo sensor AVHRR. O sensor AVHRR foi muito utilizado na análise de ilha de calor urbana até o final da década de 80, quando, a partir de então, o Landsat (TM) surgiu como nova ferramenta para o estudo em questão (LUCENA, 2012).

Nos últimos anos, estudos sobre ilha de calor urbana usando o sensoriamento remoto vêm sendo realizados para diferentes cidades do mundo: Shenzhen, na China (CHEN *et al.*, 2012); Casablanca, no Marrocos (RHINANE *et al.*, 2012); Madri, na Espanha (SOBRINO *et al.*, 2012); Xangai, na China (LI *et al.*, 2011); Bucareste, na Romênia (CHEVAL *et al.*, 2009); Arizona, nos EUA (BUYANTUYEV & WU, 2010). Uma tabela frequentemente utilizada para mostrar clássicas pesquisas sobre IC será exibida a seguir (**Tabela 2.1**).

Tabela 2.1: Estudos sobre clima urbano que utilizaram o sensoriamento remoto termal.

Autor (es)	Plataforma: sensor	Aplicação
Ballingand Brazel (1988)	NOAA: AVHRR	Relation between surface temperature patterns and land use and day-to-day Variability of spatial patterns.
Dousset (1989)	NOAA: AVHRR	Classificação multiespectral do uso do solo e sua relação com a temperatura
Henry et al (1989)	Satélite HCMM	Análise de ilha de calor urbana usando sensoriamento remoto observação de superfície e modelagem.
Carnahan e Larson (1990)	Landsat: TM	Diferença das taxas de aquecimento e resfriamento entre a zona rural e urbana
Caselles et al. (1991)	NOAA: AVHRR	Análise da ilha de calor com base em dados de superfície e satélite
Dousset (1991)	NOAA: AVHRR e SPOT	Classificação multiespectral do uso do solo e sua relação com a temperatura da superfície
Johnson et al. (1991)	Termômetro infravermelho (IRT)	Modelo de ilha de calor de superfície.
Eliasson (1992)	Aeronave AGEMA	Correlação entre a temperatura de superfície e o fator de visão do céu (Sky-view-factor)
Kim (1992)	Landsat TM	Modelo de balanço de energia para uma área urbana.
Stolland Brazel (1992)	Aeronave e termômetro infravermelho (IRT)	Avaliação detalhada das relações da temperatura de superfície e do ar para diferentes tipos de superfície urbana.
Gallo et al. (1993a, 1993b)	NOAA: AVHRR	Uso do NDVI para avaliar a ilha de calor urbana.
Lee (1993)	NOAA: AVHRR	Avaliação da ilha de calor a partir da temperatura de superfície e do ar para cidades coreanas.
Johnson et al. (1994)	Satélite: TOVS	Estimativa da temperatura do ar em zona rural através de dados de sondagem de satélites pela derivação das taxas de

		temperatura do ar urbano.
Quattrochi and Ridd (1994)	Aeronave com scanner multispectral no infravermelho termal (TIMS)	Resposta térmica diurna e noturna para diferentes superfícies urbanas
Shoshany et al. (1994)	Aeronave Scanner termal	Extração de temperatura da parte superior de telhado para a análise da ilha de calor urbana.
Aniello et al. (1995)	Landsat TM, MSS	Distribuição espacial de temperaturas de superfícies urbanas e das árvores.
Epperson et al. (1995)	NOAA: AVHRR, DMSP	Estimativa da temperatura do ar urbana utilizando dados de NDVI e luz noturna.
Gallo et al. (1995)	NOAA: AVHRR	Revisão dos procedimentos e prospecções futuras para avaliação por satélite dos efeitos urbanos na ilha de calor.
Gallo and Tarpley (1996)	NOAA: AVHRR	Uso do NDVI para avaliar ilha de calor urbana.
Iino and Hoyano (1996)	Aeronave com scanner multispectral(MSS)	Modelagem para o balance de energia urbana usando o sensoriamento remoto e o SIG.
Lougeay et al. (1996)	Landsat TM	Padrões de temperatura associados ao uso da terra e a alteração no uso da terra.
Nichol (1996)	Landsat TM	Padrão espacial da temperatura da superfície com relação à morfologia urbana.
Ben-Dor and Saaroni (1997)	Aeronave com scanner infravermelho termal (TirS)	A ilha de calor analisada a partir da temperatura do ar e da superfície.
Lo et al. (1997)	Aeronave ATLAS	Relação de dados termais para cobertura do solo e o NDVI
Voogt and Oke (1997)	Aeronave AGEMA	
Galloand Owen (1998)	NOAA: AVHRR, DSMP/ Landsat MSS	Identificação multispectral de áreas urbanas para estimativas de ilha de calor.
Nichol (1998)	Landsat TM	Incorporação das temperaturas de superfície da parede com o sensoriamento remoto para criar a representação tridimensional de temperaturas urbanas.
Owen et al. (1998)	NOAA: AVHRR	Utilização de dados termais e de NDVI, juntamente com o modelo SVAT para investigar interações climáticas associadas com a urbanização.
Voogt and Oke (1998)	Aeronave AGEMA	Anisotropia térmica de superfícies urbanas.
Carlson & Sanchez-Azofeifa (1999)	NOAA: AVHRR	Mudança microclimática associada com a urbanização.
Hafner and Kidder (1999)	NOAA: AVHRR	Padrão da ilha de calor urbana (UHI) e da ilha de calor da superfície urbana (SUHI) associada com a inércia térmica e a disponibilidade de umidade.

Hoyano et al. (1999)	Scanner termal em superfície	Cálculo de fluxo de calor sensível dos prédios.
Parlow (1999)	Landsat TM	Modelagem do balance de energia para áreas urbanas utilizando dados multispectrais.
Wald and Baleynaud (1999)	Landsat TM	Avaliação da qualidade do ar utilizando sensoriamento remoto termal.
Quattrochi et al. (2000)	Aeronave ATLAS	Uso do sensoriamento remoto termal em uma estrutura “SIG” para avaliar a ilha de calor urbana.
Soux et al., 2000	Tower/IRT	Uso de sensor tridimensional para modelar a superfície urbana
Voogt (2000)	Aeronave AGEMA	Representatividade da temperatura da superfície urbana para diferentes escalas.
Voogt and Grimmond (2000)	Ac: AGEMA	Modelagem do fluxo de calor sensível e avaliação da rugosidade térmica da superfície de uma área urbana usando o sensoriamento remoto termal e as observações em superfície.
Voogt and Soux (2000)	Tower/Thermal Scanner, termômetro de infravermelho (IRT)	Escala local de anisotropia termal urbana.
Lucena et al (2013)	Landsat 5/TM	Análise episódica da temperatura da superfície continental

Fonte: Adaptado de VOOGT & OKE (2003).

Weng & Quattrochi (2006) aplicaram técnicas de sensoriamento remoto em estudo concernente a parâmetros biofísicos de uma região, podendo prover uma excelente descrição dos parâmetros dos materiais utilizados em construções e a composição da camada urbana. Este artigo revisa as bibliografias que abordam este tema, como: Steininger, 1996; Nichol, 1996; Balling & Brazell, 1988; Gallo & Owen, 1998; Gallo et al, 1993; Kidder e Wu, 1997; Roth et al, 1989; Streutker, 2002; Voke e Oke, 2003; Lo et al, 1997; Byrne, 1979; Quattrochi et al, 2000; Camahan & Larson, 1990; Weng et al, 2004 etc. Como podem ser observados estes trabalhos constam na **Tabela 2.1** e formam um excelente acervo sobre este tema.

Voogt & Oke (2002) fizeram uma revisão do uso do sensoriamento remoto em seus estudos de clima urbano, ressaltando a formação de Ilhas de Calor, seus efeitos e progressos. Esses autores analisaram os dados da publicação de Roth *et al* (1989), que questionam algumas metodologias aplicadas ao sensoriamento remoto, e notaram um lento progresso nos estudos nessa temática. Foram ressaltados três pontos básicos para a

análise sobre as consequências da alteração do uso do solo: a radiação emitida pelas estruturas da superfície; os modelos de transferência radiativa entre as edificações, os modelos de balanço de energia que simula a anisotropia termal urbana e a ligação entre as temperaturas de superfície, o balanço de energia da superfície e a temperatura do ar no interior e acima da camada intraurbana; por fim, os autores levantam a ideia de executar estudos de observação para obterem validações mais significativas dos parâmetros de superfície, derivados do sensoriamento remoto.

Zhang *et al* (2010) usaram dados do Landsat TM e do Modis do período de 2003 a 2005 para analisara configuração espacial da ilha de calor urbana e suas amplitudes de temperaturas nas cidades americanas mais populosas. A área de estudo apresentava climas diferentes e layouts urbanos intensos, por isso, utilizaram os índices ISA (índice de área construída por pixel) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Os autores concluíram que o ISA é um bom indicador de TSC para diversos tipos de biomas, exceto para áreas desérticas, atingindo de 70% a 90% (pico) do total da variância na TSC, funcionando para áreas urbanas de pequeno, médio e grande porte. Eles constataram também que, na maioria dos biomas, o TSC é linearmente proporcional ao ISA.

STREUTKER (2003) analisou a evolução da temperatura de superfície em Houston, no Texas, e comparou dois locais de formação de Ilha de Calor durante 12 anos. Para gerar seus resultados, o autor usou dados do sensor AVHRR a bordo de satélites em órbita polar do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Foram analisadas 82 cenas do período noturno tiradas entre os anos de 1985 e 1987 e 125 cenas noturnas tiradas entre 1999 e 2001. As observações revelaram que houve uma correlação entre o crescimento populacional identificado no Texas com o aumento da Ilha de Calor Urbana local e alteração de sua assinatura. Além do aumento da temperatura (em torno de 0,82K), houve também a extensão da área de Ilha de Calor, podendo ser identificado através de métodos de determinação de área - o método Gaussiano.

No Brasil, o sensoriamento remoto tem sido muito utilizado como ferramenta de análise da IC, como os trabalhos citados no **item 2.1. Ilha de calor**. Também é possível encontrar muitos estudos concernentes a outros temas ambientais utilizando o sensoriamento remoto: RICCOMINI & CRÓSTA (1988) fazem uma análise preliminar

de lineamentos em imagens de sensores remotos aplicada à prospecção mineral na área dos granitóides Mandira, SP; MADRUCCI *et al.* (2005) fazem uma análise integrada sobre geologia e geofísica no aquífero Guarani; MASCARENHAS *et al.* (2008) analisaram a cobertura vegetal remanescente na bacia hidrográfica do rio Araguaia; CASTRO & CARVALHO (2009) fizeram uma análise geomorfológica na bacia hidrográfica do rio Turvo, GO; MARTINS (2012) analisou parâmetros hidrológicos em macrodrenagem urbana; etc.

2.3. Impactos causados por indústrias

De forma geral, o objetivo das indústrias é gerar quantidades maiores de produtos, e maximizar o lucro. Com o crescimento das populações urbanas e o consumo cada vez mais estimulado, as indústrias cresceram em número, áreas de atuação e variedade de produtos, tanto nas cidades grandes quanto nas médias (LEAL *et al.*, 2008). Juntamente a este crescimento vieram os impactos que marcaram o meio ambiente, onde, na maioria das vezes, causam transtornos para a própria população. Os complexos industriais podem proporcionar impactos positivos e negativos ao local onde são implantados e seus arredores. A geração de empregos, a fabricação de produtos para atender certas necessidades da população, e o desenvolvimento econômico, podem ser vistos como pontos positivos de uma indústria. Em contrapartida, há os impactos negativos, que, muitas vezes ocorrem no meio ambiente: poluição de resíduos tóxicos, derramamento de óleo, poluição de sistemas aquáticos e terrestres, poluição atmosférica.

O Brasil passou por um rápido processo de industrialização, ocorrido após a 2ª guerra mundial, e, concomitantemente, em um momento em que houve um acelerado crescimento da área urbana. Entre as décadas de 50 e 90, a parcela da população brasileira que vivia em cidades cresceu de 36% para 75% (LEAL *et al.*, 2008). Com toda essa “re/evolução” urbana, vieram os desequilíbrios ambientais.

Atualmente a produção industrial brasileira é diversificada, produzindo desde produtos primários (indústria de base), como o petróleo, a produtos tecnológicos, como automóveis. Embora hajam impactos causados por diferentes tipos de indústria, a

indústria petrolífera terá destaque neste estudo, pois faz parte dos objetivos deste estudo analisar os impactos de sua implantação no campo termal local.

A descoberta do petróleo ocorreu no período em que os países europeus, envolvidos na Revolução Industrial, percebem a necessidade de trocar sua matriz energética – até então, o carvão mineral. O primeiro poço de petróleo do mundo foi encontrado na Pensilvânia, nos Estados Unidos da América, por volta de 1859, e em 1869, já haviam construído o primeiro oleoduto de ferro na Pensilvânia (WEBER, 2005). O petróleo passou a ser uma das principais fontes de energia utilizadas na sociedade, e além de ser importante como fornecedor de energia, os seus derivados são utilizados como matéria-prima para a manufatura de inúmeros bens de consumo (MARIANO, 2001).

No Brasil, o primeiro poço de petróleo foi encontrado na Bahia em 1939, quando no mesmo período foi criado pelo governo de Vargas o Conselho Nacional do Petróleo (CNP). Em 1953, ainda no governo de Getúlio Vargas, foi promulgada a Lei nº 2.004, instituindo a Petrobras (Petróleo Brasileiro), maior empresa de extração de petróleo do país, e uma das maiores do mundo (WEBER, 2005).

A partir desse momento, a indústria petrolífera ganhou força no país, sendo instalada em muitas cidades e estados, como São Paulo (Bacia de Santos), Bahia (Bacia do Jequitinhonha), Rio de Janeiro (Bacia de Campos), Espírito Santo (Bacia do Espírito Santo), Sergipe (Bacia de Sergipe e Alagoas).

Do mesmo modo que a expansão da indústria petrolífera ocorreu pelo país, os impactos também se expandiram e tornaram-se visíveis. Dentre os inúmeros tipos de impactos negativos, tem-se: a contaminação hídrica devido ao lançamento de efluentes; emissões de material particulado para atmosfera; emissões gasosas de óxido de enxofre e nitrogênio; alteração do trânsito local decorrente da circulação de caminhões de transporte de carga (MARIANO, 2001). Alguns estudos sobre os impactos (ambientais, urbanos, econômicos e sociais) na região norte fluminense do estado do Rio de Janeiro, sobretudo com foco em Macaé, foram publicados nos últimos anos (PIQUET, 2010; DIAS, 2005; BARBOSA, 2002; FERREIRA *et al.*, 2010)

MARIANO (2001) fez uma análise sobre os impactos ambientais negativos causados por refinarias de petróleo, e discutiu as principais medidas atenuantes destes

impactos. Esta análise foi embasada em extensa bibliografia específica da área. Mariano baseou-se na apresentação de impactos ambientais para indústria química proposta pelo Banco do Nordeste (1999), onde os principais impactos são: Contaminação hídrica devido ao lançamento de efluentes, águas de lavagem, águas de resfriamento e lixiviação das áreas de depósitos de materiais ou rejeitos; Emissões material particulado para a atmosfera, provenientes de todas as operações da planta; Emissões gasosas de óxidos de enxofre e nitrogênio, amoníaco, névoas ácidas e compostos de flúor; Contaminação do solo e/ou de águas superficiais ou subterrâneas pela disposição inadequada de resíduos sólidos resultantes dos processos da indústria química, nos quais se incluem também os lodos de tratamento de efluentes hídricos e gasosos e partículas sólidas dos coletores de poeira; poluição sonora causada pelo uso de equipamentos; alteração no trânsito local. O autor afirmou que uma boa gestão operacional das plantas de refinarias de petróleo, é suficiente para reduzir os níveis de poluição emitidos pelas refinarias, bem como a redução nos custos de energia, água e matéria prima. Outro aspecto que o autor considerou é o controle interno, importante na recuperação de substâncias não reagentes (que podem ser recicladas); a recuperação de subprodutos dos processos, que podem ter alguma utilidade na própria planta; a recirculação das águas e a redução de vazamentos e respingos.

PIQUET (2010) discutiu a importância da implantação do setor de petróleo e gás na região norte fluminense do Rio de Janeiro, apontando a importância do município de Macaé, onde se concentram tais atividades. PIQUET (2010) afirma que Macaé era um pequeno município do estado do RJ, de base agropecuária, e que depois da implantação da Petrobras (1970), a chegada de centenas de trabalhadores e suas famílias, assim como a implantação de novas vias e serviços, acarretaram uma ocupação urbana desordenada e uma sobrecarga nos parques equipamentos de consumo coletivo existentes. Iniciando então, uma ocupação predatória das empresas ligadas ao petróleo e dos novos loteamentos para moradias. O autor conclui que a região norte fluminense mudou positivamente em relação ao aumento do PIB, na morfologia do tecido empresarial, na oferta de trabalhos, na demografia (chegada de profissionais qualificados), e destacou o aumento dos orçamentos municipais. Entretanto, PIQUET (2010) ressalta que a extração de um recurso natural caminha, em algum momento, um declínio, o que poderia causar grandes transtornos para os municípios dependentes, principalmente de verbas, do setor de petróleo e gás na região norte fluminense.

RIZWAN *et al.*(2007)ressaltou que o processo de urbanização e industrialização acarreta diversos problemas para a sociedade, tais como: como aquecimento global, poluição do ar e descartes industriais, uso inapropriado do solo, demanda de energia para o bem-estar social, e construções prediais que utilizam materiais que estocam calor na forma de calor sensível. Essas alterações no espaço urbano podem resultar em consequências climáticas, como ilha de calor urbano.

Muitos trabalhos publicados, citados acima, analisam os impactos de indústrias, relacionando-os ao meio ambiente e suas interações na dinâmica econômico-social. Da mesma forma, as bibliografias citadas sobre a variação de temperatura, visam contemplar os efeitos da urbanização de cidades grandes e médias. Neste contexto, este trabalho propõe-se em analisar as transformações espaciais causadas pela indústria do petróleo no município de Macaé (RJ), de modo que ratifique uma variação no campo termal deste município.

CAPÍTULO 3 – Área de estudo

O município de Macaé (**Figura 3.1**) está localizado na mesorregião norte fluminense do estado do Rio de Janeiro, e abrange uma área de 1.216,846 km², tendo limites com os seguintes municípios: Carapebus e Conceição de Macabu, ao norte, Rio das Ostras à sudoeste, Casimiro de Abreu ao sul, Trajano de Moraes e Nova Friburgo à oeste. Esta região de paisagem heterogênea conjuga aspectos oceânicos, serranos, e uma das poucas áreas de mata Atlântica preservada. A sede municipal está localizada na porção sudeste do município entre as coordenadas 22°22'15" S e 41°47'13" O (MARQUES, 2008).Macaé está dividida em cinco distritos: sede, Cachoeiros de Macaé, Córrego do Ouro, Glicério e Sana. A sede está subdividida em cinco subdistrito: Imboassica, Centro, Barra de Macaé, Cabiúnas e Aeroporto.

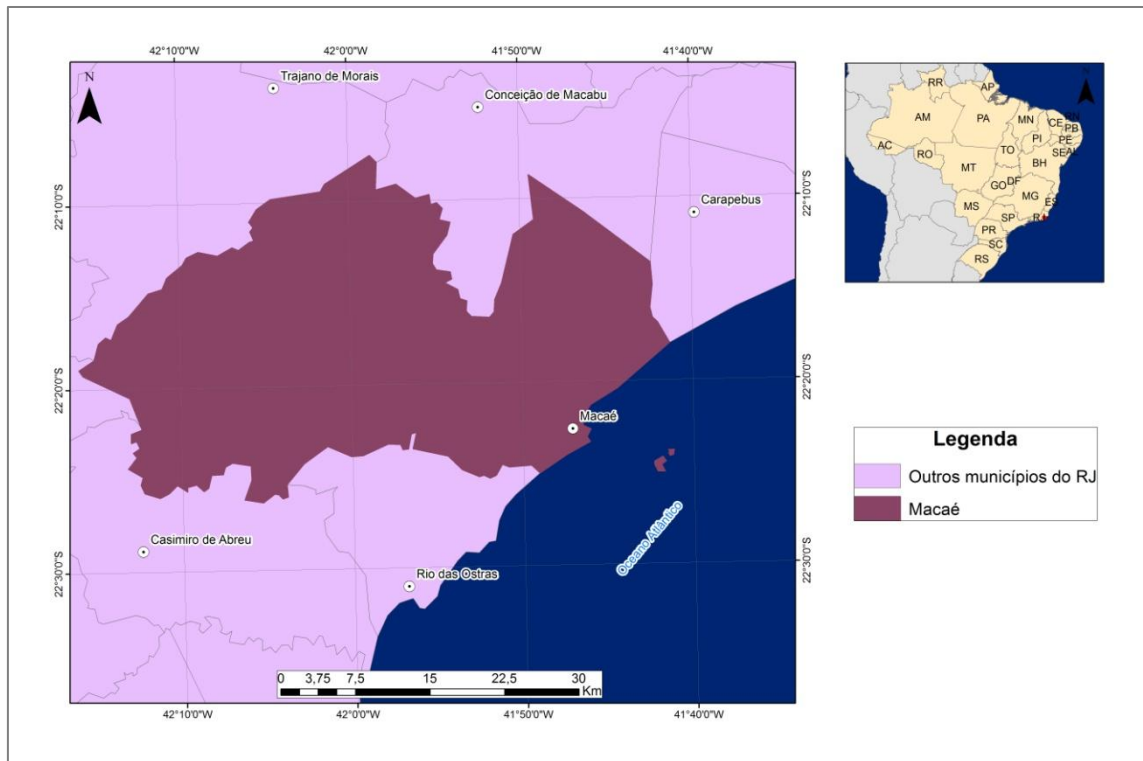


Figura 3.1: Localização do município de Macaé.

A área que será analisada nesse estudo não compreende todo limite municipal de Macaé, mas sim a área mais urbanizada e seus arredores próximos. O critério de escolha do recorte da área está relacionado com a interpretação das imagens de satélites que mostram a área mais urbanizada e central de Macaé e seus arredores próximos menos urbanizados/não urbanizados. A **Figura 3.2** mostra o recorte da área escolhida para o presente trabalho.

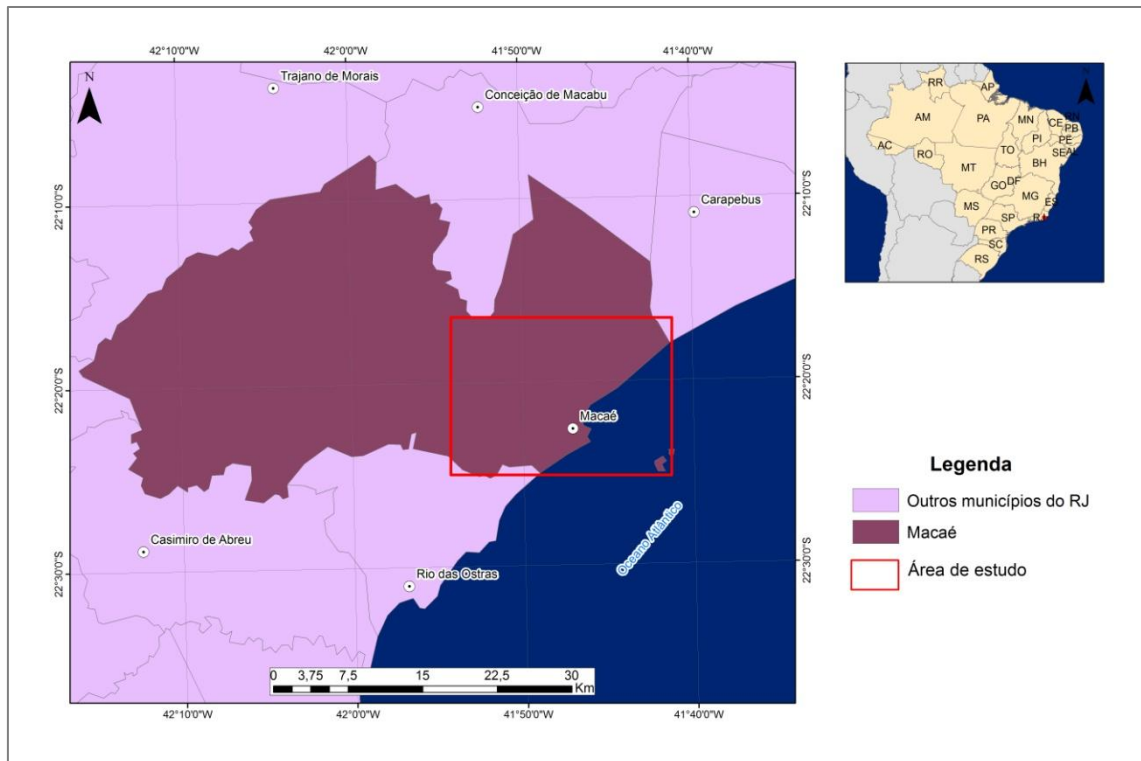


Figura 3.2: Recorte da área de estudos. Fonte: Base de dados cartográficos, IBGE.

3.1. Aspectos socioeconômicos

O município de Macaé era essencialmente agrícola até meados do século XX, devido ao cultivo de cana-de-açúcar, café e pesca. A partir de 1974, com a descoberta do petróleo na Bacia de Campos, e a implantação da Petrobrás na cidade, Macaé tomou uma nova forma, principalmente no âmbito econômico e social (MARQUES, 2008). O crescimento populacional acelerado veio atrelado à expansão da rede urbana de serviços, infraestrutura, e novos usos do solo. De acordo com dados do IBGE (2013), a população de Macaé passou de 74.000 habitantes em 1974 para 206.728 mil em 2010, e 229.624 habitantes estimados em 2014 (**Figura 3.3**). A população urbana contabilizada pelo censo 2010 (IBGE, 2013) é de 202.873 habitantes, correspondendo a 98% do total da população macaense, enquanto a população rural é de 3.875 habitantes (1,9%). Na **Figura 3.4** pode ser visualizada a evolução da população urbana e rural de Macaé entre as décadas de 60 e 2010, onde pode ser destacado o declínio acentuado da população rural e o predomínio da urbana. A densidade demográfica também teve um aumento significativo, passando de 26,28 habitantes/Km² em 1960 para 169,9 habitantes/Km² em 2010 (**Figura 3.5**).

A população aumentou conjugada à expansão das áreas de loteamento para moradias, e a mão-de-obra foi absorvida, principalmente, pelo setor de petróleo e gás. O número de trabalhadores com empregos formais alcançou a taxa de 87% em 2007 só no setor de extração mineral (extração de petróleo e gás, e atividades de apoio à extração) (PIQUET, 2010). Para Carvalho *et al.*, (2010), após a chegada da Petrobrás (1977), ocorreu um intenso crescimento, não só populacional e econômico, mas na própria área urbana da cidade de Macaé.

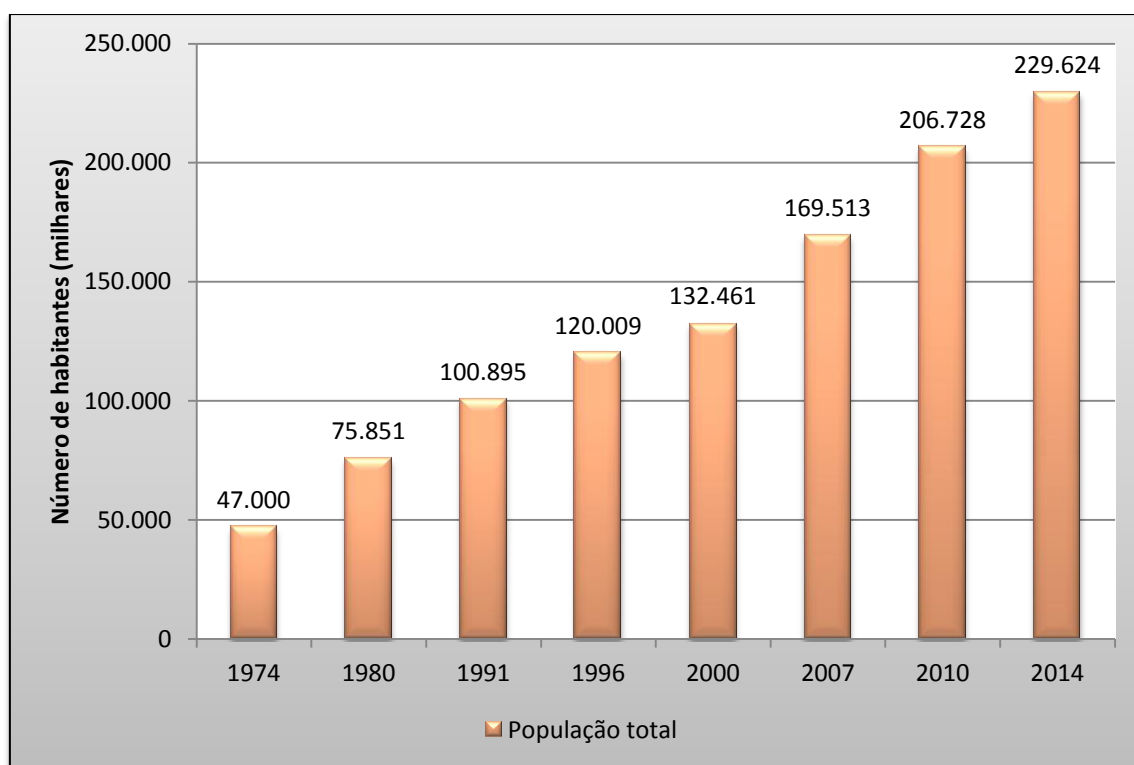


Figura 3.3: Número de habitantes em Macaé (RJ) no período de 1974 a 2014. Fonte: IBGE, Censo, 2010.

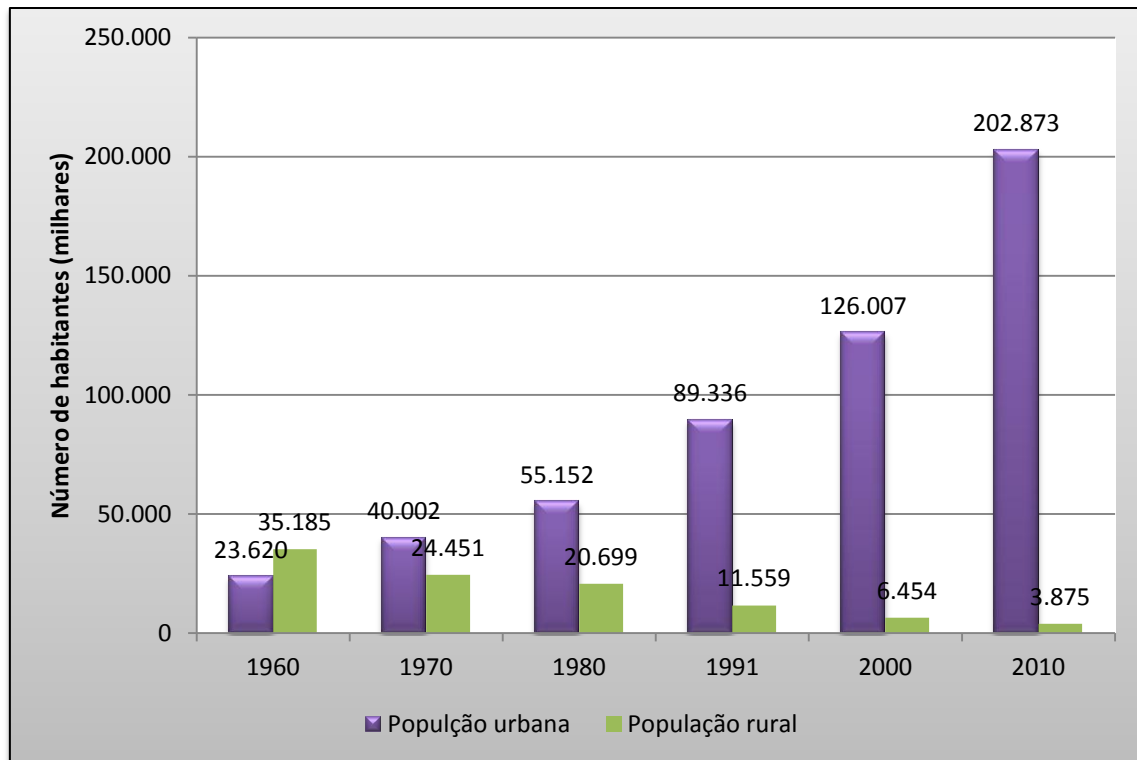


Figura 3.4: Evolução da população urbana e rural de Macaé entre 1960 e 2010. Fonte: IBGE, Censo 2010.

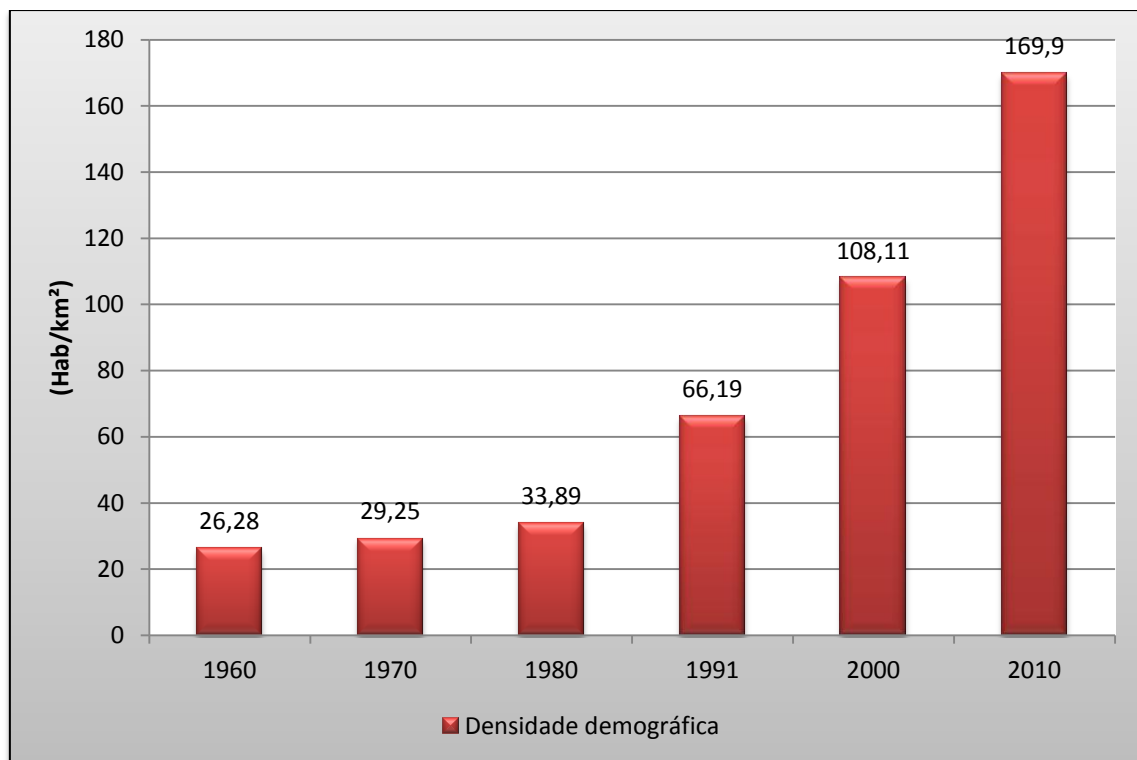


Figura 3.5: Evolução da densidade populacional de Macaé entre 1960 e 2010. Fonte: IBGE, Censo 2010.

3.2. Aspectos físicos

Os aspectos físicos de Macaé são marcados por características heterogêneas com relação ao relevo e vegetação. Macaé abrange áreas de planícies fluviais e marinhas na porção mais próxima ao oceano, e áreas de declividade mais acentuada representada por colinas, serras isoladas, e serras escapadas. Há uma faixa de 40 km de praias, contraposta a uma região serrana com presença de rios e cachoeiras. A altitude aumenta da faixa litorânea aos contrafortes da serra do Mar, onde estão situados os distritos do Sana, Glicério e Cachoeiros de Macaé. Os pontos mais altos são os Picos de Peito de Pombo (1.400m) e o Pico do Frade (1.750m) (MARQUES, 2008).

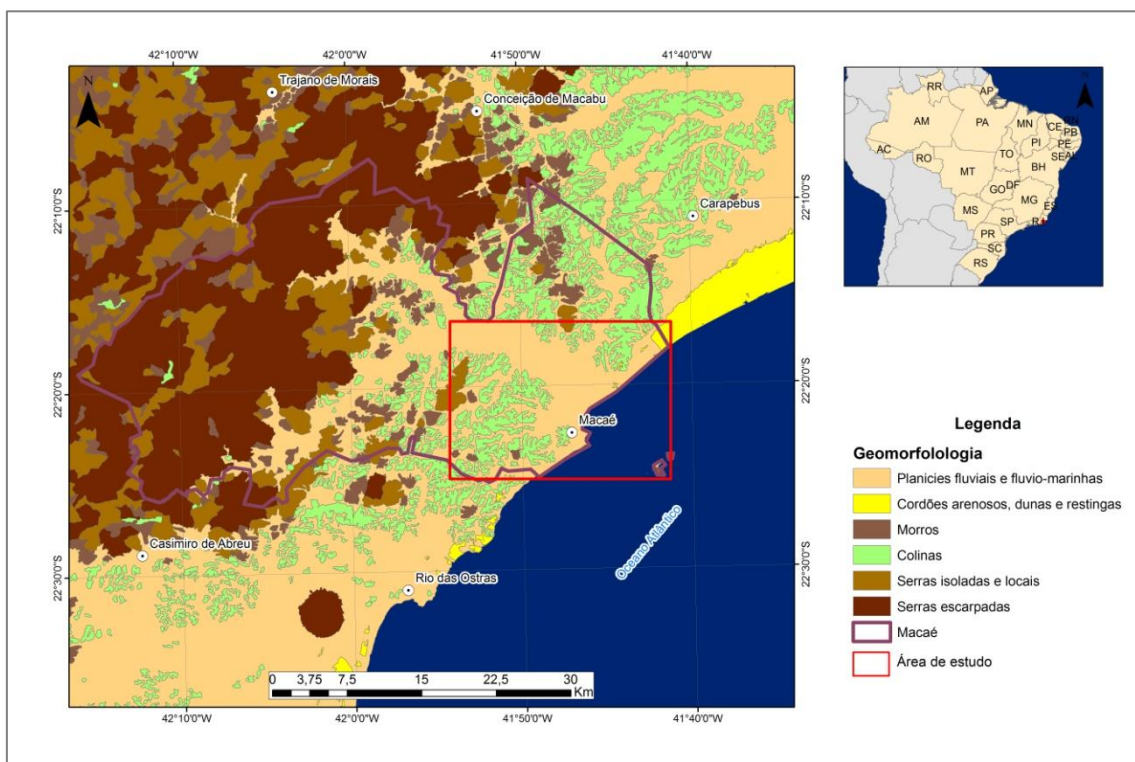


Figura 3.6: Relevo da região de Macaé. Fonte: Base de dados do INEA, 2015.

A vegetação é representada por restingas, manguezais, campos, e florestas. Na região de serras, há predomínio de floresta ombrófila densa, e ainda resquícios de Mata Atlântica. Nas áreas mais planas encontram-se arbustos, e mata rasteira típica de restinga. A vegetação original da região foi muito alterada, sobretudo na época de colonização da região, onde as áreas planas eram reservadas ao cultivo de cana de

açúcar, e mais tarde para criação de gado. Atualmente, a cobertura vegetal vem sendo suprimida pelas ações antrópicas (MARQUES, 2008).

A região de Macaé apresenta basicamente quatro unidades morfológicas: Serra do Mar (borda oriental), Maciços e Colinas Costeiros, Planícies Sedimentares Quaternárias e os Tabuleiros Costeiros Terciários. A Serra do Mar está localizada na parte oeste do município, sendo constituída de rochas cristalinas, com altitudes superiores a 800 metros, recebendo o nome local de Serra de Macaé. Os maciços costeiros são constituídos de terrenos cristalinos, assim com colinas, embora sejam menos extensos, e ficam localizados entre as colinas e as planícies. As colinas possuem altitudes mais modestas e uma fisionomia ondulada, estendendo-se até a costa, formando falésias (VEIGA, 2002). As planícies sedimentares do quaternário apresentam duas grandes áreas: a primeira área é de acumulação marinha, formando as restingas, de Macaé até Campos; a segunda área é de acumulação fluvial, localizada na bacia do rio Macaé. Os tabuleiros costeiros terciários são de formação argilo-arenosa, localizados entre as planícies e as colinas, em altitudes em torno de 30 metros. Estes tabuleiros limitam-se ao norte com baixios do rio Macabu e da Lagoa Feia, e ao sul com os feixes de restinga que caracterizam a maior parte do litoral do município (VEIGA, 2002).

Os solos predominantes no município de Macaé enquadram-se em cinco grupos: latossolos, podzólicos, hidromórficos, aluviais e cambisolos. Os latossolos são encontrados nas colinas e nos maciços costeiros, com suas características básicas de pequena fertilidade natural e grande susceptibilidade ao intemperismo. Os podzólicos (amarelo e vermelho-amarelo) são encontrados nos tabuleiros terciários. Os hidromórficos estão presentes na faixa do litoral e no curso do rio Macaé. Os solos aluviais estão localizados nas planícies fluviais, onde há constante renovação dos nutrientes trazidos pelos rios, determinando assim sua grande fertilidade natural (MARQUES, 2008).

O clima da região de Macaé recebe influência da proximidade com o oceano, bem como da presença da serra do Mar, com características típicas de regime tropical quente. De acordo com VEIGA (2002) Macaé apresenta dois domínios climáticos. O primeiro domínio está na região mais baixa, em cotas próximas ao nível do mar, apresentando precipitações entorno de 1.200mm/ano, com os maiores índices pluviométricos no período de verão, e estiagem no inverno. A umidade relativa do ar fica elevada na maior parte do ano, devido à umidade vinda do oceano. Neste domínio,

as temperaturas ficam entorno de 23°C ao longo do ano. O segundo domínio climático está na serra do Mar, onde a altitude influencia em temperaturas mais baixas, chegando a registrar menos de 18°C no inverno, e precipitação média de 2.500 mm/ano. O Anticiclone Subtropical do Atlântico do Sul (ASAS), e as massas de ar frias e quentes que avançam sobre a região influenciam o clima anual. O ASAS atua, sobretudo, no inverno, diminuindo a formação de nuvens e chuvas. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atua entre os meses de outubro e março, deixando a região instável, e com muita umidade. Estas condições favorecem as chuvas intensas, de curta duração, no período de verão (VEIGA (2002).

A hidrografia da região é marcada pela bacia hidrográfica do rio Macaé. Esta bacia drena uma área de 1.765 km², abrangendo quase todo limite do município de Macaé, parte do município de Nova Friburgo, Casimiro de Abreu, Rio das Ostras, Carapebus e Conceição de Macabu. O principal rio desta bacia é o Macaé, que nasce a 1.560 metros de altitude, próximo ao Pico do Tinguá dentro da APA Macaé de Cima, em Nova Friburgo. A região do alto curso da bacia do Rio Macaé caracteriza-se por apresentar o relevo acidentado pertencente à Serra do Mar e grande biodiversidade em remanescentes de Mata Atlântica. O rio Macaé percorre cerca de 136 km da nascente até chegar a sua foz, no oceano Atlântico. A vazão média do rio Macaé próximo à sua foz é 30 m³/s. Os principais afluentes desta bacia são: pela margem direita, os rios Bonito, Purgatório, Pedrinhas, Teimoso, Três Pontes e os córregos Abacaxi, Carão, Roça Velha e Belarmino; e pela margem esquerda, os rios Sana, Atalaia, São Domingos, Santa Bárbara, Ouro Macaé, São Pedro e Jurumirim, e os córregos Sabiá, Genipapo e Guanandirana. Próximo à foz, o rio Macaé apresenta extensas áreas de manguezais que enfrentam graves problemas de degradação devido, principalmente, aos aterros para construções de casas (MARQUES, 2008).

CAPÍTULO 4 – Materiais e métodos

Para análise temporoespacial da TSC em Macaé e da sua relação com o crescimento urbano da região devido à implantação da indústria petrolífera, foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 5. Esta análise foi feita por meio da leitura de valores de TSC, NDVI, IBI, e da classificação de uso e cobertura do solo. Nos itens a seguir estão detalhadas as metodologias que fundamentaram esta pesquisa.

4.1. Materiais

4.1.1. Dados de sensoriamento remoto

Para cumprir o objetivo desse estudo foram utilizadas imagens dos sensores *Thematic Mapper* (TM), presente no satélite Landsat 5. O Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) apresenta relevante série temporal e espacial de imagens, constituindo-se como um dos principais bancos de dados de imagens do mundo, tendo suas imagens disponibilizadas no sítio eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O Landsat é um programa desenvolvido pela *U.S. Geological Survey* (USGS) em parceria com a *National Aeronautics e Space Administration* (NASA), com objetivo de adquirir informações espaciais, espectrais e temporais dos recursos terrestres (ROSA, 2007). A série Landsat é composta por oito satélites dos quais estão em operação o Landsat-7 e o Landsat-8, lançado em fevereiro de 2013. As plataformas são: Landsat-1 (1972), Landsat-2 (1975), Landsat-3 (1978), Landsat-4 (1982), Landsat-5 (1984), Landsat-6 (1993), Landsat-7 (1999), Landsat-8 (2013). A **Tabela 4.1** apresenta os sensores a bordo destas plataformas. Diferentes sensores tem operado nestas plataformas: o *Multispectral Scanner System* (MSS de 1 ao 5), o *Retum Beam Vidicom* (RBV 1,2,3), o TM (4 e 5) e o ETM+, e no Landsat 8 os sensores OLI (*Operational Land Imagen*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). A sensibilidade radiométrica das bandas em consonância com as características de resolução espectral e espacial configura-se como a principal diferença entre esses sistemas de sensores.

Tabela 4.1: Principais informações sobre os satélites Landsat (Landsat 1 ao Landsat 8)

Satélite	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 6	Landsat 7	Landsat 8
Lançamento	27/07/1972	22/01/1975	05/03/1978	16/07/1982	01/03/1984	05/10/1993	15/04/1999	11/02/2013
Situação atual	Inativo	Inativo	Inativo	Inativo	Inativo	Inativo	Ativo	Ativo
Órbita	Polar, heliossíncrona							
Altitude	917 km	917 km	917 km	705 km	705 km	s. d.	705 km	705 km
Inclinação	99°	99°	99°	98,20°	98,20°	s. d.	98,30°	98,2°
Tempo de duração de órbita	103,27 min	103,27 min	103,27 min	98,20 min	98,20 min	s. d.	98,9 min	98,9 min
Horário de passagem	9:15 a.m.	9:15 a.m.	9:15 a.m.	9:45 a.m.	9:45 a.m.	s. d.	10:00 a.m.	10:00 a.m.
Período de revisita	18 dias	18 dias	18 dias	16 dias	16 dias	s. d.	16 dias	16 dias
Instrumentos sensores	RBV e MSS	RBV e MSS	RBV e MSS	MSS e TM	MSS e TM	ETM	ETM+	OLI e TIRS

Fonte: CEPSRM, 2015.

O sensor TM, assim como o ETM+ apresenta a banda 6, dentro da janela atmosférica (faixa entre 8 e 14 μm , praticamente transparente à liberação de onda longa para o espaço pela superfície terrestre) , sendo assim, a região do infravermelho termal é adequada para o mapeamento da temperatura dos objetos presentes na imagem, e fundamental para estudos de ilha de calor. A série temporal da plataforma Landsat é relativamente longa, onde é possível encontrar imagens a partir de 1984 para a região de Macaé, além de sua resolução espacial no canal termal (120 m) ser considerada muito boa em relação a outros satélites. Existem outras plataformas que possuem banda termal, como o TERRA e AQUA, que atuam com o sensor MODIS, mas suas séries temporais não são tão longas e a resolução espacial, deste setor, é baixa (entre 250 e 1000 m). Porém, o Landsat apresenta uma desvantagem em não ter bandas na região de microondas, o que torna necessário realizar o mascaramento de nuvens, pois as bandas/canais mostram o espectro em sua reflexão total na nuvem. A **Tabela 4.2** apresenta o comprimento de onda de cada canal/banda do Landsat5.

Tabela 4.2: Características espectrais do sensor TM

Bandas	Banda espectral (μm)
Landsat 5	
B1	0,452-0,518
B2	0,528-0,609
B3	0,626-0,693
B4	0,776-0,904
B5	1,567-1,784
B6	10,45-12,42
B7	2,097-2,349

Fonte: Chander *et al*, 2009.

Para analisar a TSC no tempo e no espaço do município de Macaé, foram utilizados dados provenientes da banda 6¹ do Landsat 5, visto que o mesmo fornecia a série temporal mais completa para o período desejado, quando comparado a outros satélites. Neste estudo, utilizaram-se imagens processadas e distribuídas pela Divisão de Imagens do INPE, o DGI, O DGI disponibiliza 376 imagens para a órbita e o ponto de interesse, porém, a maioria das imagens apresentam baixa qualidade, principalmente com relação à cobertura de nuvens, e, sendo assim, foram selecionadas apenas 6 imagens entre o período de 1985 a 2010 (**Tabela 4.3**), da órbita-ponto 216/75 no período diurno². As imagens escolhidas obedeceram aos seguintes critérios: ausência de nuvens (ou pouca presença), e qualidade radiométrica. Uma das maiores dificuldades de selecionar as imagens foi com relação à presença de nuvens, pois, para muitas datas antes propostas, a presença de nuvens ultrapassava 20%, especialmente na porção continental das imagens. Com isso, priorizaram-se as imagens com menos de 20% de cobertura de nuvens. Com relação à qualidade radiométrica, isto é, a presença de ruídos que podem impedir o processamento da imagem, foi realizada uma seleção com base no critério visual e também na análise dos valores físicos não realísticos.

Na **Figura 4.2**, a seguir, é representada a cena do satélite Landsat 5, onde está inserida a área de estudo.

¹Foi necessário fazer um processo chamado de reamostragem para a banda 6 antes da classificação da imagem.

² Todas as imagens foram registradas entre 12h: 15 min e 12h:35min.

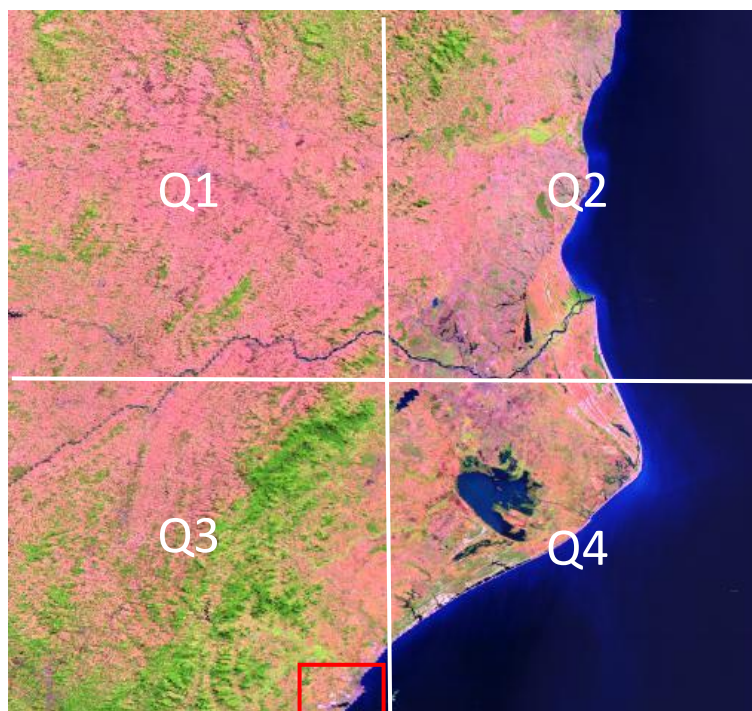


Figura 4.2: Imagem Landsat-5 da órbita/ponto 216/75, referente ao dia 4-09-2010, onde está localizado o município de Macaé, região destacada em vermelho. Note que, para todos os quadrantes, a cobertura de nuvens é de 0%. Fonte: DGI-INPE

Tabela 4.3: Relação de imagens Landsat 5 utilizadas nesse trabalho

23/03/1985	09/01/2005	23/03/2010
30/07/1991	04/07/2005	04/09/2010

Obs.: As imagens indicadas em azul são referentes ao período do “seco” (inverno), e em vermelho, as imagens do período “úmido” (verão).

4.2. Métodos

4.2.1. Seleção e processamento das imagens

Foi obtida uma imagem para cada década, de 1980 aos anos de 2010. Como não foram encontradas suficientes imagens para observar um padrão de comportamento,

principalmente para a análise de TSC, as imagens serão consideradas como episódios que possam representar minimamente as últimas décadas. As imagens obtidas para o presente estudo foram das seguintes datas: 23/03/1985, 30/07/1991, 09/01/2005, 23/03/2010, que serão consideradas dos anos 80, 90, 2000 e 2010, respectivamente. Para a análise sazonal, que será feita somente para a TSC, foram obtidas imagens do dia 04/07/2005 e 04/09/2010.

Foram gerados 6 mapas para a análise da TSC, 4 mapas de uso e cobertura do solo, 4 mapas para NDVI, e 4 mapas para o IBI. Além de mais 4 mapas com a análise integrada da TSC e do uso e cobertura do solo.

Depois de selecionar as imagens com menor cobertura de nuvens e melhor qualidade radiométrica, as imagens foram georreferenciadas, recortadas, e reamostradas no *software* ENVI e tiveram como base uma composição em RGB do Landsat 5 (23/9/1988). O georreferenciamento levou em consideração 10 pontos, que foram selecionados na base e reproduzidos nas imagens desejadas, com um erro geral menor que 0,3. O recorte da imagem (**Figura 3.2** apresentada no capítulo 3) foi realizado na área desejada para a análise deste trabalho – área que englobasse a região urbanizada de Macaé e seus arredores não urbanizados. Posteriormente, o mesmo recorte foi usado como base para recortar as demais imagens utilizadas no presente estudo. O processo de reamostragem levou em consideração a quantidade de linhas e colunas de ambas as bandas (com resolução espacial de 30 m e de 120 m), e foi feito da seguinte forma:

$$Y_{\text{fac}} = l_{30}/l_{120} \quad (4.1)$$

$$X_{\text{fac}} = c_{30}/c_{120} \quad (4.2)$$

Onde: Y_{fac} é o fator de correção das imagens; l é o nº de linhas; c é o nº de colunas;

Após o georreferenciamento, recorte e reamostragem, foram gerados arquivos denominados “gribs” em formato “geotiff” que serviram para a elaboração de mapas de uso do solo, de TSC, NDVI, e IBI. O *MATLAB* foi utilizado para converter os valores digitais (ND) em radiância, reflectância, temperatura de brilho, e fazer mascaramentos de nuvens e oceano. Para realizar essa transformação foi necessário aplicar a equação e

constantes de calibração, assim como realizado nos trabalhos de LUCENA (2012), CHANDER e MARKHAM (2003) e CHANDER *et al.* (2009).

Para saber o valor da energia radiante que chega ao sensor, é necessário converter o ND através da seguinte equação:

$$L_i = \left(\frac{LMAX_i - LMIN_i}{Qcal_{max}} \right) Qcal + LMIN_i \quad (4.3)$$

Onde L_i é a radiância espectral no canal i em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$;

$LMAX_i$ é o valor de radiância máxima na banda i em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$;

$LMIN_i$ é o valor de radiância mínima na banda i em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$;

$Qcal$ é o valor do número digital (ND);

$Qcal_{max}$ é o valor máximo do ND.

As constantes de calibração são dadas na **Tabela 4.4** a seguir.

Tabela 4.4: Constantes de calibração para os canais de 2 a 6 dos sensores do Landsat 5.

Canais	Landsat-5			
	$LMAX_i$ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$	$LMIN_i$ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$	$Qcal$	$Qcal_{max}$
1	169	-1.52	1	255
2	333	-2.84	1	255
3	264	-2.84	0	255
4	221	-1.51	0	255
5	30.2	-0.37	0	255
6	15.3032	1.2378	0	255

Fonte: CHANDER *et al.*, 2009.

Após transformar o ND em valor de radiância, foi necessário encontrar o valor da reflectância. Para transformar a radiância em reflectância é necessário adotar cálculos diferentes para os canais 1, 2,3,4,5 e 7 em relação ao canal 6. Assim, através da equação (4.4) é possível encontrarmos a reflectância para cada canal.

$$\rho_i = \frac{\pi L_i d^2}{ESUN_i \cos \theta_s} \quad (4.4)$$

Onde:

ρ_i é a reflectância no canal i ;

d é a distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

ESUN $_i$ é o valor médio da irradiância solar no canal i em $W.m^{-2}\mu m^{-1}$; (**Tabela 4.5**)

E θ_s é o ângulo zenital solar.

Tabela 4.5: Valores do ESUN para o Landsat 5

Banda	ESUN λ (W/m ² m)
Banda 1	1983
Banda 2	1796
Banda 3	1536
Banda 4	1031
Banda 5	220.0
Banda 6	N/A
Banda 7	83.44

Fonte: Chander *et al*, 2009.

Para o canal 6, a radiância precisa ser transformada em temperatura de brilho (Tb) através da função inversa de Planck (B $_i$ (Tb)).

$$Tb = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_i} + 1\right)} \quad (4.5)$$

Onde:

Tb é a temperatura de brilho em Kelvin (K); K $_1$ e K $_2$ são as constantes 1 e 2 de calibração do Landsat em $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$, onde a constante 1 = 607.76 (Landsat 5), e a constante 2 = 1260.56 (Landsat 5); e L é a radiância.

4.2.2. Geração de mapa de uso e cobertura do solo

Para mapear o uso e cobertura do solo foi realizado um processo de vetorização das imagens na escala 1:30.000, e projeção das mesmas em UTM WGS 84 24 S, devido

a resolução e correspondência das imagens do Landsat 5. Os mapas foram elaborados a partir das imagens-base das seguintes datas: 23/03/1985, 30/07/1991, 09/01/2005, e 08/02/2010, que irão representar os anos 80, 90, 2000 e 2010, respectivamente. As classes foram definidas em: urbano alta densidade, urbano média densidade, urbano baixa densidade, área alagada, vegetação, e água. A classe urbano foi diferenciada em alto médio e baixo devido ao interesse na evolução da área urbana da região.

O critério utilizado para diferenciar a classe “urbano” foi baseada no tamanho da área dos polígonos, enquanto as demais classes foram definidas de acordo com os pixels da imagens, ou seja, os diferentes tons de cinza. A classe “urbano de alta densidade” foi definida como área de maior adensamento de construções dentro de um polígono; a classe “urbano de média densidade” apresentava áreas com construções um pouco mais espaçadas, e, quando comparada com as demais, apresentava alguns vazios (área sem construção) dentro do polígono. Na classe “urbano de baixa densidade” foram escolhidas pequenas áreas com ocupações mais dispersas na região. A classe “vegetação” foi definida como toda área verde, sem diferenciação de espécie vegetal. A classe “área susceptível à inundação” foi estabelecida para a região próxima ao leito do rio Macaé (principal rio da região), por ser uma área de planície de inundação deste rio, e áreas de manguezal. A classe “Corpos hídricos” foi estabelecida como todo corpo hídrico, seja mar, rios ou lagoas.

O método de classificar as imagens é de caráter automático³ para as áreas consideradas como vegetação, e não supervisionado⁴ para as áreas urbanas. Além da vetorização manual, foi de grande importância comparações com imagens do *Google Earth*. A escolha do método de classificação deve considerar diferentes fatores, dentre eles, a resolução espacial da imagem, e o Landsat apresenta média resolução, podendo gerar confusão espectral entre algumas classes (MESSIAS, 2012). A melhor resposta para a classificação para a área urbana foi o método não supervisionado (vetorização manual), realizado no software Arcgis 10.1 da Esri. Os polígonos gerados para a classe urbana facilitará a análise de TSC, pois eles poderão ser cruzados em uma única imagem.

³Foram identificados e classificados alguns polígonos para que esses fossem, posteriormente, relacionados com as demais áreas.

⁴ Foram classificados de acordo com o tamanho do polígono e adensamento de infraestrutura.

4.2.3. Mascaramento de nuvens e do oceano

A maior dificuldade em obter imagens para a análise proposta neste trabalho não foi a ausência de imagens nas datas desejadas ou a sequência temporal disponível, mas sim a nebulosidade presente nas imagens. A maior parte das imagens disponíveis pelo banco de dados DGI (para a órbita-ponto 216/75) apresentam cobertura de nuvens acima de 20%. A cobertura de nuvens influencia na radiação termal emitida e na radiação solar refletida, o que pode impedir a identificação de pixels, ocasionando erro na estimativa dos parâmetros da superfície.

É comum nos trabalhos sobre ilha de calor urbano fazer o mascaramento das nuvens, assim como GUTMAN (1991), LUCENA (2012). Há diferentes tipos de métodos de mascaramento das nuvens, como: FRANÇA e CRACKNELL (1995), CHEN *et al* (2002), etc. Para alcançar os resultados almejados, o presente estudo seguirá três técnicas: técnica como base em limiar do valor de reflectância na banda do vermelho; técnica de Gross Threshold; técnica Q . Essas técnicas já foram testadas em regiões de clima equatorial-tropical, como no nordeste brasileiro e podem ser utilizadas por imagens Landsat (LUCENA, 2012).

A técnica como do limiar do valor de reflectância tem como base diferentes imagens onde foi determinado um limiar de 0,3 (reflectância na banda 3 do Landsat em torno de 0,6 μm), assim, qualquer pixel que apresentar um valor de reflectância (na banda 3) maior que 0,3 é considerado como tendo cobertura de nuvem.

Na técnica de Gross Threshold o pixel coberto por nuvens foi classificado através da temperatura de brilho do canal 6. Foi escolhido um limiar menor ou igual a 278 K onde o pixel será classificado como nuvem, já que a variação da temperatura em clima equatorial é pequena.

A técnica Q é a razão entre as reflectâncias do canal 3 (visível vermelho) e 4 (infravermelho próximo) do Landsat, ou seja $Q = \rho_4/\rho_3$. Os valores atribuídos ao Q sobre o pixel coberto por nuvens são aproximadamente iguais a 1,0, uma vez que há um efeito similar do espalhamento de energia refletida para ambos os canais. Há diferença entre o valor do Q para a superfície continental e para superfície marítima: no continente e em áreas vegetadas o valor de Q é, geralmente maior que 1,0, por causa dos maiores valores de reflectância na banda 4 em relação a 3. Enquanto na superfície

marítima ρ_3 é bem maior que ρ_4 por causa do efeito de absorção do infravermelho próximo pela água.

Uma vez aplicado a técnica para o continente e para a superfície marítima, foi determinado que para valores de Q maior ou igual a 0,8 e menor ou igual a 1,6, o pixel foi classificado como nuvem. Quando Q for menor que 0,8 o pixel foi classificado como água, e quando for maior que 1,6 foi classificado como continente.

4.2.4. Temperatura de superfície continental (TSC)

Para obter a temperatura da superfície continental (TSC) foram consultados alguns métodos que a estimem. Segundo *Qinet al.* (2001), muitos autores desenvolveram métodos para estimar a TSC através de algoritmos que estimem a temperatura de brilho (T_b). Contudo, para um algoritmo determinar a TSC dependerá dos seguintes fatores: boa avaliação dos efeitos da atmosfera; boa estimativa de emissividade; qualidade do sensor infravermelho e estabilidade da função resposta espectral; e boa resolução radiométrica do satélite. Alguns algoritmos não consideram aspectos importantes como: radiância detectada, emissividade de cada pixel da superfície, e os efeitos atmosféricos produzidos por gases, aerossóis (SOUZA E SILVA, 2005).

Neste trabalho, a temperatura de superfície continental (TSC) foi estimada através dos dados da banda 6 do Landsat 5, devido ao sensor TM apresentar apenas este canal na faixa espectral do infravermelho termal (LUCENA, 2012). Diferentes métodos foram propostos para corrigir os efeitos atmosféricos (SOUZA E SILVA, 2005; QIN *et al.*, 2001; LUCENA, 2012). O método utilizado aqui neste trabalho foi o mesmo adotado por LUCENA (2012). A equação (4.6), apresentada a seguir, foi utilizada para estimar a TSC.

$$T_s = T_b + \Delta T \quad (4.6)$$

Onde:

T_s é a TSC em Kelvin (K);

T_b é a temperatura de brilho na banda 6, obtida de acordo com a equação (4.6);

e ΔT é o fator de correção que possibilita a estimativa de TSC a partir da temperatura de brilho na banda 6, dado por:

$$\Delta T = \frac{B_i(T_b) \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} B_i(T_a)}{\frac{\partial B_i(T_b)}{\partial T_b}} \quad (4.7)$$

Onde:

α_1 e α_2 são definidos como:

$$\alpha_1 = \tau_l \varepsilon_l \quad (4.8)$$

$$\alpha_2 = (1 - \tau_l) [1 + (1 - \varepsilon_l) \tau_l] \quad (4.9)$$

De acordo com as equações acima (de 4.6 a 4.9), para obtermos a TSC, é necessário conhecer os parâmetros atmosféricos da transmitância (τ_l), a temperatura média da camada atmosférica (T_a), além da emissividade da superfície continental (ε_l). A T_a pode ser obtida através da seguinte equação (QIN *et al.* 2001)

$$T_a = 19.73 + 0.909 T_0 \quad (4.10)$$

Onde: T_0 ⁷ é a temperatura do ar a 2 m da superfície.

A transmitância atmosférica foi calculada embasada na relação empírica de SOUZA E SILVA (2005).

$$\tau_l = 0.951 - 0.01 \cdot w \cdot \exp\left(\frac{3w}{1+w}\right) \quad (4.11)$$

Onde: w é o conteúdo de vapor d'água em $g \cdot cm^{-2}$, adquirido pela equação de Leckner (IQIBAL, 1983)

$$W = 0,493 \cdot UR \cdot \frac{e_s}{T_0} \quad (4.12)$$

Onde:

⁷ O t_0 será relacionado com os dados obtidos na estação meteorológica do INMET (para representar os anos 80 e 90, e do aeroporto para os anos 2000 e 2010)

A UR é a umidade relativa do ar e e_s é a pressão de saturação do vapor de água à temperatura ambiente em hPa, calculada pela seguinte equação (IQBAL, 1983):

$$e_s = 0,01 \exp \left(26,23 - \frac{5416}{T_0} \right) \quad (4.13)$$

Ainda, é necessário conhecer o valor da emissividade da superfície para se obter a TSC, e, como o sensor utilizado neste estudo (TM) possui um único canal termal, foi adotada uma relação entre a emissividade da superfície e o índice área foliar IAF (ou LAI). O IAF é um indicador de biomassa que possibilita estimar a densidade do dossel vegetado (ALLEN, *et al*; 2002), e pode ser obtido em função do SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*). O SAVI é um índice que busca amenizar os efeitos ou as características da superfície do solo no resultado final do índice de vegetação. Com isso, Obtive-se, nesta ordem, o SAVI, o IAF e então, a emissividade, a partir das seguintes equações:

$$SAVI = (1+L) \cdot (\rho_4 - \rho_3) / (L + \rho_4 + \rho_3) \quad (4.14)$$

$$IAF = - \frac{\ln \left(\frac{0,69 - SAVI_{ID}}{0,59} \right)}{0,91} \quad (4.15)$$

Onde: $SAVI_{ID}$ = SAVI calculado com $L=0,1$ (vide equação (4.14))

$$\varepsilon_l = 0,97 + 0,0033 * IAF \quad (4.16)$$

Obter os dados de temperatura e umidade relativa utilizados nas equações apresentadas acima foi outro desafio para esta pesquisa. O desejo de alcançar o resultado esperado para o presente tema, por vezes foi sucumbido pela grande dificuldade de encontrar o mínimo de dados possíveis para a região de Macaé. A estação meteorológica localizada neste município apresenta uma série inconsistente, e cheia de falhas. Não obstante de conseguir algum dado, as estações meteorológicas mais próximas, que em quilometragem não são tão próximas assim, também deixaram a desejar com relação a uma série de dados longos e consistentes. Optou-se, então, em utilizar as normais climatológicas do período de 1991 a 1961, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para as imagens que antecedem o ano

2000 (1985 e 1991). Para as imagens posteriores ao ano 2000 (2005 e 2010), foram utilizados dados médios mensais do aeroporto de Macaé.

4.2.5. Índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), ou índice de vegetação por diferença normalizada, em tradução livre, é um índice muito utilizado em análises de clima urbano, pois possibilita a identificação do estado da vegetação presente em uma área, e pode ser correlacionado com a expansão urbana e a variação da TSC local, sendo os valores de NDVI inversamente proporcionais aos valores de temperatura.

O primeiro estudo com NDVI foi realizado por Rouse *et al* (1973), que normalizou a razão simples para o intervalo de - 1 a 1, onde, quanto maior o índice, maior a presença de vegetação. O NDVI seria, então, a razão simples da diferença normalizada entre o comprimento de onda, onde a vegetação possui alta reflectância da radiação solar (infravermelho próximo - 0,8 µm) e um comprimento de onda, onde ela possui baixa reflectância (Visível - 0,6µm). O NDVI pode ser obtido através da seguinte equação (HUETE *et al.*, 2002)

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (4.17)$$

A vegetação possui alta reflectância na região do infravermelho próximo devido sua estrutura celular, e uma baixa reflectância na região do visível associada à absorção de energia que é utilizada no processo de fotossíntese. Com isso, quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, menor será a refletância no visível, e maior será no infravermelho próximo (PONZONI & SHIMABUKURO, 2010). Os valores de NDVI para as áreas vegetadas variam entre 0,3 e 1,0, onde os maiores valores estarão associados à cobertura mais densamente vegetada. Quando os valores ficam abaixo de 0,6, a vegetação apresenta características de “*stress*”, enquanto que valores acima de 0,6, a vegetação é representada como sadia (HEUTE *et al.*, 2002).

Outras superfícies como água, nuvem e neve apresentam reflectâncias maiores no visível do que no infravermelho, e, nesse caso, o valor do NDVI será negativo. Para as áreas urbanizadas e solo exposto, a reflectância é similar, com valores próximos a

zero. O NDVI foi utilizado neste trabalho para complementar a análise da expansão da área urbana de Macaé.

4.2.6. Índice de Área Construída - IBI

O IBI (*Index Base Built-up*), ou Índice de Área Construída, em tradução livre, foi outro parâmetro utilizado para alcançar os objetivos desta pesquisa. Esse índice, proposto por Xu (2008), permite a identificação automática de áreas construídas em imagens de satélite. O IBI utiliza três índices temáticos provenientes de dados de satélite. Outros índices similares usam diretamente as bandas originais dos sensores. Os três índices usados no IBI representam os três principais componentes de uma paisagem urbana: vegetação (NDVI), água (MNDWI – *Modified Normalized difference water index*)⁸, e área construída (NDBI–*Normalized difference built-up index*)⁹.

Como pode ser observado no trabalho proposto pelo Xu (2008), o IBI pode ser calculado utilizando diretamente o NDVI, MNDWI e o NDBI. O MNDWI consiste numa modificação do índice proposto por McFeeters (1996), o índice de água por diferença normalizada (NDWI), e pode ser calculado pela equação:

$$MNDWI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5} \quad (4.17)$$

Onde, mais uma vez, os subscritos representam as bandas dos sensores TM e ETM+.

NDBI (ZHA *et al* (2003), esta embasado na resposta espectral de áreas construídas com maior reflectância no infravermelho médio (banda 5 do Landsat) e infravermelho próximo (banda 4 Landsat). O NDBI pode ser calculado a partir da equação:

⁸ Ou Índice de Água por Diferença Normalizada

⁹ Ou Índice de Área Construída por Diferença Normalizada

$$NDBI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (4.18)$$

De acordo com as equações (4.17) e (4.18), o IBI pode ser obtido da seguinte forma:

$$IBI = \frac{\left[NDBI - \frac{(NDVI + MNDWI)}{2} \right]}{\left[NDBI + \frac{(NDVI + MNDWI)}{2} \right]} \quad (4.19)$$

O IBI pode, ainda, ser ainda calculado de uma única vez:

$$IBI = \frac{2\rho_5/(\rho_5 + \rho_4) - [\rho_4/(\rho_4 + \rho_3) + \rho_2/(\rho_2 + \rho_5)]}{2\rho_5/(\rho_5 + \rho_4) + [\rho_4/(\rho_4 + \rho_3) + \rho_2/(\rho_2 + \rho_5)]} \quad (4.20)$$

Os resultados podem variar entre -1,0 e +1,0 - valores positivos e próximos a 1,0 e indicativos de área urbana -, enquanto os valores negativos e próximos a -1,0 são indicativos de área menos urbanizada.

4.2.7. Identificação de áreas favoráveis à ilha de calor

A ilha de calor (IC) será definida neste trabalho como uma região mais quente do que seus arredores, enquanto a região ao redor, que apresentar a menor temperatura, será denominada de ilha de frescor. Para identificar áreas favoráveis à formação de IC serão analisados os pontos mais quentes das imagens, ambos do mesmo período de tempo e localização. Analogamente, as áreas classificadas como “urbana” (alto, médio ou baixo) e as não consideradas como urbano serão correlacionadas aos pontos mais quentes.

Serão apresentados 4 mapas para a análise sazonal de TSC, e 6 mapas para a análise temporoespacial da TSC e dos índices NDVI e IBI, sendo um episódio por década.

A análise do comportamento da TSC está pautada, sobretudo, na variação do NDVI e do IBI, uma vez que estes podem representar melhor a expansão urbana e alterações no uso e cobertura do solo que podem levar a uma mudança na TSC. Tal análise se deve os seguintes fatos: os valores obtidos de TSC são de no máximo 2 imagens por década, o que não representa, de fato, o padrão de temperatura local; não foram considerados fenômenos atmosféricos que, porventura, estariam tornando o período das imagens mais quente ou fria que o normal; não será feita a análise climatológica da temperatura.

Não foram realizados testes estatísticos para a análise proposta nessa pesquisa, devido, principalmente, a ausência de dados meteorológicos, como também a deficiência do banco de dados de imagens de satélite. Para o período anterior ao ano 2000 foram utilizadas as normais climatológicas de temperatura e umidade para calcular a TSC. Com isso, os resultados foram analisados de forma qualitativa, baseados na observação e valores extraídos das imagens.

CAPÍTULO 5 – Resultados e discussões

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise temporoespacial da TSC nos últimos 30 anos, e identificar a expansão da área urbana de Macaé relacionando-a a possíveis áreas de ilha de calor. Os resultados estão embasados não só na TSC, como nos índices NDVI e IBI, bem como na variação do uso e cobertura do solo. Os valores obtidos de TSC, NDVI, IBI, e o mapeamento de uso e cobertura do solo apresentaram alterações para o período analisado. A seguir, são detalhados os resultados obtidos nessa pesquisa.

5.1. Análise temporoespacial do uso e cobertura do solo

De acordo com a classificação do uso e cobertura do solo, a área em estudo apresentou uma expansão significativa. A classe “urbano de média densidade” ocupava áreas do centro de Macaé no mapa gerado para os anos 80 (**Figura 5.1**). No mapa que representa os anos 90 (**Figura 5.2**), houve uma pequena expansão das áreas de classe “urbano de baixa densidade” em direção à costa litorânea norte, e nas proximidades da

lagoa de Imboassica, e a área de “urbano de média densidade” teve um relativo avanço em direção ao continente., De acordo com os dados do IBGE (2010), a população de Macaé passou de 75.851 mil habitantes para 100.875 mil habitantes de 1980 para 1991, respectivamente.

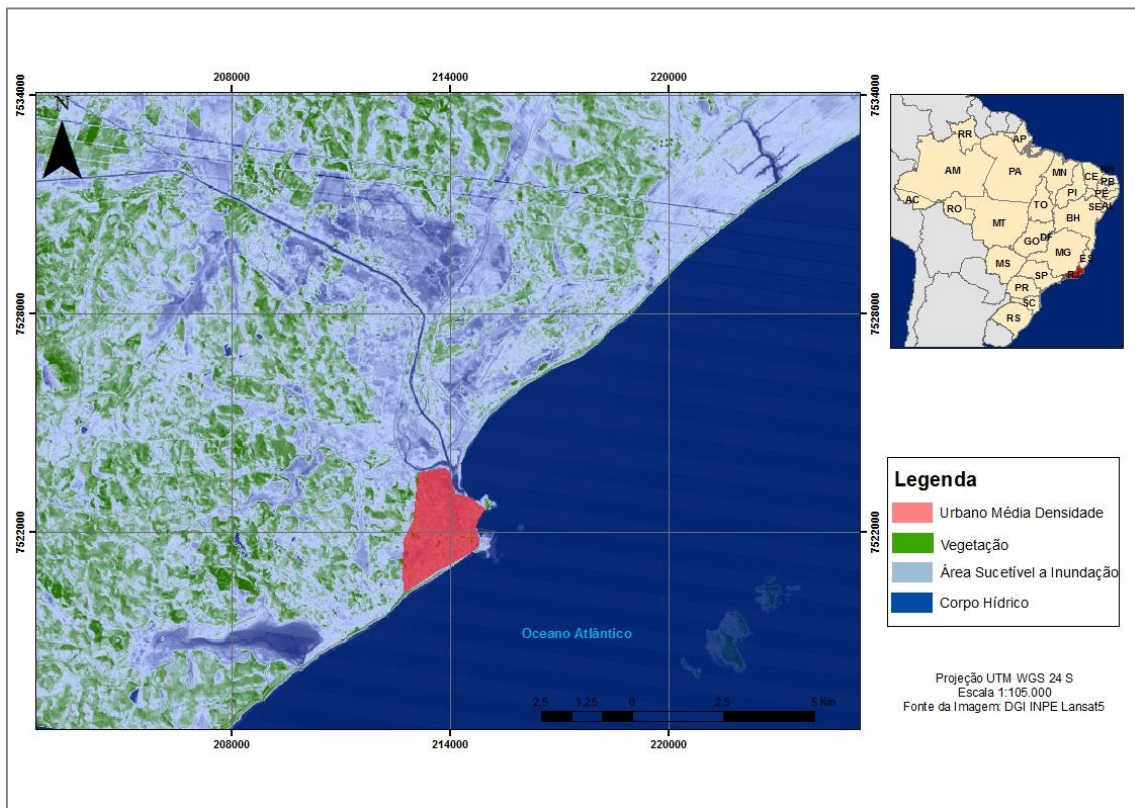


Figura 5.1: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos 80 (imagem do dia 23/03/1985).

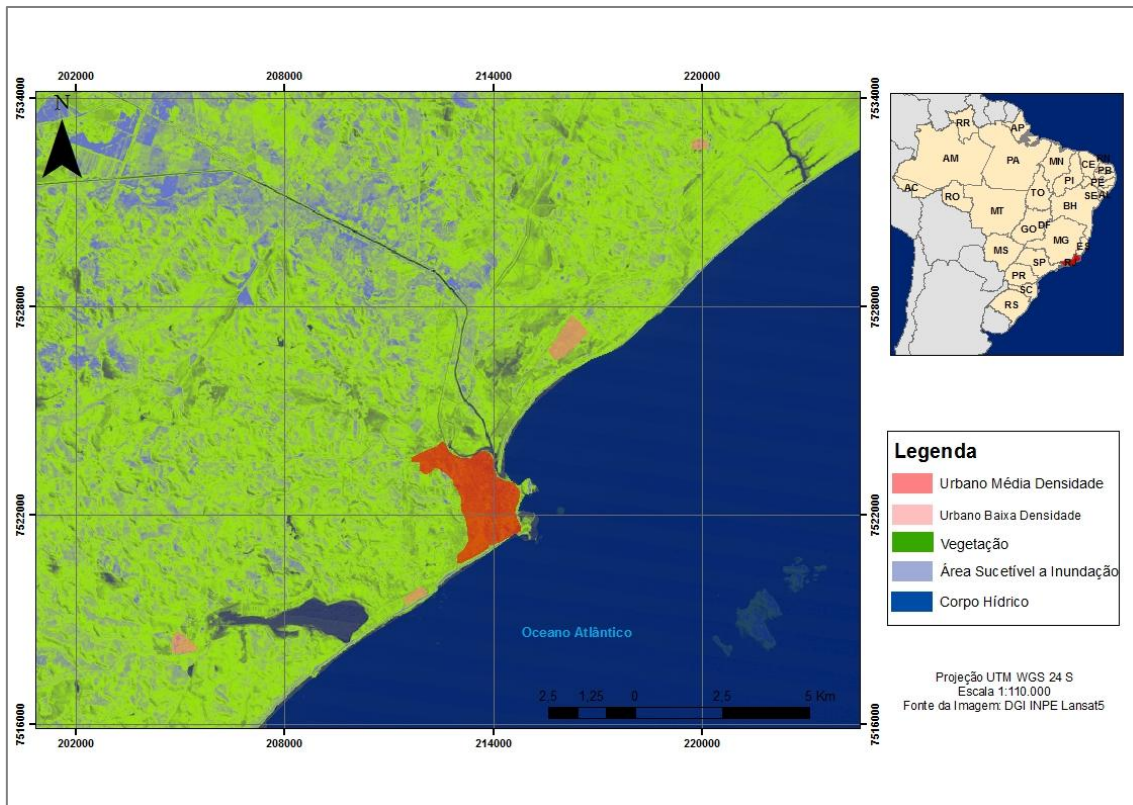


Figura 5.2: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos 90 (imagem do dia 30/07/1991).

O maior crescimento da área urbanizada foi identificado no mapa que representa os anos 2000 (**Figura 5.3**). Neste mapa, é possível perceber a expansão da área edificada, que cresceu paralela à costa e em direção ao interior do continente, e que, áreas antes consideradas como “urbano de média densidade”, passaram a ser considerada como “urbano de alta densidade”, isso porque os polígonos considerados nessa área cresceram, e edificações se tornaram mais densas. De 1991 para 2000, a população aumentou de 100.875 mil habitantes para 132.461 (IBGE, 2010). A classe “urbano denso” cresceu ainda mais no período entre 2005 e 2010 (**Figura 5.4**). Áreas antes classificadas como de “média densidade” foram mais ocupadas, tornando suas edificações mais densas (tanto em construções quanto em população). Neste momento, a população de Macaé saltou de 132.461 mil habitantes para 206.728 mil habitantes, entre 2000 e 2010, respectivamente. Contudo, pode ser observado através das imagens que o crescimento horizontal da área urbana não aparentou ser o mais expressivo, mas o adensamento dos já existentes espaços construídos da região urbana de Macaé.

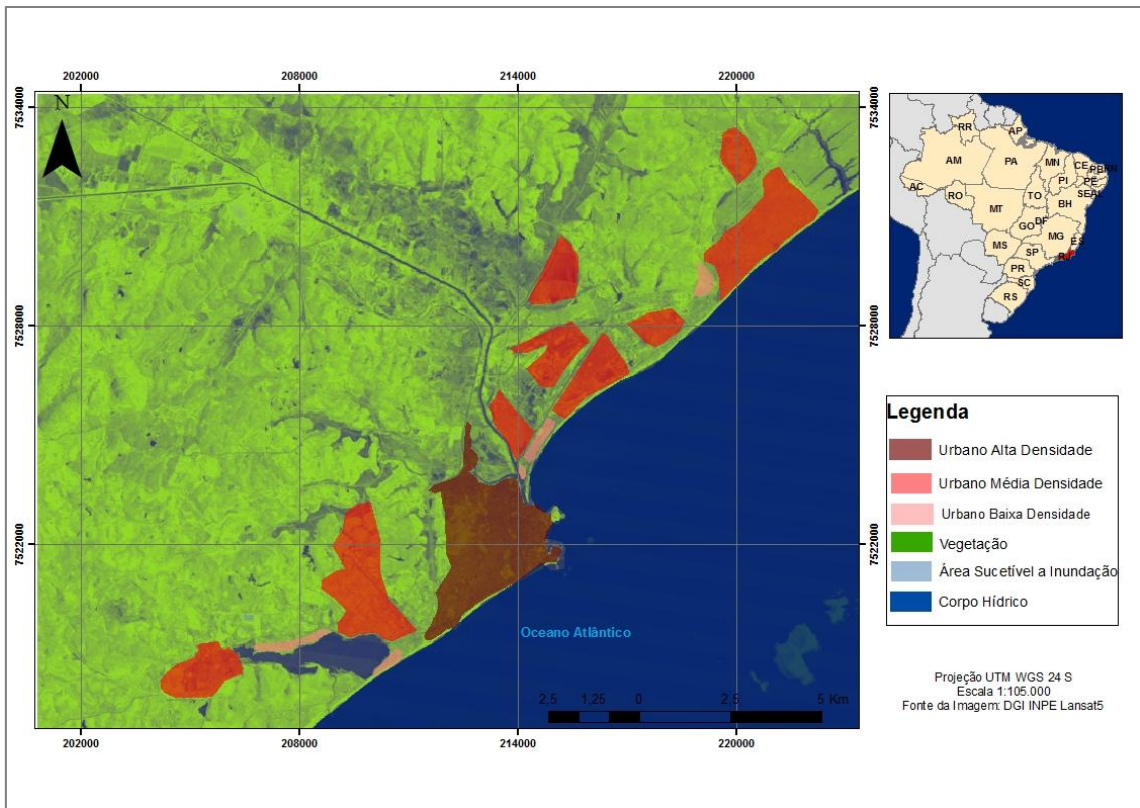


Figura 5.3: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos 2000 (imagem do dia 09/01/2005).

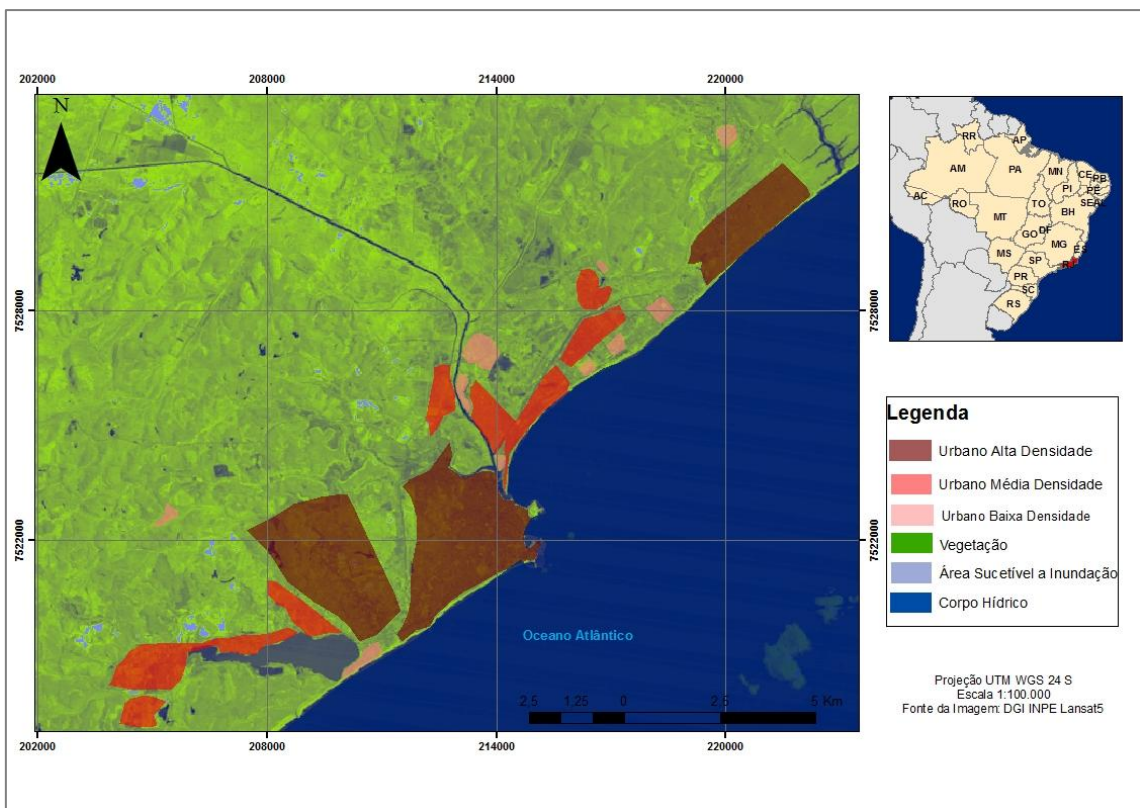


Figura 5.4: Mapa de uso e cobertura do solo representando os anos de 2010 (imagem do dia 23/03/2010).

A classe de “vegetação” foi modificada na medida em que ocorreu a expansão urbana, permanecendo praticamente inalterada no interior da área de estudo. Cabe ressaltar que algumas diferenças do terreno não foram destacadas na classificação da vegetação, como área de afloramento rochoso, solos arenosos, vegetação rasteira e pastos. Sendo assim, para os resultados da TSC, e dos índices NDVI e IBI, essas áreas foram identificadas com valores “peculiares” para uma “vegetação”.

A classe “área suscetível à inundação” sofreu grandes alterações. Nos anos 80 e 90, as áreas alagadas ocupavam uma grande área da planície do rio Macaé, que foi diminuindo nos anos 2000, até serem identificadas pequenas áreas nos anos de 2010. Essa diminuição das áreas úmidas suscetíveis à inundação pode estar relacionada com a expansão da área urbana de Macaé, que cresce sobre áreas aterradas, e drenadas (áreas de lagoas, brejos e braços de rio) (NUPEM-UFRJ, 2015).

5.2. Temperatura de superfície continental (TSC)

Os resultados obtidos para a temperatura de superfície continental (TSC) foram separados em análise da análise sazonal, e análise temporoespacial.

5.2.1. Análise sazonal da TSC

De acordo com os dados gerados, percebe-se que há uma maior homogeneidade da TSC nos períodos secos (inverno) do que em períodos úmidos (verão), em ambos os anos comparados (2005 e 2010). No verão, devido ao maior aquecimento da superfície, as respostas espectrais se mostraram variadas, principalmente na área não urbanizada, classificada como “vegetação”. Tal fato pode estar relacionado com as diferentes superfícies vegetais e de solo. Análise temporoespacial do uso e cobertura do solo. Para o período úmido, imagem de 09/01/2005 (**Figura 5.5**), a TSC que predominou na área urbana ficou entre 30,1 e 32°C. Áreas mais quentes, com temperatura entre 34,1 e 38°C, foram identificadas na área central e ao longo da costa litorânea (sentido norte). Na área não urbana tem-se o predomínio de temperaturas entre 26,1 e 28°C, mas também com áreas de temperaturas entre 28,1 e 32°C. Na imagem do dia 04/07/2005 (inverno) (**Figura 5.6**), a TSC apresentou valores bem menores em relação ao verão,

predominando os valores abaixo de 24°C em quase toda região. Alguns pontos apresentaram temperatura entre 24,1 e 26°C, sobretudo nas áreas urbanas.

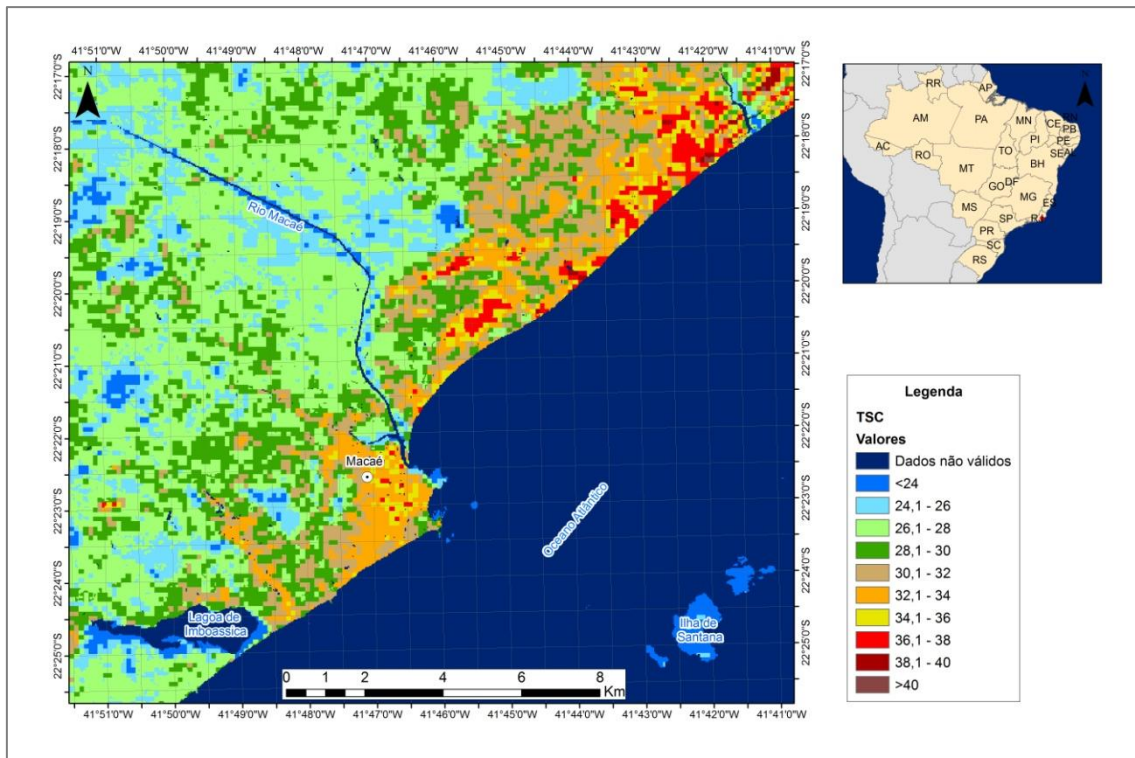


Figura 5.5: Mapa de TSC do dia 09/01/2005.

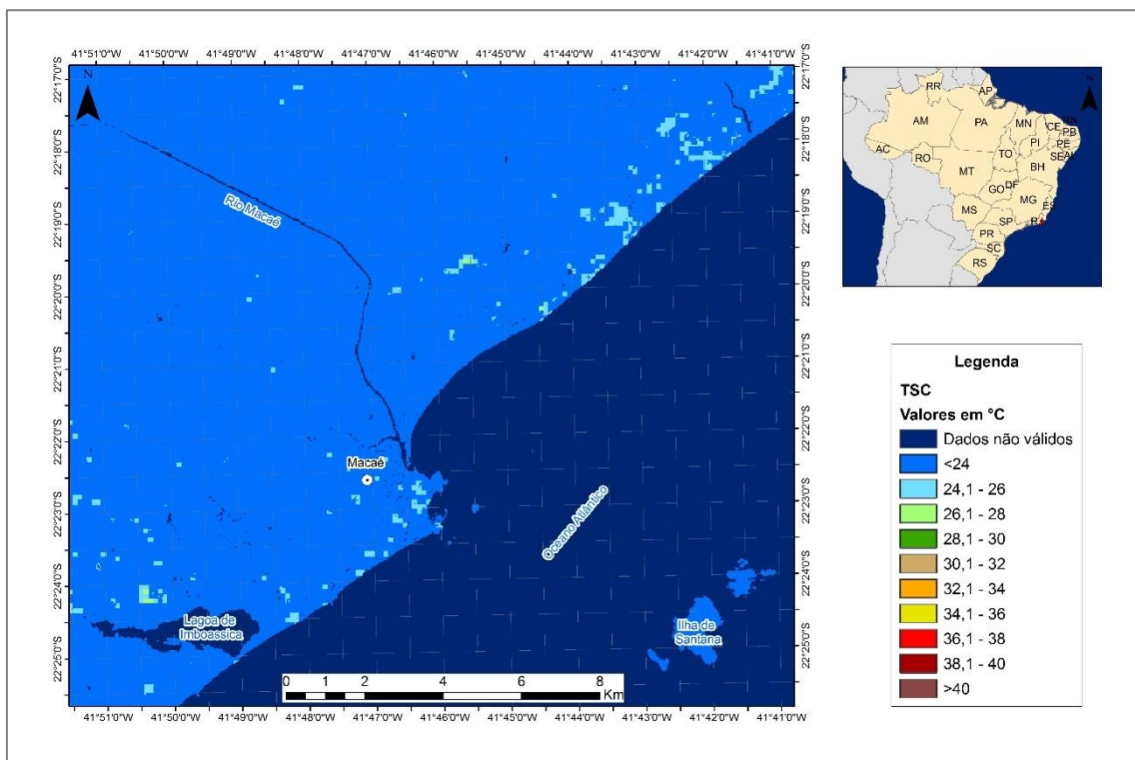


Figura 5.6: Mapa de TSC do dia 04/07/2005

Na análise sazonal feita para a imagem de 2010 pode ser identificado que as maiores temperaturas estão na área urbana (no verão), predominando valores entre 30,1 e 34°C, e pequenos núcleos mais quentes, com até 40°C (**Figura 5.7**). Na área não urbana predominaram temperaturas entre 26,1 e 30°C, embora uma área próxima ao leito do rio Macaé tenha resultado em temperaturas entre 32,1 e 38°C. No período de inverno (**Figura 5.8**) foi observado um aumento na temperatura da área não urbana, principalmente nas áreas de afloramento rochoso, identificadas, também, através de imagens do *Google Earth*.

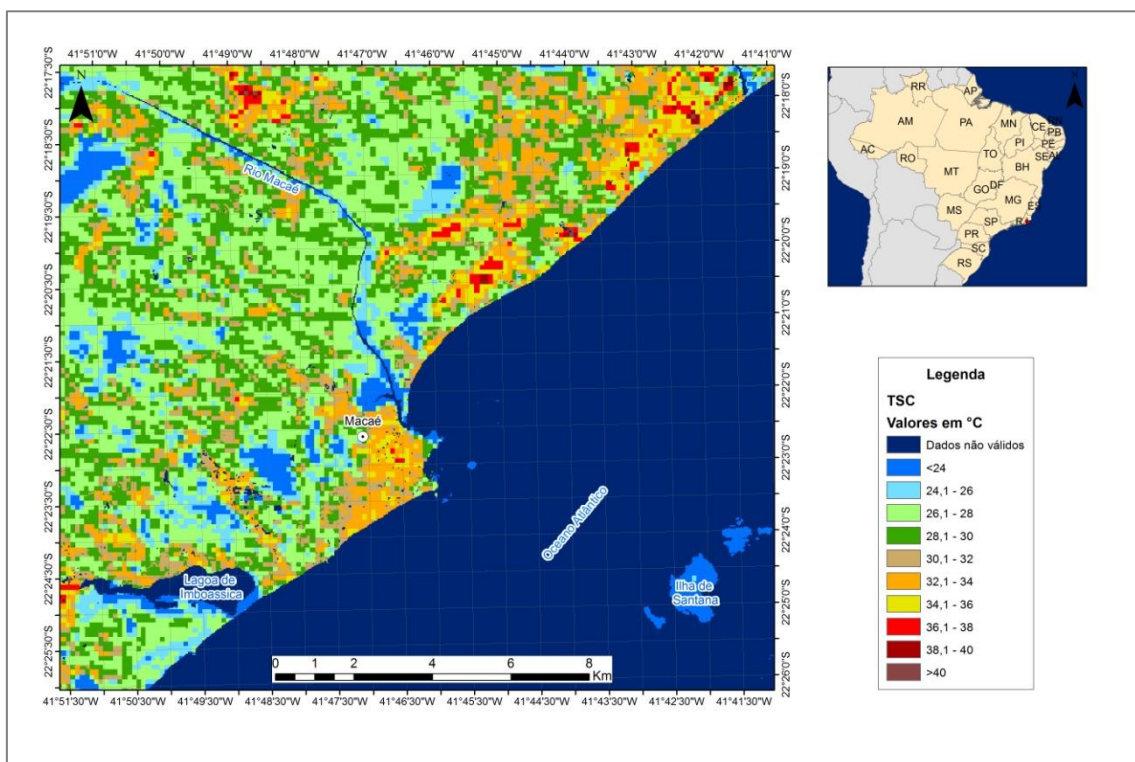


Figura 5.7: Mapa de TSC do dia 23/03/2010

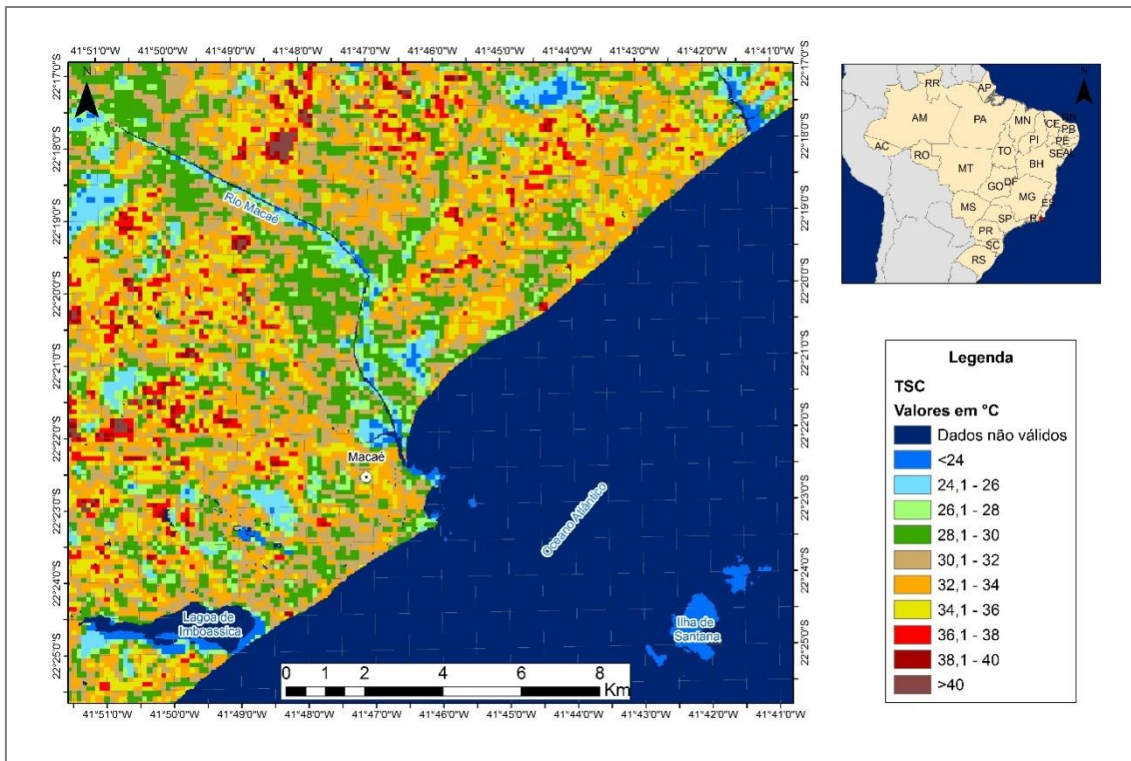


Figura 5.8: Mapa de TSC do dia 04/09/2010

No verão (área não urbana) do período de 2005 temperaturas ficaram entre 26,1 e 28°C, e em 2010 houve uma expansão das áreas com temperaturas entre 28,1 e 30°C, e ainda áreas que apresentaram até 40 °C. Nas áreas urbanas, em 2005, apresentaram mais pontos com temperaturas mais elevadas (entre 36 e acima de 40°C) do que em 2010, principalmente na área urbana, localizada na costa norte do município. Estas áreas podem ser evidenciadas como locais favoráveis à formação de ilhas de calor.

No inverno, os resultados mostraram que as temperaturas em 2005 ficaram bem menores do que em 2010, tanto na área urbana quanto na não urbana, com predomínio de valores menores que 24 °C. Em 2010 as áreas não urbanas apresentaram valores altos, acima de 40°C. Essa resposta da TSC maior que 40°C no inverno, pode ter relações com outros fatos, além do de superfície. Vale destacar que entre os anos de 2009 e 2010 foi registrado o fenômeno El Niño, de intensidade moderada, e que tal evento pode influenciar na no aumento da temperatura do ar em algumas regiões do Brasil, além de sua influência na dinâmica atmosférica. Ou seja, o verão de 2005 apresentou-se com mais áreas quentes do que o verão de 2010 (nas áreas urbanas),

enquanto em 2010 as áreas não urbanas apresentaram-se mais quentes do que as urbanas.

5.2.2. Análise temporoespacial da TSC

Foi possível observar que os maiores valores de TSC avançaram junto às áreas urbanas, embora já nas imagens mais antigas (1985 e 1991) tenha sido possível identificar áreas sujeitas a maior aquecimento devido, sobretudo, às propriedades físicas do terreno. A TSC da imagem do dia 23/03/1985 apresentou valores predominantes entre 32 e 36°C, e entre 36 e 40°C na área urbana central e da costa da cidade. Nas áreas não urbanas nas áreas urbanas os valores predominaram entre 28 e 32°C (**Figura 5.9**).

A imagem do dia 30/07/1991 (**Figura 5.10**), por ser uma imagem referente ao inverno, apresentou TSCs mais baixas e com pouca variação entre a área urbana e não urbana. Os valores entre 26 e 28°C predominaram na área urbana, e entre 28 e 30°C na área não urbana. Algumas regiões apresentaram temperaturas entre 24,1 e 26°C, e abaixo de 24°C, principalmente nas áreas próximas ao rio Macaé e áreas com cobertura vegetal mais densa.

Na imagem do dia 09/01/2005 (**Figura 5.11**) foi notado uma expansão da área com TSCs mais elevadas, juntamente com expansão da área urbana (como mostrado no mapa de uso e cobertura do solo – **Figura 5.3**). Os valores entre 30,1 e 38°C passaram a predominar nas áreas urbanas, mais uma vez mostrando a sensibilidade da região central e costa nordeste de Macaé. Na área não urbana os valores predominantes ficaram na faixa entre 26,1 e 30°C.

Na imagem do dia 23/03/2010 (**Figura 5.12**) as áreas não urbanas apresentaram maiores temperaturas em comparação à 2005, e uma retração das áreas mais quentes na região urbana. Os valores de TSC que predominaram na área urbana ficaram na faixa entre 30,1 e 34°C, tendo pontos da superfície com temperaturas entre 36,1 e 40°C. Na área não urbana predominaram os valores entre 26,1 e 30°C, e alguns pontos da superfície com temperaturas entre 32,1 e 40°C.

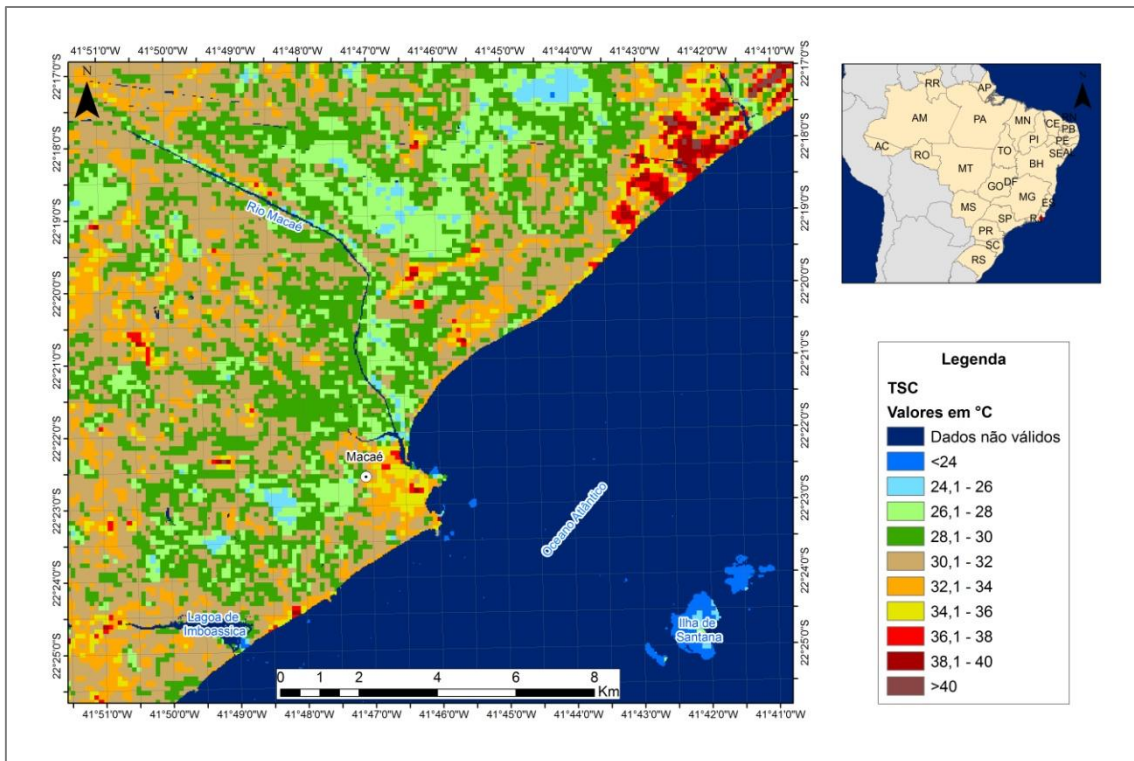


Figura 5.9: Mapa de TSC do dia 23/03/1985.

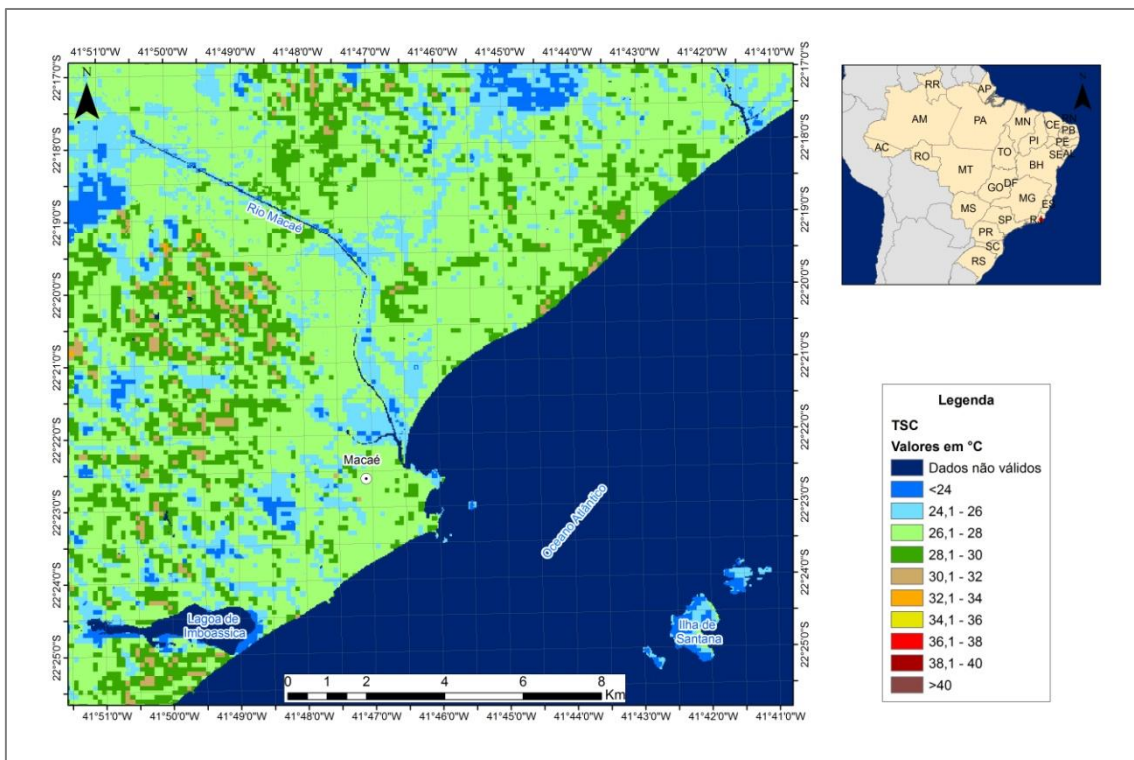


Figura 5.10: Mapa de TSC do dia 30/07/1991

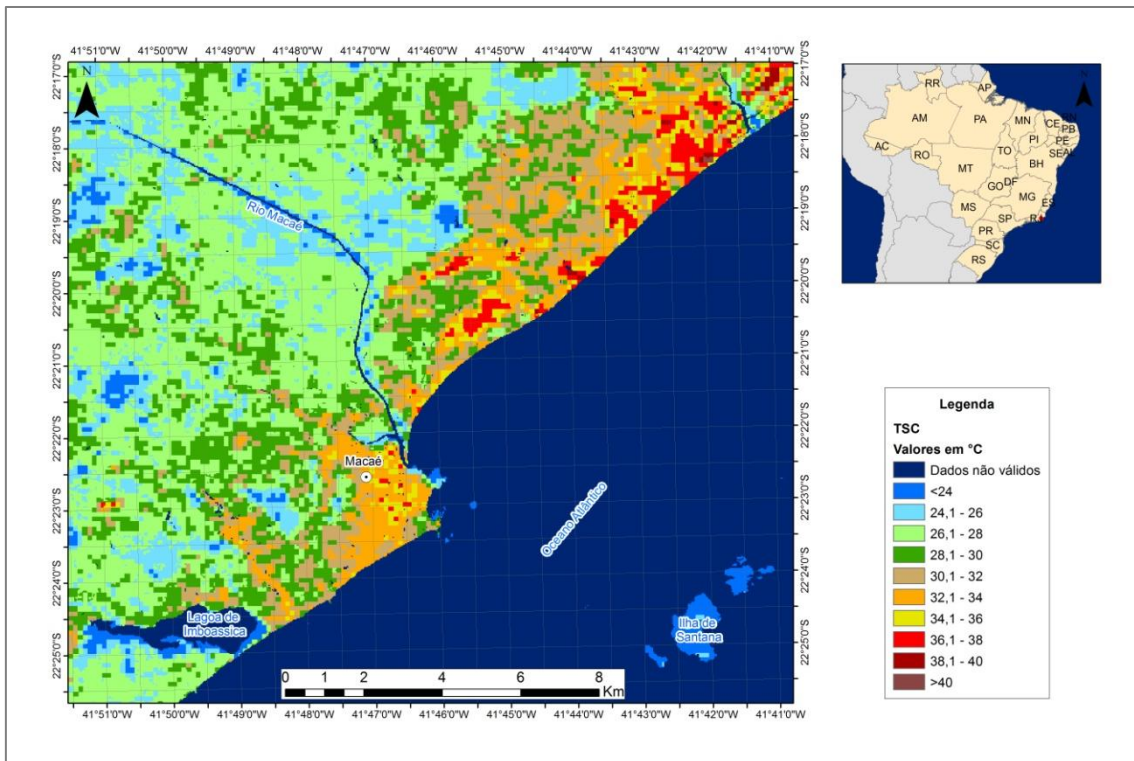


Figura 5.11: Mapa de TSC do dia 09/01/2005

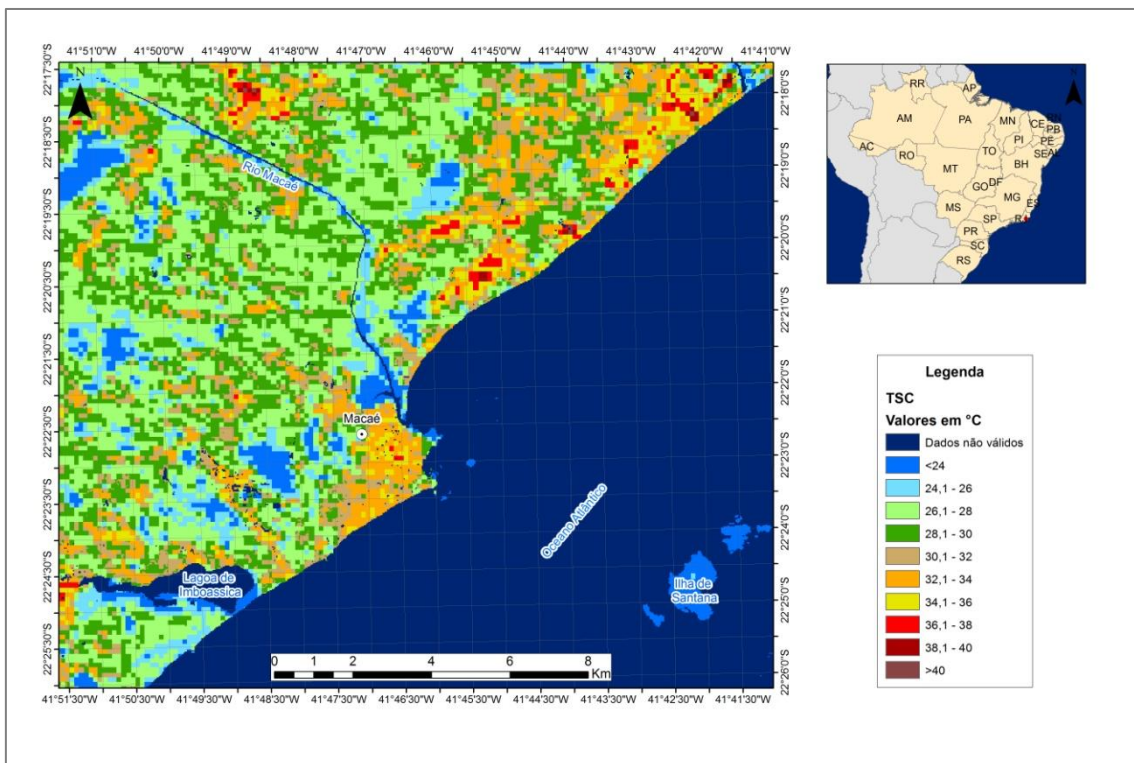


Figura 5.11: Mapa de TSC do dia 23/03/2010.

A análise das imagens de TSC mostrou que as maiores temperaturas foram registradas na área urbana e que a área abrangida por TSCs mais altas acompanharam a expansão da área urbana de Macaé. Da imagem de 1985 para a de 2005 a TSC apresentou sua maior variação no espaço, ou seja, pode ser percebido que as áreas com temperaturas mais altas cresceram entre essas as datas analisadas, e que a área não urbana também se apresentou como mais quente entre 2005 e 2010. Na imagem de 2005 essa faixa de temperatura que predominou na área urbana foi entre 32 e 36°C. Já na imagem de 2005 as temperaturas ficaram entre 30,1 e 38°C. Em 2010, predominaram os valores 30,1 e 36°C. Com exceção da imagem de 1991, as demais imagens apresentaram pontos da área urbana com temperaturas na faixa entre 36,1 e 40°C. Em 1985 os pontos da superfície com TSCs mais altas estavam mais concentrados na costa norte do município (área que na época predominava superfície arenosa e restinga), enquanto em 2005 e 2010 esses pontos foram observados mais espalhados na área urbana.

A região central de Macaé e a costa litorânea mostraram-se como áreas mais quentes de toda área urbana, destacando essas áreas como possíveis focos de ilhas de calor da cidade. Essas áreas foram classificadas como “urbana de alta densidade”, demonstrando que as alterações causadas por construções podem ter alterado o balanço de energia local, embora na região da costa norte as TSCs maiores podem estar relacionadas não só com as edificações, mas com os resquícios de cordões arenosos e restinga. Entre os mapas de 1985 e 2005 foram os que mostraram as maiores diferenças de espacialização da TSC.

5.3. Análise temporoespacial do NDVI

Os resultados gerados para o NDVI mostraram uma variação entre as imagens que dos anos 80 e 2010. Na imagem do dia 23/03/1985 (**Figura 5.12**) os índices de NDVI ficaram entre 0,1 e 0,45 na maior parte da área urbana, representando baixa composição da massa vegetal. Na área não urbana, o índice predominante está entre 0,45 e 0,75, correspondendo a área com cobertura vegetal mais consistente e/ou densa. Mesmo na área não urbana, considerada como “vegetação”, foi possível observar pontos que apresentaram índices entre 0,1 e 0,45, o que pode estar relacionado com características específicas do solo e da vegetação – tais características não foram

detalhadas no presente estudo, -, sendo assim, a resposta espectral não foi igual para toda área considerada vegetal.

Na imagem do dia 30/07/1991 (**Figura 5.13**) foi observado o predomínio dos índices entre 0,1 e 0,3, e entre 0,3 e 0,45, na área urbana, e também na área não urbana foram identificados vários pontos com estes mesmos índices. Vale ressaltar que esta imagem é de um período de inverno, e, como a cobertura vegetal pode apresentar alterações em suas características físicas devido à sazonalidade, pode sofrer esse tipo de variação. Nesta imagem já é possível ver uma diminuição das áreas vegetadas, devido ao crescimento da cidade de Macaé, principalmente na costa litorânea e na região central da cidade.

Nos resultados da imagem do dia 09/01/2005 (**Figura 5.14**) é perceptível o aumento das áreas com índices entre 0,1 e 0,45 (representados em tons de laranja e amarelo no mapa), e, concomitantemente, um aumento da área urbana. Ou seja, o avanço da área urbana gerou índices próximos a -1 de NDVI que correspondem à baixa composição de massa vegetal. Na área não urbana predominaram os índices entre 0,45 e 0,75, o que responde bem para uma área de cobertura vegetal. Também foi possível observar áreas não urbanas que apresentaram índices entre 0,3 e 0,45, principalmente nas proximidades do leito do rio Macaé – área suscetível à inundação, e na costa litorânea norte de Macaé – área que apresenta resquícios de cordões arenosos e restinga.

Na imagem do dia 23/03/2010 (**Figura 5.15**) os índices de NDVI que predominaram na área urbana foi entre 0,1 e 0,15. A área urbana cresceu pouco, em relação à imagem de 2005, mas houve ainda um crescimento nas áreas em volta da Lagoa de Imboassica, e nas proximidades do rio Macaé os índices próximos a 0,1 e 0,15 se intensificaram, mostrando também um avanço da área urbana, e uma alteração na área suscetível à inundação. A área não urbana apresentou alterações quanto à resposta espectral, e foram identificados mais pontos com índices entre 0,3 e 0,45, mostrando baixa composição da vegetação nessas áreas.

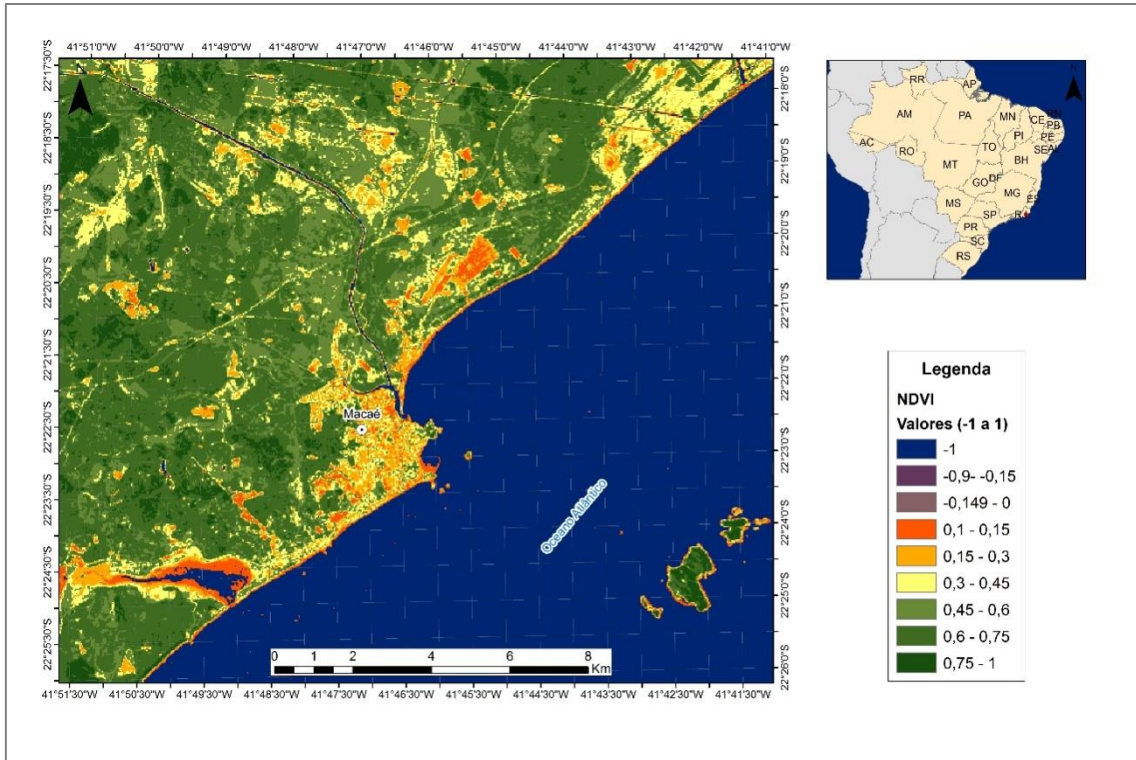


Figura 5.12: Mapa de NDVI do dia 23/03/1985 representando os anos 80.

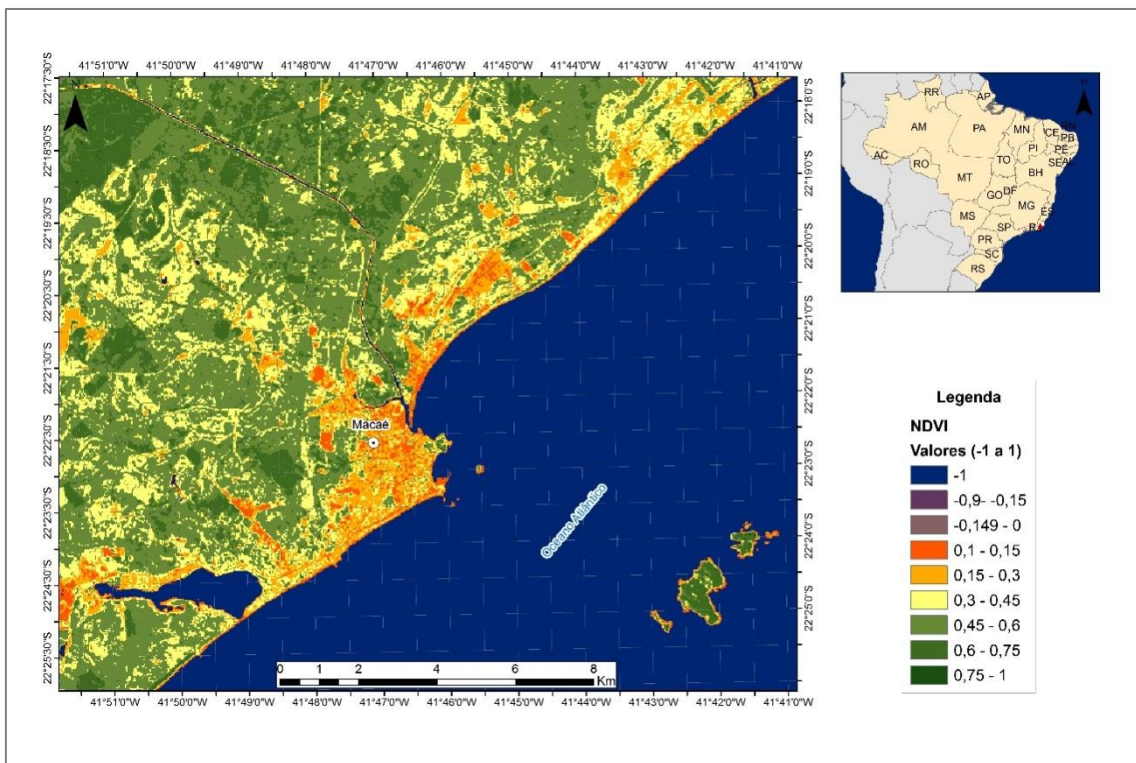


Figura 5.13: Mapa de NDVI do dia 30/07/1991 representando os anos 90

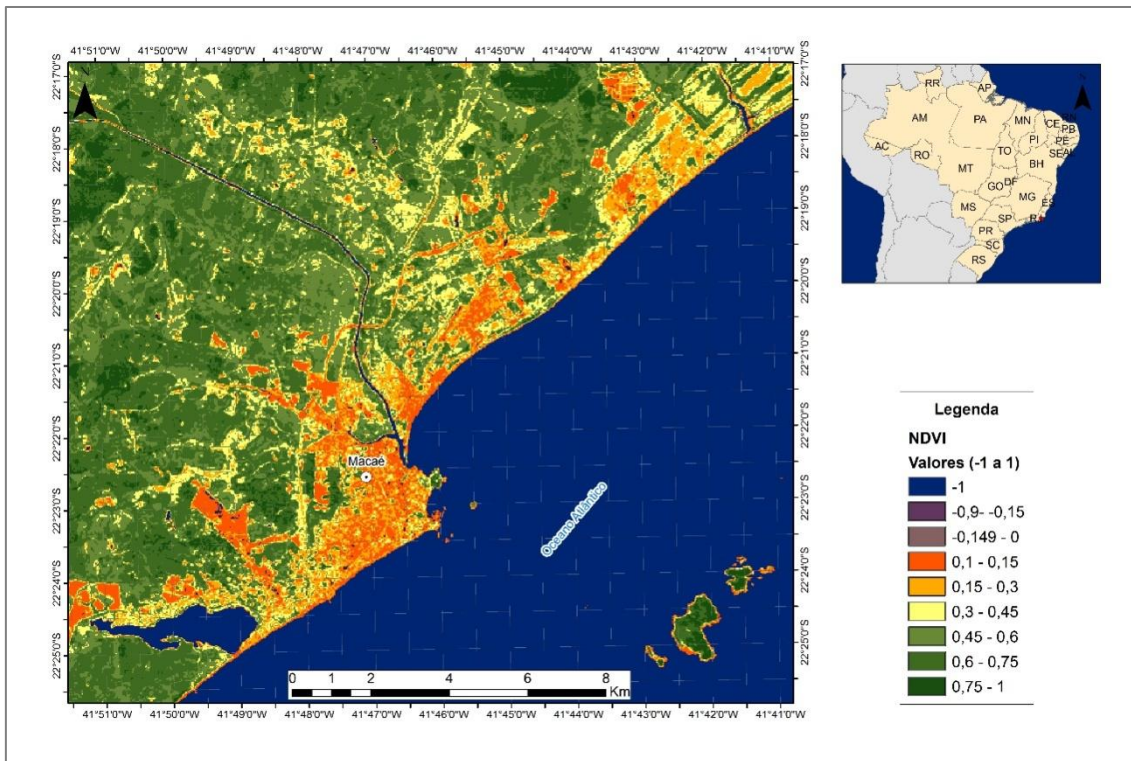


Figura 5.14: Mapa de NDVI do dia 09/01/2005 representando os anos 2000.

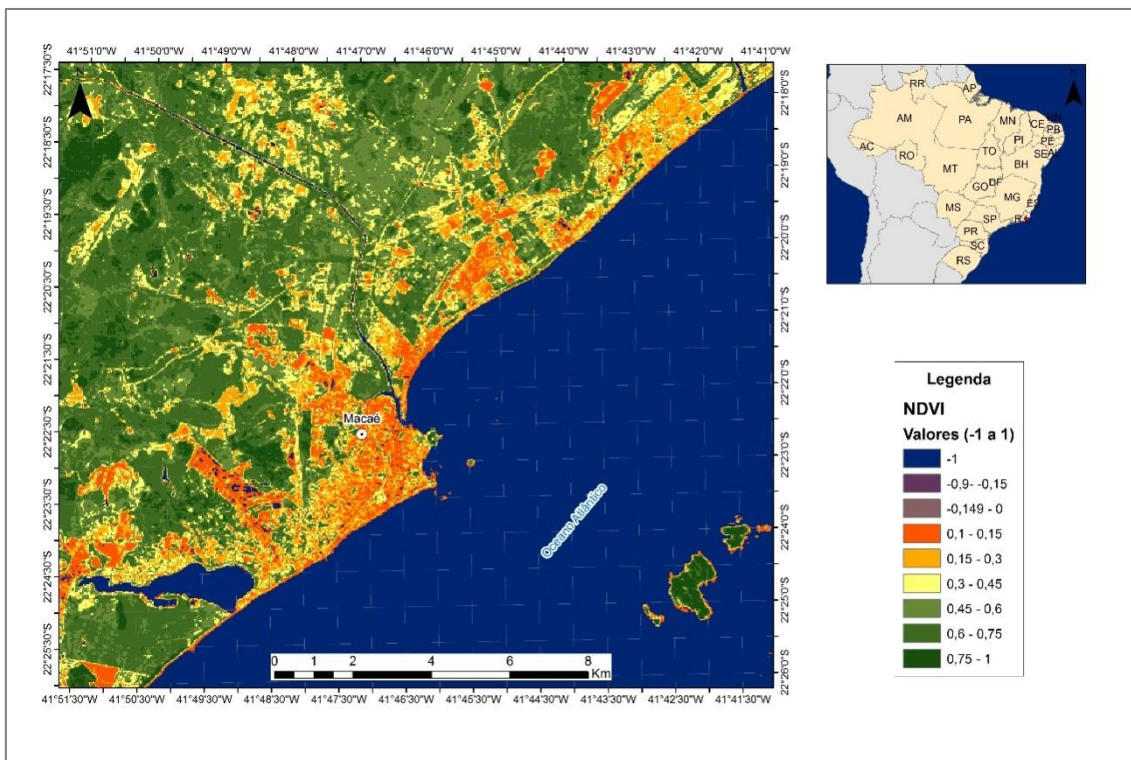


Figura 5.15: Mapa de NDVI do dia 23/03/2010 representando os anos de 2010.

Entre as quatro imagens analisadas a maior diferença pôde ser identificada entre os anos 90 e 2000 (imagem do dia 30/07/1991 e 09/01/2005, respectivamente), onde foi possível perceber, juntamente a análise da mudança de uso do solo, que houve o crescimento mais expressivo da área urbana. Os resultados de NDVI apresentaram-se, praticamente, de forma inversa aos da TSC, onde os maiores valores de NDVI (próximos a 1), cruzaram com os valores mais baixos de TSC, mostrando a diferença da resposta espectral dos áreas mais vegetadas e menos vegetada.5.4. IBI

5.4. Análise temporoespacial do IBI

Os resultados obtidos para o IBI mostram uma correspondência entre a TSC e com o NDVI, onde, os maiores valores de IBI cruzam com os maiores de TSC e com os mais baixos de NDVI.

Na imagem do dia 23/03/1985 (**Figura 5.16**) o IBI, na área urbana dessa época, apresentou índices entre -0,1 e 0,35. Os índices mais próximos a 1 correspondem à área construída. Na faixa costeira, embora não tenha sido classificada como urbano para os anos 80, a resposta espectral mostrou pixels com valores entre -0,25 e -0,07, mostrando uma diferença entre o solo/superfície dessa localidade com as demais áreas. Na área não urbana predominaram os índices entre -0,4 e -0,2. Como o IBI é composto por diferentes índices (NDVI - vegetação, NDWI - água, e NDBI - área construída), a resposta espectral não será dada somente para áreas com edificações. Desta forma, áreas que apresentam qualquer tipo de cobertura vegetal (e suas diversas peculiaridades), e superfícies úmidas e/ou líquidas, podem responder com índices mais altos (para área construída) e mais baixos (para área vegetada). No mapa do dia 23/03/1985 (**Figura 5.16**) isto pode ser exemplificado nas áreas úmidas ao redor da lagoa de Imboassica e próximo às margens do rio Macaé, que obtiveram resposta com índices entre 0,07 e 0,34. Neste caso, os índices de IBI cruzam com o de NDVI, que mostraram valores mais próximos a -1, indicando baixa composição da massa vegetada.

Na imagem do dia 30/07/1991 (**Figura 5.17**) foi notado uma expansão na área com índices entre -0,07 e 0,35, indicando um aumento na área construída. Da mesma forma que nos anos 80, a área não urbana apresentou índices relativamente próximos a 1, remetendo a questão da superfície da região. A imagem que representa os anos 90 é

de um período do ano mais seco (inverno), e, como já ressaltado, o IBI é composto por índices que representam vegetação e água, podendo ter alteração sazonal em seus aspectos da cobertura do solo.

Na imagem do dia 23/03/2010 (**Figura 5.18**) foram notadas novas área com índices mais próximos a 1, denotando outro avanço da área urbana. Nos anos de 2010 (**Figura 5.19**) também foi possível perceber não só o avanço da área urbana, como a intensificação dela, mostrada pelos espaços que antes correspondiam à índices entre -0,25 e -0,01, e que passaram -0,07 e 0,35.

De acordo com a análise das quatro imagens que geraram os índices de IBI, foi possível perceber uma expansão da área urbana, principalmente entre os anos 90 e 2000.

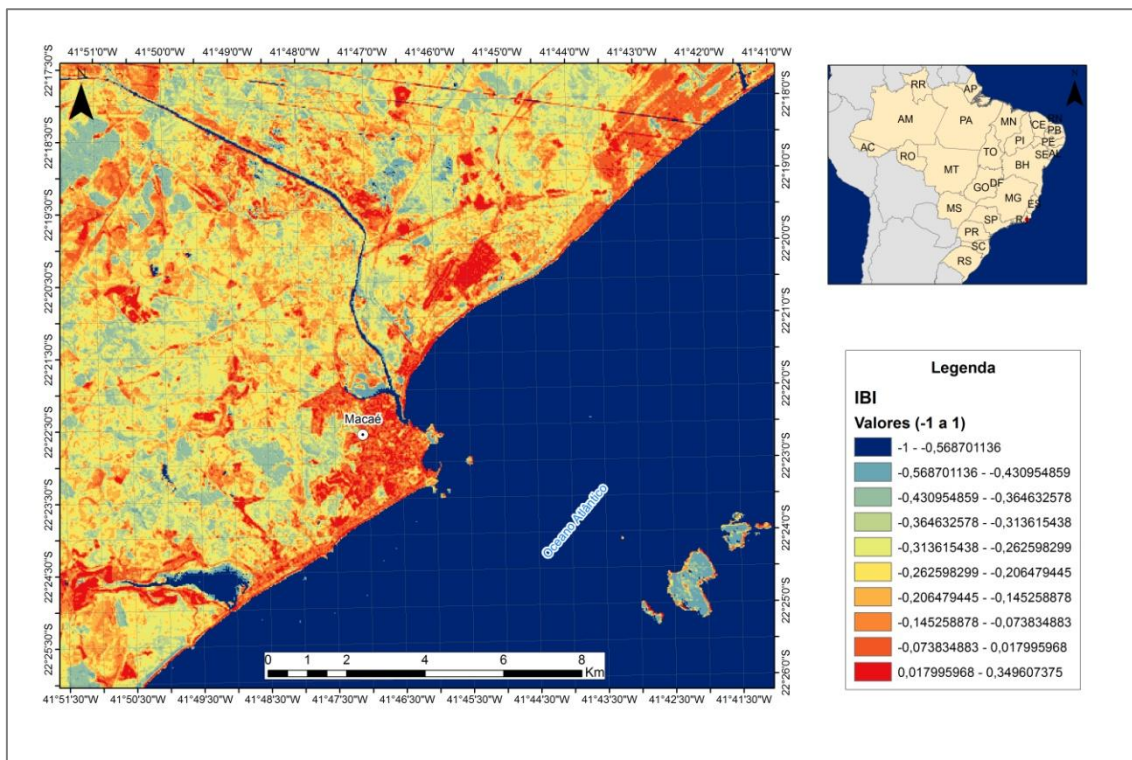


Figura 5.16: Mapa de IBI representando os anos 80.

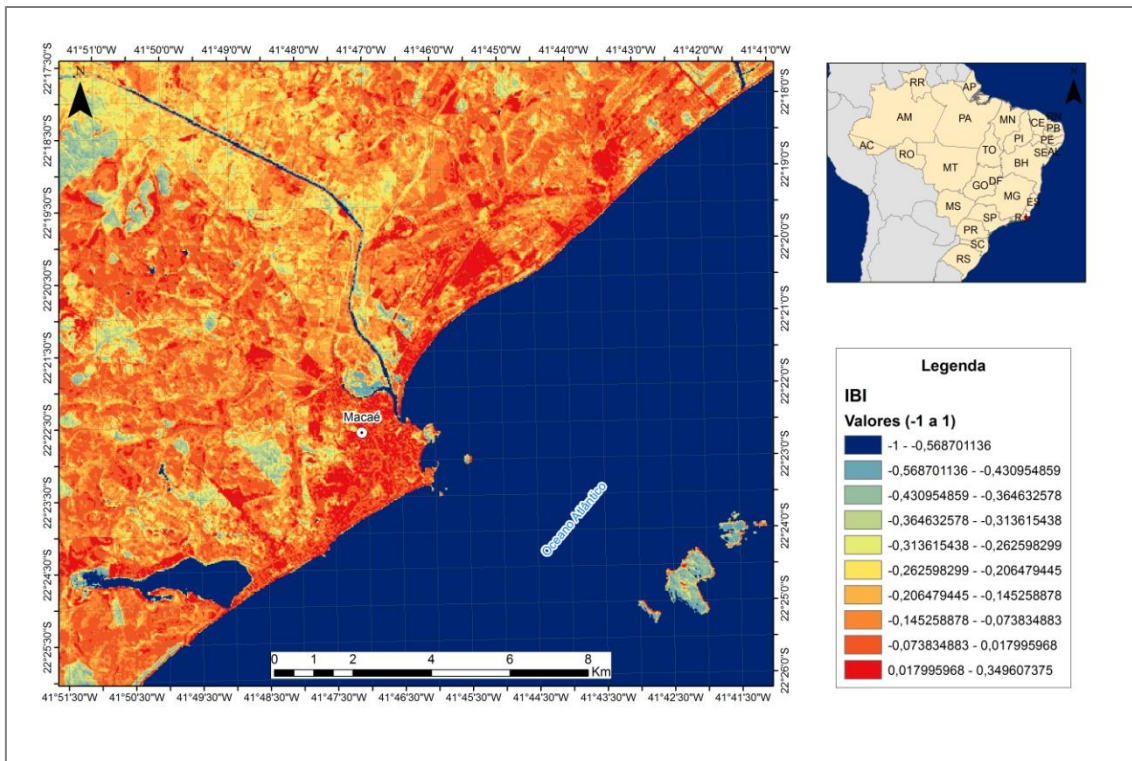


Figura 5.17: Mapa de IBI representando os anos 90.

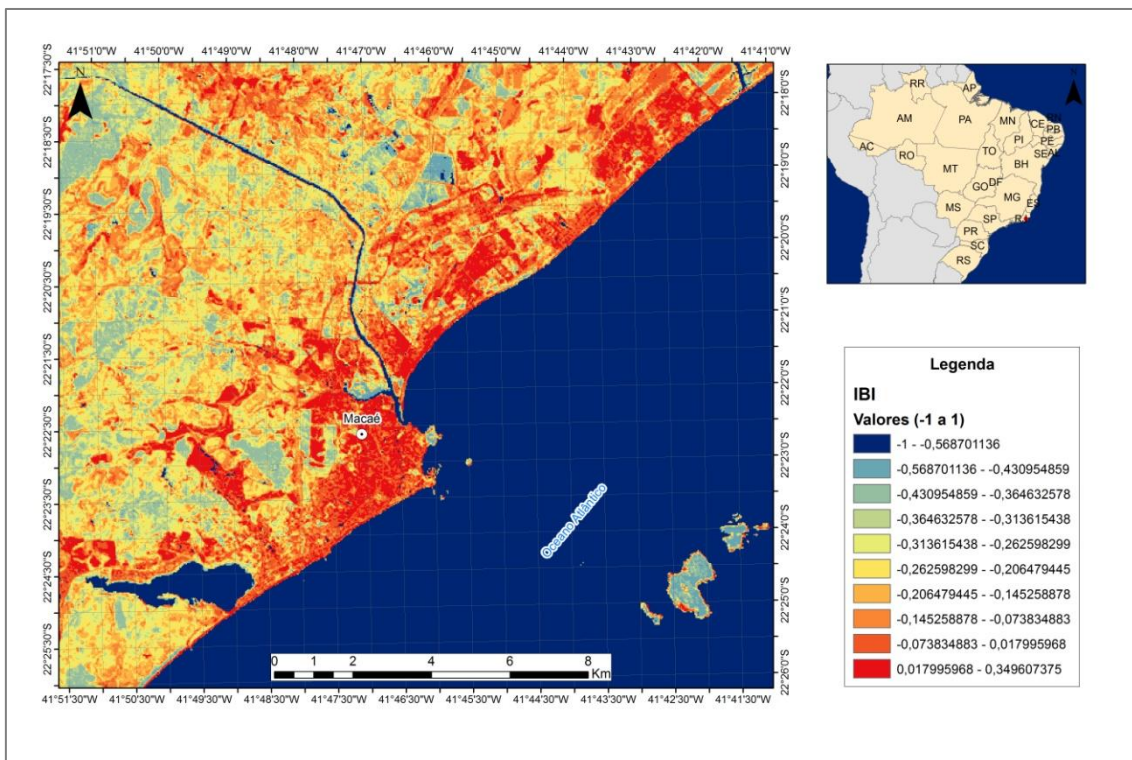


Figura 5.18: Mapa de IBI representando os anos 2000.

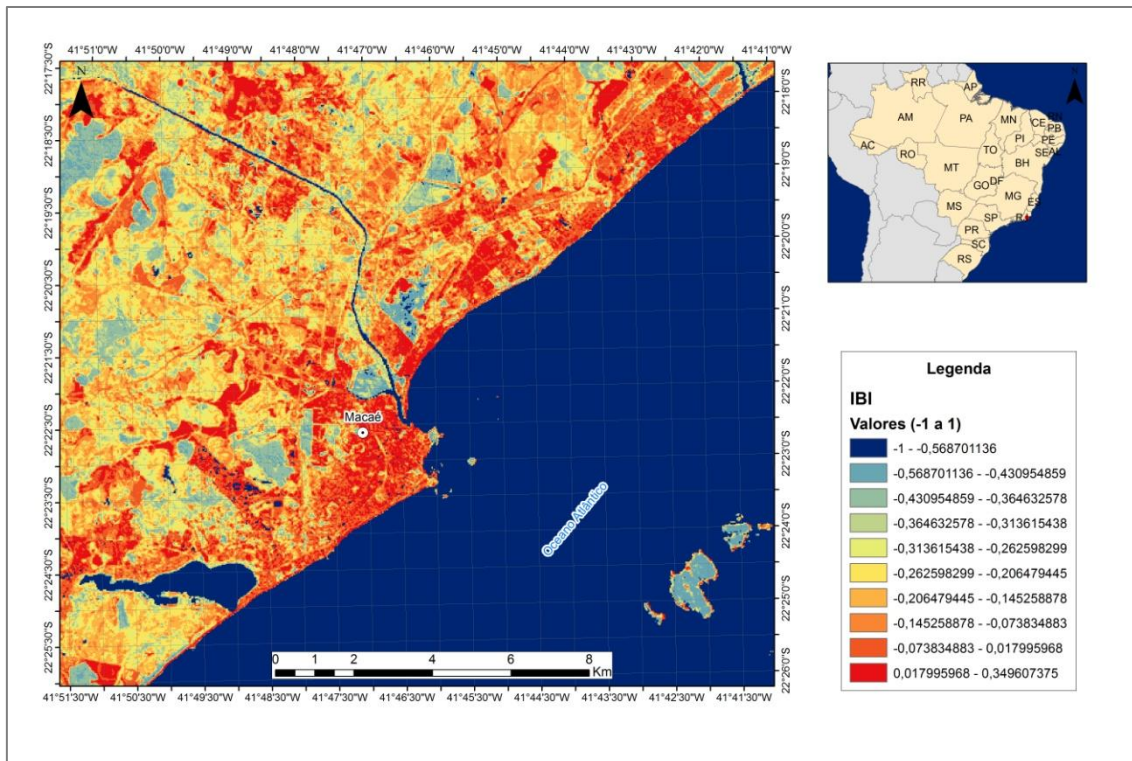


Figura 5.19: Mapa de IBI representando os anos de 2010.

5.5. A TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo, e com os índices NDVI e IBI

Os resultados mostraram uma correlação da TSC com o uso e cobertura do solo, principalmente nas imagens que representam os anos 2000 e 2010. Na imagem de 23/03/1985 as maiores TSCs se concentraram no único núcleo urbano considerado para a época (**Figura 5.20**), em parte da costa litorânea norte de Macaé (essa região também mostrou resposta correspondente para o NDVI e IBI), e em áreas mais espaçadas do mapa. Vale ressaltar que a região da costa norte apresenta cobertura do solo correspondente à cordões arenosos, o que justifica as altas temperaturas identificadas nessa região. Na imagem de 1991 (anos 90), as áreas consideradas não urbanas que apresentaram temperaturas maiores foram identificadas ao longo de quase toda costa litorânea de Macaé, e, também, nas áreas consideradas vegetadas (**Figura 5.21**). Para as imagens de 2005 e 2010 a TSC apresentou boa resposta com relação ao uso urbano, ou seja, as áreas onde predominaram as maiores TSCs estão dentro dos polígonos classificados como “urbano” (**Figura 5.22 e Figura 5.23**). Ainda nos anos de 2005 e 2010, focos com temperaturas abaixo de 24°C foram identificados dentro dos polígonos

das áreas “urbana de alta densidade” e “urbana de média densidade”, sendo pontos favoráveis à ilha de frescor.

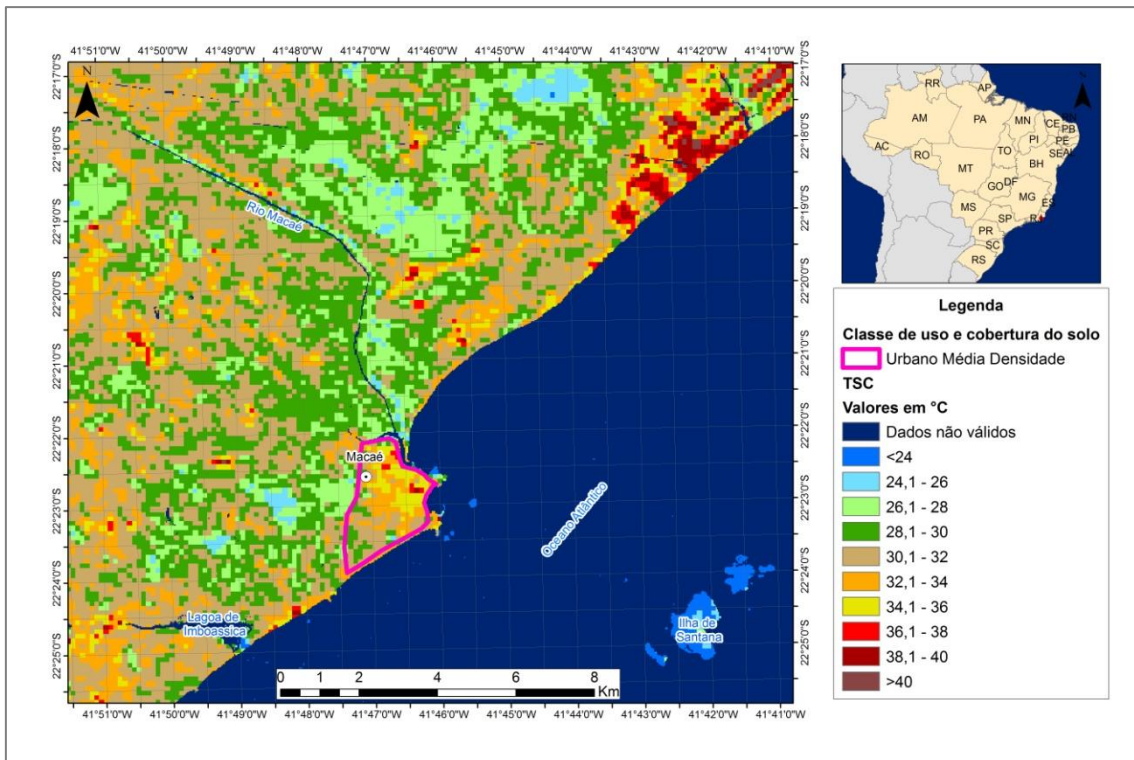


Figura 5.20: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 23/03/1985).

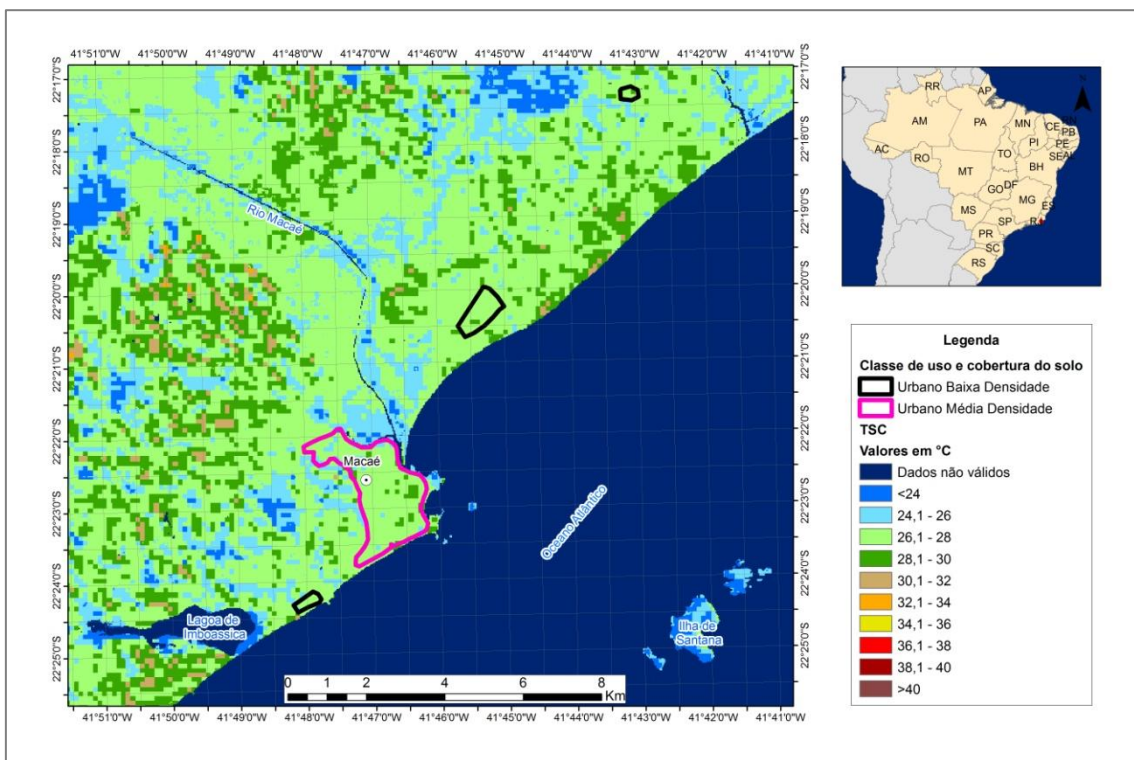


Figura 5.21: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 30/07/1991)

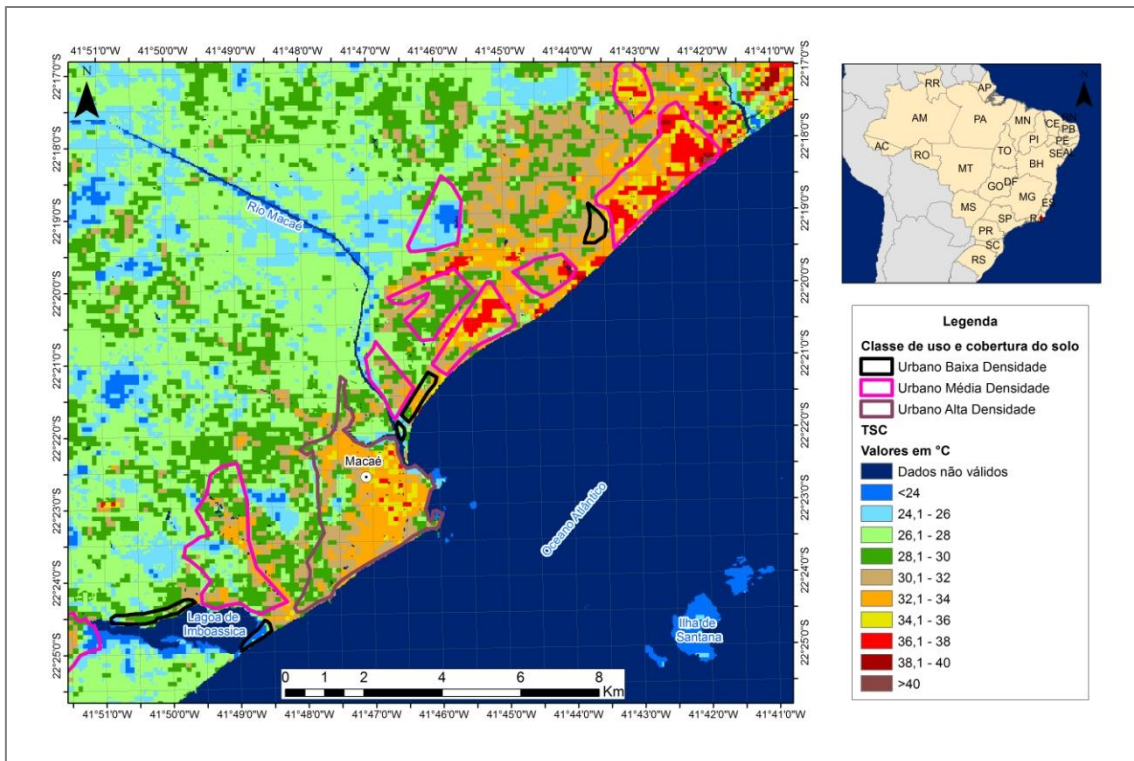


Figura 5.22: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 09/01/2005)

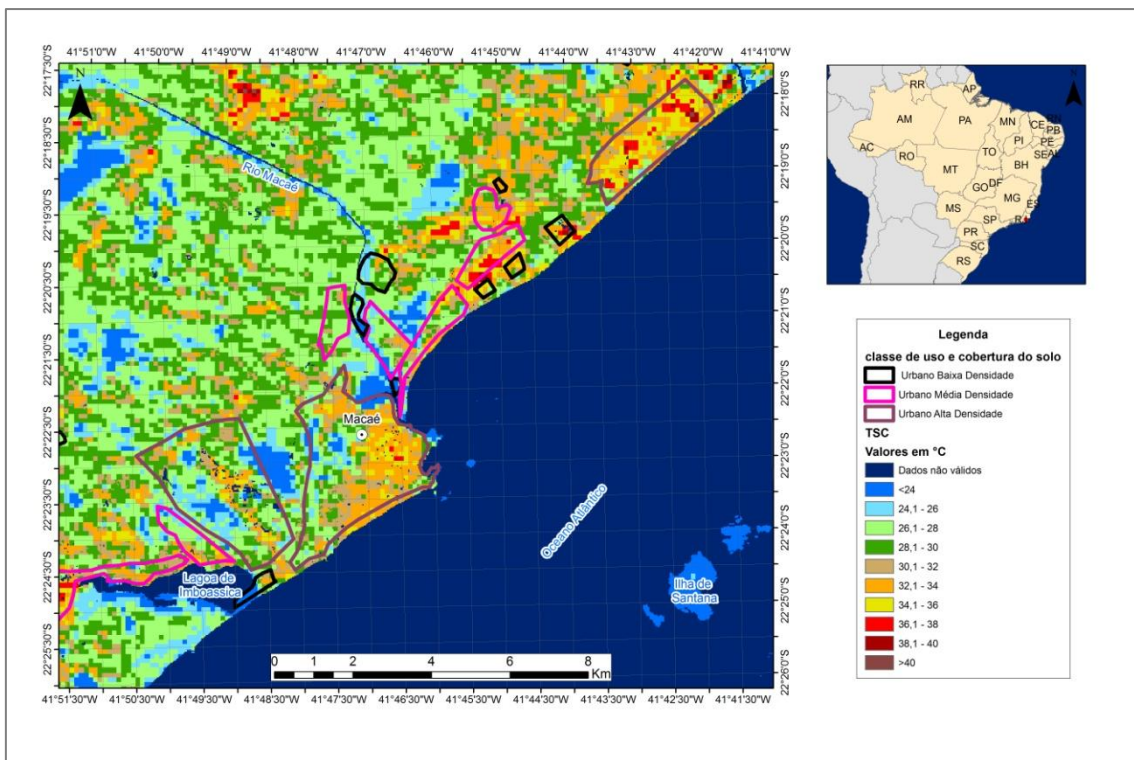


Figura 5.23: Mapa de TSC e sua relação com o uso e cobertura do solo (imagem do dia 23/03/2010)

A TSC apresentou boa correlação com o NDVI e com o IBI para as imagens analisadas, destacando o avanço da área áreas urbanas. Os Maiores valores de TSC na área urbana corresponderam aos índices mais próximos a -1 (para o NDVI), indicando área menos vegetada, e índices mais próximos a 1 (para o IBI), indicando área com mais construção, ou seja, as os índices se cruzaram. Da mesma forma, para as áreas não urbanas as TSCs mais altas correspondiam aos índices mais próximos a -1 (para o NDVI) e índices próximos a 1 (para o IBI). Na imagem do dia 30/09/1991 o IBI, as áreas não urbanas apresentaram o predomínio dos índices entre -0,02 e -0,01. Essa é a única imagem desse estudo referente ao inverno, o que pode estar relacionado com a resposta espectral diferente com relação as demais imagens (que são no verão), além das características físicas da superfície sofrerem alterações devido a sazonalidade.

A melhor resposta para expansão da área urbana diante das imagens analisadas foi obtida através do NDVI, pois a retração de áreas vegetadas foi mais perceptível do que a variação da TSC (no tempo e no espaço) e do IBI. O uso e cobertura solo apresentaram boa correlação com a TSC, NDVI e IBI, principalmente para as áreas urbanas. Isso porque as áreas não urbanas foram classificadas com apenas uma classe de “vegetação”, o que pode ter mascarado/ocultado as diferentes formas com que a vegetação, e toda sua diversidade de cores e formas, dá a sua resposta espectral.

CAPÍTULO 6 – Considerações finais

A cidade de Macaé é um espaço favorável às transformações ambientais, e, nos últimos vinte anos, sofreu mudanças em sua morfologia urbana, além de se destacar como um importante polo econômico para o estado do Rio de Janeiro e para o país. As análises feitas através das imagens de satélite indicam que o espaço urbano de Macaé é favorável à ocorrência de ilhas de calor, e que, por menor que seja a alteração no uso e ocupação do solo, alterações na TSC podem ser percebidas. A maior parte do município de Macaé não é urbanizado, mas com diferentes particularidades em sua cobertura, refletindo em suas respostas espectrais de forma parecida para todos os índices utilizados nesse trabalho.

O sensoriamento remoto foi adotado neste trabalho para analisar a TSC, o NDVI e o IBI no tempo e no espaço, sendo de grande valia para os objetivos que geraram esta

pesquisa. Através das imagens do Landsat 5 foi possível mapear um episódio de TSC para 4 períodos diferentes ao longo de 30 anos, apoiado na análise do NDVI, IBI e no uso e cobertura do solo.

A análise integrada dos mapas gerados de uso e cobertura do solo, TSC, NDVI e IBI mostrou, para os episódios datados, que a área urbana de Macaé avançou ao longo da costa litorânea do município. As áreas urbanas do litoral norte e a região central mostraram-se mais quentes em todos os episódios analisados, sendo encontradas temperaturas superiores a 40°C, salientando-as como favoráveis à ilha de calor. No episódio analisado no inverno (imagem de 30/07/1991) foi observado que grande parte da área não urbana apresentou temperaturas entre 28,1 e 32°C (em áreas maiores do que às da área urbana). Pontos localizados na área “urbana de alta densidade” e “urbana de média densidade” foram identificados como favoráveis à formação de ilhas de frescor, onde foram encontradas temperaturas menores que 24°C.

Os valores de vegetação, NDVI, e de área construída, IBI, foram fundamentais para a análise dos episódios, pois mostraram que as áreas com TSC mais elevada correspondiam às áreas com resposta de massa vegetal menos densa e com maior indicador de área construída. O IBI apresentou uma diferença de comportamento na imagem de 1991, o que pode ser levado em conta por ser a única imagem do período de inverno e apresentar alteração sazonal na resposta espectral de seus componentes (NDVI, NDWI, NDBI). Ou seja, é importante destacar que o NDVI e o IBI foram imprescindíveis à análise da TSC para demonstrar uma expansão da área urbana e áreas favoráveis à ilha de calor, principalmente na correlação temporal, já que não foram realizadas médias e estatísticas para as décadas. O mapeamento do uso e cobertura do solo da área urbana, através de polígonos vetorizados foi muito útil para demonstrar os pontos mais quentes nas imagens, identificados nas áreas mais urbanizadas. A área urbanizada de Macaé é considerada pequena, o que facilitou na vetorização manual permitindo um resultado satisfatório, principalmente quando comparados com imagens de satélite (*Google Earth*).

No presente estudo foi possível analisar a expansão da área urbana através do mapeamento de uso e cobertura do solo. Embora a divisão de classes tenha sido simples, foi possível identificar uma mudança no espaço geográfico e perceber que a área de estudo apresenta muito mais peculiaridades do que o esperado, trazendo

reflexões e novas indagações sobre as características ambientais da região. A indústria petrolífera foi instalada em Macaé a partir dos anos 70, e trouxe consigo novas formas para a cidade. Formas essas como a criação de vias de circulação, construção de lotes e bairros, toda uma rede de serviços para atender a demanda e necessidades desta indústria, além de despontar a economia da cidade.. A população de Macaé cresceu de 74.000 habitantes em 1974 para 206.728 mil em 2010, fato que ocorreu devido à magnitude econômica da indústria do petróleo na região. Em comparação ao crescimento demográfico das cidades ao seu redor, Macaé ainda cresce em ritmo acelerado, com altas taxas que tendem a permanecer devido às recentes descobertas de novas reservas na Bacia de Campos. (TERRA & RESSIGUIER, 2010)

Para poder quantificar a ilha de calor na região de Macaé, bem como analisar uma evolução na temperatura do ar seria necessário obter dados de estações meteorológicas, fato que deixou a desejar desde o início da pesquisa, devido à base de dados apresentar muitas falhas e períodos curtos de registro. As imagens de satélite também apresentaram um quadro problemático para este trabalho, visto que, quase todas as imagens apresentaram cobertura de nuvens e ruídos, dificultando ainda mais a obtenção dos resultados. Com isso, a realização de testes estatísticos para verificar o comportamento da TSC ao longo dos anos e mensurar a ilha de calor ficou impossibilitada. Esse estudo não avaliou os diferentes tipos de solos e a condução de calor neles, o que também agregaria às informações e análises da TSC. Outra base de informação que não foi utilizada neste trabalho, não obstante de sua importância, foram as cartas sinóticas dos dias episódio analisados, bem como análises sobre a climatologia local. Ressalta-se com isso a importância da base de dados e análise estatística dos mesmos para se obterem resultados mais profundos.

Mesmo com todas as dificuldades na obtenção de base de dados para uma análise quantitativa dos resultados, esse trabalho mostrou o crescimento de uma cidade média de grande importância econômica, e sua correlação com as transformações no espaço, seja para a vegetação, temperatura ou áreas edificadas, e apontou as áreas favoráveis à ilha de calor, ainda que de forma qualitativa. Sendo assim, essa pesquisa deixa, além de seus resultados qualitativos, algumas indagações que podem gerar outros trabalhos, como uma análise da base de dados dos últimos 10 anos e comparações com imagens de satélites; mapeamento detalhado do uso e cobertura do solo, sobretudo, em obter mais classes vegetais; condutibilidade do solo e respostas da TSC, entre outros..

Áreas com grande adensamento populacional e intensas áreas edificadas podem gerar respostas negativas à sociedade, não só com problemas relativos à ilha de calor, mas outros como a impermeabilização do solo, que deflagram enchente, ocupações irregulares em área de preservação permanente, movimentos de massa, entre outros tantos que, em inúmeros eventos, dissipam vidas. Em tempo, é importante destacar a importância de um planejamento urbano, não só para as grandes cidades, quanto para as médias e pequenas, com intuito, de amenizar impactos ambientais, e proporcionar qualidade de vida para seus habitantes.

Referências bibliográficas

AMORIM, M, C, C.; ILHAS DE CALOR EM BIRIGUI/SP. Revista Brasileira de Climatologia, Vol. 1, No 1. 2005.

AMORIM et al.;Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). Revista Franco-Brasileira de geografia. V 7. 2009.

AMORIM, R. F. C.; CARVALHO, F. O. “Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas”. Revista Brasileira de Meteorologia, vol.27, n. 3, p. 347-354. 2012.

ANDRADE, L. L. et al.; Análise comparativa do fenômeno Ilha Urbana de Calor no verão e inverno por meio de dados termais do satélite Landsat 5 em São José dos Campos SP. In: X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação Universidade do Vale do Paraíba, 2006, Sao José dos Campos. X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação Universidade do Vale do Paraíba, 2006. p. 1819-1822.

ANDRADE, A. R. *et al*; “Análise do campo térmico da cidade de Irati/PR: Primeiros experimentos para definição do clima urbano”. Revista Brasileira de climatologia. Ano 6. V. 6. Jun, 2010.

ANDRADE, L. L. *et al*; Estudo de ilhas de calor na cidade de São José dos Campos utilizando o canal infravermelho termal do Landsat-5 e o aerotransportado HSS. In: XIII Simpósio de sensoriamento remoto. INPE. p 473-480. Florianópolis – SC. 2007.

AYOADE, J.O. Introdução à climatologia para os trópicos. 2ª Edição. Ed. Bertrand Brasil S.A. Rio de Janeiro, 1988. 332 p.

ECOLOGY BRASIL. 2012. Estudo Integrado da Bacia Hidrográfica do rio Meia Ponte. Rio de Janeiro.

BARBOSA, L. G; “Os impactos econômicos do turismo e sua implicação nas políticas públicas: o caso do município de Macaé-RJ, Brasil”. In: VII Congresso Internacional del CLAD sobre la Reforma del Estado y de la Administración Pública, Lisboa, Portugal, 8-11 Oct. 2002.

BARGAOUI, Z. K; CHEBBI, A; “Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall”. **Journal of Hydrology**, v.365, n. 1-2,p. 56-73, 2009. IN: WANDERLEY, H. S.;

BRANDÃO, A. M. P. M. O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro. 1996. 362 p. Tesede doutorado. Departamento de Geografia, FFLCH/USP. São Paulo.

CACHO-LIMA, R; ANUNCIACÃO, V. S; “Estudos da formação de ilhas de calor na cidade de Campo Grande/MS, utilizando técnicas de sensoriamento remoto”. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, Viçosa - MG.

CAMARGO, F. F. *et al.*; Análise temporal do revestimento do solo e suas implicações na modificação do campo térmico da área urbana do município de Campo Grande, MS, no período de 1988 a 2003. 1º Simpósio de geotecnologias do Pantanal. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.575-584. Campo Grande – MS. 2006.

CARVALHO, T. *et al.*; 2010. Impactos sociais, ambientais e urbanos das atividades petrolíferas: o caso de Macaé. Cap. 2-6: Thereza Carvalho e cols. - Pag220.

CASTRO, S. B.; & CARVALHO, T. M. 2009. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo - GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Scientia Plena 5, 025401.

CEPSRM – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Sensores e plataformas orbitais – Landsat. Dinâmica para aprendizado de sensoriamento remoto. UFRS. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/sensores.html>>. Acesso: fev,2015.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L., HELDER, D. L.; 2009. “Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors”. Remote sensing of environment, vol. 113, PP. 893-903.

CHEVAL, S.; DUMITRESCU, A.; BELL, A. 2009. The urban heat island of Bucharest during extreme high temperature of July 2007. TheorApplClimatol 97:391-401. Dóí:101007/s00704-008-0088-3.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. 1º edição. São Paulo: Blucher, 1999.

DIAS, R. S; “A formação de uma aglomeração industrial em Macaé, rj: uma caracterização da espacialidade da indústria petrolífera e seus impactos no espaço Urbano macaense e sua região de entorno”. 2005. Dissertação de mestrado. CEFET-Campos. Campos dos Goytacazes.

FEITOSA, S. M, R. *et al.*; “Consequências da urbanização na vegetação e na temperatura da superfície de Teresina – Piauí”. 2011, v.6, n.2, p.58-75.RevsBau, Piracicaba – SP.

FERREIRA, M. I. P; *et al.*; “A sociedade do hidrocarboneto: o ônus do aquecimento econômico gerado pela cadeia produtiva do petróleo e gás em Macaé-RJ”. In: Herculano S. “Impactos sociais, ambientais e urbanos das atividades petrolíferas: o caso de Macaé”. Niterói; 2010.

PEREIRA FILHO, A. J. . Chuvas de verão e as enchentes na Grande São Paulo: El Niño, brisa marítima e ilha de calor. In: II Seminário Brasileiro de Hidrometeorologia, 2000, Rio de Janeiro. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro : Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000.

FREITAS, E. D; DIAS. P. L.S; “Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor”. 2005.Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, 355-366. Departamento de Ciências Atmosféricas/USP.

GARTLAND, L. Heat islands: understanding and mitigating heat urban areas. Published by Earthscan. UK and USA. 2008. 215p.

GRIMMOND, C.S.B., 2006, “Progress in measuring and observing the urban atmosphere”, Theoretical and Applied Climatology. vol. 84, pp. 3-22;

HOLZ, S; LORENA, R. B.; MARCHIORO, E; 2012. O uso de sensoriamento remoto para análise do campo térmico da superfície urbana completa do município de Vitória (ES). Revista Geonorte. v.2, n.4, p.1674. 1682. Disponível em: [http://www.revistageonorte.ufam.edu.br/attachments/009_\(O%20USO%20DE%20SENSORIAMENTO%20REMOTO%20PARA%20ANALISE%20DO%20CAMPO%20T%3%89RMICO%20DA%20SUPERF%3%8DCIE%20URBANA%20COMPLETA%20DO%20MUNIC%3%8DPPIO%20DE%20VIT%3%93\).pdf](http://www.revistageonorte.ufam.edu.br/attachments/009_(O%20USO%20DE%20SENSORIAMENTO%20REMOTO%20PARA%20ANALISE%20DO%20CAMPO%20T%3%89RMICO%20DA%20SUPERF%3%8DCIE%20URBANA%20COMPLETA%20DO%20MUNIC%3%8DPPIO%20DE%20VIT%3%93).pdf). Acesso: set, 2013.

HOMAR, V; Ramis, C; ROMERO, R.; ALONSO, S. 2010. Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain). Climchange 98:199-211. Dóid:10.1007/s10584-009-9664-5.

HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., FERREIRA, L. G., 2002. “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices”. Remote Sensing of Environmet. Vol. 83, PP. 195-213. IN: LUCENA, A. J; A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. 2012. 319 p. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

IBGE – Instituto Brasileiro de geografia e estatística. Censo demográfico 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=330240&idtema=1&search=rio-de-janeiro|macae|censo-demografico-2010:-sinopse->>> .Acesso:em Nov, 2014.

IMPA – Instituto de Matemática Pura e Aplicada. O que é Matlab. Disponível em: <http://w3.impa.br/~zubelli/tutorial/node1.html>. Acesso: jun, 2015.

INEA – Instituto estadual do Ambiente. Base temática - O estado do ambiente. Shapes. O estado do Ambiente. Publicações. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/EstudosePublicacoes/Publicaes/EstadoAmbiente/index.htm&lang=>>>. Acesso: mai, 2015.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas do Brasil – 1961-1990. Brasília. 2009

IQIBAL, M., 1983. An introduction to solar radiation. Library of Congress Cataloging in Publication data, Academic Press Canadian. In: LUCENA, A. J; A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. 2012. 319 p. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- LEAL, G. C. S. G; ET AL; O Processo De Industrialização E Seus Impactos No Meio Ambiente Urbano. QUALIT@S Revista Eletrônica. ISSN 1677-4280 V7. n. 1. 2008.
- LIU, K. N. 2002. An Introduction to Atmospheric Radiation. International Geophysics Series, V 84, 583p. Academic Press. New York.
- LOMBARDO, M. A. Ilhas de Calor nas Metrôpoles: o caso de São Paulo. São Paulo: HUCITEC, 1985.
- LORENA, R. B; MARCHIORO, E; HOLZ, S; Análise do campo térmico da área urbana do município de Vitória através de dados de sensoriamento remoto. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu – PR. 13 a 18 de abril de 2013.
- LUCENA, A. J; A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. 2012. 319 p. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- MADRUCCI, V.; TAIOLI, F.; ARAÚJO, C.C. 2005. Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia – SP. Rev. Bras. Geof. vol.23 no.4 São Paulo Oct./Dec.
- MARIANO, J. B.; Impactos Ambientais do refino do Petróleo. 2001.VII, 216 p. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- MARQUES, M. A. Qualidade de vida no município de Macaé-RJ: Análise por geoprocessamento. 2008. Tese de Doutorado. IGEO/ PPGG, UFRJ, Rio de Janeiro.
- MARTINS, L. G. 2012. Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana. Dissertação de mestrado. São Carlos, Universidade de São Paulo, SP
- MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G. 2008. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia. Sociedade & Natureza, Uberlândia, 21 (1): 5-18.
- MENDONÇA, F., DANNI-OLIVERIA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. Editora Oficina de texto. São Paulo. 206p. 2007.
- MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. Clima Urbano. São Paulo: Contexto, 2003. 192 p.
- MORAES, N. O. ; PIMENTEL, L. C. G. ; Marton, E. . Simulações Numéricas da Formação de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.. Anuário do Instituto de Geociências/UFRJ, Universidade Federal do RJ, v. 28 2, p. 116-138, 2005.
- MOREIRA, E. B. M.; GALVÍNCIO, J. D.; Análise multitemporal da ilha de calor urbana na cidade do Recife, através de imagens do Landsat TM-5. XIV Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. Natal, Brasil. UFPE. INPE, p. 1441-1448. 2009

- NASCIMENTO, D. T. F; SOUZA, S. B; OLIVEIRA, I. J; 2009. A relação entre os valores de temperatura superficial terrestre (TST), o uso e cobertura do solo e a topografia no município de Minaçu-go (2001).Laboratório de processamento de imagens e geoprocessamento. UFG. Goiás.
- NUPEM-UFRJ. 2015. Carta das águas de Macaé. Contribuição da NUPEM/UFRJ para a governança dos recursos hídricos do município de Macaé.
- OKE, T. R. 1987. Boundary layer climate, 2nd end. Routledge, London.
- OKE, T. R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote sensing of environment, New York, v. 86, n. 3, p. 371–384.
- OLESON, K. W; BONAN, G. B; FEDDEMAB, J; JACKSON, T. 2011. An examonation of urban heat island characteristics in a global climate model. Int J Climatol 31 (12): 1848-1865. Dói:10.1002/joc.2201.
- PEREIRA FILHO, A.J; SANTOS, P.M; XAVIER, T. M. B. S.; Evolução do tempo e do clima na região metropolitana de São Paulo. São Paulo. Linear B; IAG/USP.
- PIQUET, R. Impactos da Indústria do Petróleo no Norte Fluminense. Trabalho Apresentado na Oficina sobre Impactos Sociais, Ambientais e Urbanos das Atividades Petrolíferas – o caso de Macaé (RJ), UFF, Niterói, entre 7 e 9 de dezembro de 2010.
- PITTON, S. E. C. As cidades como indicadoras de alterações térmicas. Tese de doutorado. São Paulo, Departamento de geografia, FFLCH da USP, 1997.
- QIN Z, KARNIELI A & BERLINER P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. International Journal of Remote Sensing, 22(18): 3719–3746. IN: SOUZA, J. D., SILVA, B. B., 2005. “Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem de Landsat 5”. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 23, n.4, PP. 349-358.
- Rao, P. K. (1972). Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. Bulletin of the American Meteorological Society, 53,647– 648.
- RICCOMINI, C. CRÓSTA, A. P.1988.Análise preliminar de lineamentos em imagens de sensores remotos aplicada à prospecção mineral na area dos granitóidesMandira, SP. Bol. IG-USP, Sér. Cient. v.19 São Paulo.
- RIZWAN A. M., DENNIS LYC., LIU C (2008). A Reviw on the generation, determination and mitigation of urban heat island. J Environ Sei. 20:120-128. Dói:10,1016/S1001-0742(08)60019-4.
- RUDORFF, B. F. T.; Produtos de sensoriamento remoto. Divisão de sensoriamento remoto. INPE. São José dos Campos-SP. Disponível em: <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm#top>. Acesso: Set, 2013.

SOUZA, F. T., Predição de escorregamentos das encostas do município do Rio de Janeiro através de técnicas de mineração de dados. 2004. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SOUZA, J. D., SILVA, B. B., 2005. “Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem de Landsat 5”. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 23, n.4, PP. 349-358.

SOUZA, S. B; FERREIRA, L. G.«Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002 – 2011) », *Confins* [Online], 15 | 2012, posto online no dia 23 Junho 2012, consultado o 27 Fevereiro 2015. URL : <http://confins.revues.org/7631> ; DOI : 10.4000/confins.7631

TARIFA, J. R. Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São José dos Campos (SP, Brasil). *Geografia*, 2 (4): 59-80, 1977.

TERRA, D. RESSIGUIER, J. H. Mudanças no Espaço Urbano de Macaé: 1970-2010. Artigo Rio de Janeiro: Instituto de Ciências Humanas e Filosofia (ICHF) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Oficina sobre Impactos Sociais, Ambientais e Urbanos das Atividades Petrolíferas: o caso de Macaé (RJ), realizada em Niterói, entre 7 e 9 de dezembro de 2010.

VEIGA, T. C. Um estudo de geoplanejamento para o município de Macaé – RJ e seu entorno: Contribuição do geoprocessamento na identificação de potencial turístico. 2002. 319 p. Tese de Doutorado. IGEO/ PPGG, UFRJ, Rio de Janeiro.

VOOGT, J. A., OKE, T. R., 2003, “Thermal remote sensing of urban climates” *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, pp. 370-384;

WANDERLEY, H. S; AMORIM, R. F. C; CARVALHO, F. O;2012. “Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol.27, n. 3, p. 347-354.;

WEBER, A. C.; *Evolução Petrolífera: Impactos No Atual Modelo Brasileiro*. In: 3º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás. Instituto brasileiro de petróleo e gás (IBP). 2005. Salvador – BA.