



ANÁLISE DA PAISAGEM COM SUPORTE DE GEOTECNOLOGIA COMO
SUBSÍDIO PARA A GESTÃO URBANO-HÍDRICA – ESTUDO DE CASO: BACIA
DO RIO PIABANHA/RJ

Alline Gomes Lamenha e Silva

Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho
Leonardo de Faria Peres

Rio de Janeiro
Dezembro de 2014



ANÁLISE DA PAISAGEM COM SUPORTE DE GEOTECNOLOGIA COMO
SUBSÍDIO PARA A GESTÃO URBANO-HÍDRICA – ESTUDO DE CASO: BACIA
DO RIO PIABANHA/RJ

Alline Gomes Lamenha e Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
Leonardo de Faria Peres

Rio de Janeiro
Dezembro de 2014

ANÁLISE DA PAISAGEM COM SUPORTE DE GEOTECNOLOGIA COMO
SUBSÍDIO PARA A GESTÃO URBANO-HÍDRICA – ESTUDO DE CASO: BACIA
DO RIO PIABANHA/RJ

Alline Gomes Lamenha e Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Leonardo de Faria Peres, D.Sc.

Prof. Gutemberg Borges França, Ph.D.

Prof.^a Heloisa Teixeira Firmo, D.Sc.

Dr. José Otávio Goulart Pecly, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2014

Silva, Alline Gomes Lamenha e

Análise da paisagem com suporte de geotecnologias como subsídio para a gestão urbano-hídrica – Estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ / Alline Gomes Lamenha e Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XXI, 181 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Leonardo de Faria Peres

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 173-178.

1. Geotecnologias. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Temperatura Superficial Continental. 4. Índice de Vegetação. 5. Dados Censitários. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria das Graças e Antonio Carlos, e à minha irmã, Danielli, pelo amor incondicional e pelas lições de caráter e superação que me guiam em cada conquista.

Às minhas avós, Elisabeth, pelo exemplo de doação de si e compaixão, e Rosiete, exemplo de força e pela prova empírica de que a educação é o caminho que nos permite vislumbrar um futuro melhor para nossas crianças e, em consequente, para nosso país.

Aos tios e tias, primos e primas, pela incansável torcida.

Ao Celso, pelo carinho e paciência de todos esses anos.

Aos amigos Aline, Gabi, Hέλvio, Manu, Pedro Lucas, Larissa, Filipe, Bebel, Danúbia, Rafael e Marília, pelos momentos de descontração e por terem sido minha família aqui no Rio de Janeiro. Aos queridos amigos maceioenses, por não entenderem minha quase interminável ausência, querendo-me junto para compartilhar todos bons momentos dos quais optei por abrir mão ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Tati, Mário, Cássio, Fábio, Jacira e Walison, pelas valiosas conversas e pelo apoio acadêmico.

Aos funcionários da secretaria do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, pelo suporte técnico-administrativo durante o período de realização desta dissertação.

Aos meus orientadores, professores Otto Corrêa Rotunno Filho e Leonardo de Faria Peres, pelo apoio, dedicação e inspiração necessários à conclusão deste trabalho.

Aos professores da COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos e pelo grande desenvolvimento profissional que me proporcionaram. Aos eternos mestres da UFAL, pela contribuição dada à minha formação.

Às referências personificadas nas figuras do Vinícius Rios Barros e do Francisco Albuquerque, pela prontidão em ajudar e pelas contribuições. À equipe do Laboratório de Meteorologia Aplicada – LMA – IGEO/UFRJ, em especial ao Vitor, pela ajuda nas medições de campo. Ao Rodrigo e ao Partick (??), pela ajuda no FORTRAN. Que o futuro reserve pessoas com igual presteza em seus caminhos.

À CAPES, pela bolsa de estudos a mim concedida durante o primeiro ano de formação acadêmica de mestrado.

Agradeço ainda o suporte da FAPERJ pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE - FAPERJ 014/2010 (2010-2012), FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012, FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) –E-26/010.002980/2014 e ao CNPq

Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 bem como à Secretaria de Educação Superior (SESu) – Ministério da Educação (MEC) - FNDE – Programa de Educação Tutorial - PET CIVIL UFRJ, à CPRM, à ANA, à EMBRAPA, ao CEPEL, ao ONS e ao INMET, pelo contínuo apoio à pesquisa científica no Brasil e pelo fornecimento de dados, e ainda ao INPE, à ESA, à NASA e à NOAA, pelo fornecimento de imagens de sensoriamento remoto, que viabilizaram o suporte e a divulgação de resultados desta pesquisa em eventos da comunidade científica.

À equipe da GESP/INEA, em nome da Vanessa, pelo incentivo para a concretização deste trabalho.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Essa rua sem céu, sem horizontes
Foi um rio de águas cristalinas
Serra verde molhada de neblina
Olho d'água sangrava numa fonte
Meu anel cravejado de brilhantes
São os olhos do capitão Corisco
É a luz que incendeia meu ofício
Nessa selva de aço e de antenas
Beija-flor estou chorando suas penas
Derretidas na insensatez do asfalto

Mas

Eu tenho um espelho cristalino
Que uma baiana me mandou de Maceió
Ele tem uma luz que me alumia
Ao meio-dia clareia a luz do sol

Que me dá o veneno da coragem
Pra girar nesse imenso carrossel
Flutuar e ser gás paralisante
E saber que a cidade é de papel
Ter a luz do passado e do presente
Viajar pelas veredas do céu
Pra colher três estrelas cintilantes
E pregar nas abas do meu chapéu
Vou clarear o negror do horizonte
É tão brilhante a pedra do meu anel

Alceu Valença, *Espelho Cristalino*.

Dedico este trabalho aos brasileiros e às brasileiras cujo direito à educação foi negado. Que a Ciência seja nosso *espelho cristalino* na busca por dias melhores.

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

ANÁLISE DA PAISAGEM COM SUPORTE DE GEOTECNOLOGIA COMO
SUBSÍDIO PARA A GESTÃO URBANO-HÍDRICA – ESTUDO DE CASO: BACIA
DO RIO PIABANHA/RJ

Alline Gomes Lamenha e Silva

Dezembro/2014

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Leonardo de Faria Peres

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho objetiva a caracterização da evolução da paisagem em seus aspectos físicos e econômico-sanitários como subsídio à gestão urbano-hídrica por meio de geotecnologias, associadas aos dados de sensoriamento remoto e censitários. A unidade de análise admitida foi a bacia experimental do rio Piabanha e sua sub-bacia do rio Quitandinha. Os elementos avaliados a partir de imagens do satélite Landsat-5 foram a cobertura vegetal, a temperatura superficial continental e o índice de umidade do solo. Foram detectadas as mudanças ocorridas na bacia em termos de cobertura vegetal e com a análise adicional dos indicadores de temperatura. A estimativa da temperatura foi intercomparada a partir de valores obtidos com um modelo baseado nas propriedades físicas dos materiais constituintes da paisagem urbana, espacializados a partir de imagem QuickBird, revelando uma correlação entre os dados de 0,64, quando ampliada a escala da imagem Quickbird, e de 0,78 quando reduzida a escala do Landsat-5. Foram simuladas as influências da implantação de telhados verdes e brancos na temperatura da superfície continental da sub-bacia, observando-se uma redução de 0,8 °C na temperatura média da área urbana. Sinergicamente, foi avaliada a inclusão econômico-sanitária da região do Quitandinha com base em dados dos censos de 2000 e 2010, sendo possível, ao final, elaborar diagnóstico para avaliação de cenários de ocupação urbana.

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

LANDSCAPE ANALYSIS USING GEOTECHNOLOGY AS SUBSIDY TO
URBAN AND WATER MANAGEMENT - CASE STUDY: PIABANHA
RIVER WATERSHED/RJ

Alline Gomes Lamenha e Silva

December/2014

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho
Leonardo de Faria Peres

Department: Civil Engineering

The main objective of this work is to characterize the landscape evolution as subsidy to watershed management by means of the support of geotechnology associated with remotely sensed and demographic census data. More specifically, the characterization of physical, economical and health aspects of Piabanha river watershed and its corresponding subbasin Quitandinha river watershed are conducted. The vegetation cover, continental surface temperature and the moisture content of the soil were quantified and assessed temporally. Change detection was developed in terms of vegetation cover and the simultaneous analysis of temperature and vegetation index. The validation of temperature was developed from the spatial estimate based on the physical properties of the constituent materials of the landscape with respect to QuickBird satellite imagery, showing a correlation of 0.64 when Quickbird image scale was enlarged, and 0.78 when the scale of the Landsat-5 satellite was reduced. From this information, it was possible to simulate the influences due to the implementation of green and white roofs in the sub-basin, observing a reduction of 0.8 ° C in the average temperature of the urban area. Synergistically, it was measured the economic-sanitary inclusion index for the Quitandinha region based on censuses of 2000 and 2010, making possible to develop the closing remarks of a diagnostic to evaluate scenarios of urban occupation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Método	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Sensoriamento Remoto Aplicado a Análise da Paisagem	7
2.1.1 Satélites Artificiais	10
2.1.2 Índices de Vegetação	13
2.1.3 Estimativa da Temperatura Superficial	15
2.1.4 Estimativa da Umidade do Solo	17
2.1.5 Detecção de Mudanças	20
2.2 Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano Sustentável.....	23
2.2.1 Telhados Verdes e Telhados Frios (<i>Cool Roofs</i>).....	24
2.2.2 Desenvolvimento Local e Dados Censitários	30
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	32
3.1 Pré-Processamento.....	34
3.1.1 Seleção de Imagens	34
3.1.2 Correção Geométrica.....	34
3.1.3 Calibração Radiométrica ($L\lambda i$).....	35
3.1.4 Refletância Monocromática ($\rho\lambda i$).....	36
3.2 Caracterização da Bacia do Rio Piabanha a partir do satélite Landsat-5.....	37
3.2.1 Índices de Vegetação	37
3.2.2 Determinação da Temperatura de Superfície Continental (TSC).....	37
3.2.3 Índice de Umidade do Solo	41

3.2.4	Detecção de Mudanças	42
3.3	Avaliação da Temperatura na Bacia do Rio Quitandinha a partir das Propriedades dos Materiais Urbanos	46
3.3.1	Temperatura de Superfície Continental a partir das Propriedades dos Materiais	46
3.3.2	Comparação entre TSC a partir das Propriedades dos Materiais e Dados do Satélite Landsat-5	53
3.3.3	Cenário de Projeto para implantação dos Telhados Verdes e Frios	54
3.4	Dados Censitários	55
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIABANHA E SUB-BACIA DO RIO QUITANDINHA		59
4.1	Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha	59
4.2	Sub-bacia Hidrográfica do Rio Quitandinha	66
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		69
5.1	Pré-processamento	69
5.2	Caracterização da Bacia do Rio Piabanha a partir do Satélite Landsat-5	70
5.2.1	Índices de Vegetação	70
5.2.2	Temperatura Superficial Continental (TSC)	95
5.2.3	Índice de Umidade da Superfície (IUS)	117
5.2.4	Detecção de Mudança.....	127
5.3	Avaliação da Temperatura na Bacia do Rio Quitandinha a partir das Propriedades dos Materiais Urbanos	136
5.3.1	Estimativa da TSC a partir das Propriedades dos Materiais.....	136
5.3.2	Comparação entre TSC a partir das Propriedades dos Materiais e Dados do Satélite Landsat-5	142
5.3.3	Simulação de Cenário Projetado.....	148
5.4	Avaliação do Índice de Inclusão Econômico Sanitário na sub-bacia do rio Quitandinha	154
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS		168

6.1	Conclusões	168
6.2	Recomendações	171
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
	ANEXO A: Algoritmo para detecção de Tendência de Mudanças	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Obtenção de dados por sensoriamento remoto. FONTE: Florenzano (2013)	7
Figura 2.2. Diagrama de dispersão NDVI versus temperatura para determinação do IUS.....	19
Figura 2.3. Relações biofísicas entre temperatura e índice de vegetação em termos da presença de água na superfície.	22
Figura 2.4. Implantação do telhado verde.	24
Figura 2.5. Interação da radiação solar incidente com coberturas escuras e claras.....	27
Figura 3.1. Esquematização das inter-relações dos blocos de análise.....	32
Figura 3.2. Fluxograma metodológico	33
Figura 3.3. Área de abrangência da bacia do rio Piabanha para seleção de dados TRMM. FONTE: TRMM <i>Online Visualization and Analysis System</i> (TOVAS); acesso em 05 de maio de 2014.	41
Figura 3.4. Representação das tangentes no ciclo trigonométrico	45
Figura 3.5. Fluxos de energia. FONTE: Albuquerque (2009).....	47
Figura 3.6. Compatibilização de escalas para comparação dos modelos.	53
Figura 3.7. Equipamento para obtenção do albedo para a telha de fibrocimento com camada de tinta branca.	55
Figura 4.1. Hidrografia da bacia do rio Piabanha.....	60
Figura 4.2. Localização da bacia do rio Paibanha	61
Figura 4.3. Vias de acesso à bacia do rio Piabanha.....	62
Figura 4.4. Relevo na bacia do rio Piabanha/RJ.....	63
Figura 4.5. Uso e ocupação do solo na bacia do rio Piabanha/RJ. FONTE: adaptado de Rosário (2013)	65
Figura 4.6. Exutório da sub-bacia do rio Quitandinha	66
Figura 4.7. Delimitação da sub-bacia do rio Quitandinha.....	67
Figura 4.8. Recorte da imagem aérea da sub-bacia do rio Quitandinha.....	68
Figura 5.1. Mapa do NDVI para 19/03/1986.....	70
Figura 5.2. Mapa do NDVI para 28/03/1990.....	71
Figura 5.3. Mapa do NDVI para 29/07/1994.....	71
Figura 5.4. Mapa do NDVI para 08/07/1998.....	72
Figura 5.5. Mapa do NDVI para 01/08/2001.....	72

Figura 5.6. Mapa do NDVI para 28/08/2005.....	73
Figura 5.7. Mapa do NDVI para 20/08/2008.....	73
Figura 5.8. Mapa do NDVI para 13/08/2011.....	74
Figura 5.9. Distribuição de frequência dos valores NDVI para 1986, 1990, 1994 e 1998 à esquerda e, para 2001, 2005, 2008 e 2011, à direita.....	74
Figura 5.10. Média do NDVI das imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.	76
Figura 5.11. Variância entre as estimativas de NDVI nas imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.	76
Figura 5.12. Mapa da média do NDVI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.....	77
Figura 5.13. Mapa da média do NDVI para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.....	78
Figura 5.14. Distribuição de frequência acumulada das médias dos valores do NDVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.....	78
Figura 5.15. Mapa do SAVI para 19/03/1986.	79
Figura 5.16. Mapa do SAVI para 28/03/1990.	80
Figura 5.17. Mapa do SAVI para 29/07/1994.	80
Figura 5.18. Mapa do SAVI para 08/07/1998.	81
Figura 5.19. Mapa do SAVI para 01/08/2001.	81
Figura 5.20. Mapa do SAVI para 28/08/2005.	82
Figura 5.21. Mapa do SAVI para 20/08/2008.	82
Figura 5.22. Mapa do SAVI para 13/08/2011.	83
Figura 5.23. Distribuição de frequência dos valores do SAVI para 1986, 1990, 1994 e 1998 à esquerda e, para 2001, 2005, 2008 e 2011, à direita.....	83
Figura 5.24. Média do SAVI das imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.	84
Figura 5.25. Variância entre as estimativas de NDVI nas imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.	85
Figura 5.26. Mapa da média do SAVI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.	86
Figura 5.27. Mapa da média do SAVI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.	86
Figura 5.28. Distribuição de frequência acumuladas médias dos valores do SAVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.	87
Figura 5.29. Mapa do LAI para 19/03/1986.....	88
Figura 5.30. Mapa do LAI para 28/03/1990.....	88
Figura 5.31. Mapa do LAI para 29/07/1994.....	89

Figura 5.32. Mapa do LAI para 08/07/1998.....	89
Figura 5.33. Mapa do LAI para 01/08/2001.....	90
Figura 5.34. Mapa do LAI para 28/08/2005.....	90
Figura 5.35. Mapa do LAI para 20/08/2008.....	91
Figura 5.36. Mapa do LAI para 13/08/2011.....	91
Figura 5.37. Distribuição de frequência dos valores do LAI para 1986, 1990, 1994 e 1998 à esquerda, e para 2001, 2005, 2008 e 2011 à direita.....	92
Figura 5.38. Média do LAI das imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.	93
Figura 5.39. Variância entre as estimativas de LAI nas imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.	93
Figura 5.40. Mapa da média do LAI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.	94
Figura 5.41. Mapa da média do LAI para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.	94
Figura 5.42. Distribuição de frequência acumulada das médias dos valores do LAI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.....	95
Figura 5.43. TSC com correção da emissividade (19/03/1986)	96
Figura 5.44. TSC com correção da emissividade para 28/03/1990.....	97
Figura 5.45. TSC com correção da emissividade para 29/07/1994.....	97
Figura 5.46. TSC com correção da emissividade para 08/07/1998.....	98
Figura 5.47. TSC com correção da emissividade para 01/08/2001.....	98
Figura 5.48. TSC com correção da emissividade para 28/08/2005.....	99
Figura 5.49. TSC com correção da emissividade para 20/08/2008.....	99
Figura 5.50. TSC com correção da emissividade para 13/08/2011.....	100
Figura 5.51. Distribuição de frequência acumulada da TSC com correção da emissividade.....	101
Figura 5.52. TSC com correção atmosférica (19/03/1986)	101
Figura 5.53. TSC com correção atmosférica para 28/03/1990.....	102
Figura 5.54. TSC com correção atmosférica para 29/07/1994.....	102
Figura 5.55. TSC com correção atmosférica para 08/07/1998.....	103
Figura 5.56. TSC com correção atmosférica para 01/08/2001.....	103
Figura 5.57. TSC com correção atmosférica para 28/08/2005.....	104
Figura 5.58. TSC com correção atmosférica para 20/08/2008.....	104
Figura 5.59. TSC com correção atmosférica para 13/08/2011.....	105

Figura 5.60. Distribuição de frequência acumulada da TSC, com correção atmosférica.....	105
Figura 5.61. Mapa da média da TSC para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.....	106
Figura 5.62. Mapa da média da TSC para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.....	107
Figura 5.63. Distribuição de frequência acumuladas das TSC médias nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.....	107
Figura 5.64. Camada de correção da temperatura em função do relevo.	108
Figura 5.65. TSC potencial para 19/03/1986.....	109
Figura 5.66. TSC potencial para 28/03/1990.....	110
Figura 5.67. TSC potencial para 29/07/1994.....	110
Figura 5.68. TSC potencial para 08/07/1998.....	111
Figura 5.69. TSC potencial para 01/08/2001.....	111
Figura 5.70. TSC potencial para 28/08/2005.....	112
Figura 5.71. TSC potencial para 20/08/2008.....	112
Figura 5.72. TSC potencial para 13/08/2011.....	113
Figura 5.73. Distribuição de frequência acumulada da TSC com correção do relevo.	113
Figura 5.74. Mapa da média da TSC para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.....	114
Figura 5.75. Mapa da média da TSC para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.....	115
Figura 5.76. Distribuição de frequência acumulada das TSC potenciais médias nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.	115
Figura 5.77. Precipitação acumulada nos 15 dias antecedentes às estimativas de TSC das imagens referente aos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.	117
Figura 5.78. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1986 e ajustes dos limites seco e úmido.....	118
Figura 5.79. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1990 e ajustes dos limites seco e úmido.....	118
Figura 5.80. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1994 e ajustes dos limites seco e úmido.....	119
Figura 5.81. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1998 e ajustes dos limites seco e úmido.....	119
Figura 5.82. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2001 e ajustes dos limites seco e úmido.....	120
Figura 5.83. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2005 e ajustes dos limites seco e úmido.....	120

Figura 5.84. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2008 e ajustes dos limites seco e úmido.....	121
Figura 5.85. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2011 e ajustes dos limites seco e úmido.....	121
Figura 5.86. Mapa do IUS para 19/03/1986.	123
Figura 5.87. Mapa do IUS para 28/03/1990.	123
Figura 5.88. Mapa do IUS para 29/07/1994.	124
Figura 5.89. Mapa do IUS para 08/07/1998.	124
Figura 5.90. Mapa do IUS para 01/08/2001.	125
Figura 5.91. Mapa do IUS para 28/08/2005.	125
Figura 5.92. Mapa do IUS para 20/08/2008.	126
Figura 5.93. Mapa do IUS para 13/08/2011.	126
Figura 5.94. Tratamento da classificação da imagem-diferença de 2011-2008.	127
Figura 5.95. Mapas de mudança no NDVI (1990-1986, 1994-1990 e 1998-1994), à direita e à esquerda, e mapa de tendência entre as mudanças indicadas, ao centro.	129
Figura 5.96. Mapas de mudança no NDVI (1998-1994, 2001-1998 e 2005-2001), à direita e à esquerda, e mapa de tendência entre as mudanças indicadas, ao centro.	130
Figura 5.97. Mapas de mudança no NDVI (2005-2001, 2008-2005 e 2011-2008), à direita e à esquerda, e mapa de tendência entre as mudanças indicadas, ao centro.	131
Figura 5.98. Histograma das imagens-diferença baseadas no indicador temperatura-índice de vegetação nos períodos 1990-1986, 1994-1990, 1998-1994 e 2001-1998. ...	133
Figura 5.99. Imagens-diferença do indicador temperatura-índice de vegetação, respectivamente entre os anos 1990-1986, 1994-1990, 1998-1994, 2001-1998, 2005-2001, 2008-2005 e 2011-2008.....	134
Figura 5.100. Classificação da imagem Quickbird da sub-bacia do rio Quitandinha. .	137
Figura 5.101. Dados de temperatura horária média do ar da estação meteorológica do projeto EIBEX e curva ajustada pela série de Fourier.....	140
Figura 5.102. Dados de umidade relativa do ar horária média da estação meteorológica do projeto EIBEX e curva ajustada pela série de Fourier.....	140
Figura 5.103. Variação diária de temperatura para as superfícies artificiais.....	141
Figura 5.104. Variação diária de temperatura para as superfícies naturais.	141
Figura 5.105. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais – área 1 a 229.....	143

Figura 5.106. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais – área 229 a 458.....	143
Figura 5.107. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais e subtração do fator de erro médio aos dados de satélite – área 1 a 229.	144
Figura 5.108. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais e subtração do fator de erro médio aos dados de satélite – área 229 a 458.	144
Figura 5.109. Previsão da TSC pelo interpolador de Krigagem.....	145
Figura 5.110. Gráfico de validação cruzada do modelo.....	146
Figura 5.111. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 e adição do – pontos 1 a 229 .	146
Figura 5.112. Comparação entre as estimativas das temperaturas com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 – área 229 a 458.	147
Figura 5.113. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 e adição do fator de erro médio à estimativa baseada nas propriedades dos materiais – pontos 1 a 229.....	147
Figura 5.114. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 e adição do fator de erro médio à estimativa baseada nas propriedades dos materiais – pontos 229 a 475.....	148
Figura 5.115. Identificação de extremos (<i>outliers</i>) na obtenção do albedo da superfície de fibrocimento com camada de tinta branca.	149
Figura 5.116. Medição do albedo para as telhas de fibrocimento brancas.....	149
Figura 5.117. Comportamento térmico das telhas de fibrocimento com e sem a inserção de camada de tinta branca.	150
Figura 5.118. Comportamento térmico das superfícies de concreto e telhados verdes.	151
Figura 5.119. Comparação de TSC entre os cenários atual e projetado.....	153
Figura 5.120. Distribuição da população de acordo com o IIES (2000).	156
Figura 5.121. Distribuição da população de acordo com o IIES (2010).	156
Figura 5.122. Tendência Renda versus IIES em 2000.	157
Figura 5.123. Tendência Interligação com a Rede de Água versus IIES em 2000.	157
Figura 5.124. Tendência Interligação com a Rede de Esgoto versus IIES em 2000....	157
Figura 5.125. Tendência Coleta Regular de Lixo versus IIES em 2000.	158
Figura 5.126. Tendência Renda versus IIES para o ano de 2010.....	158

Figura 5.127. Tendência Interligação com a Rede de Água versus IIES em 2010.	159
Figura 5.128. Tendência Interligação com a Rede de Esgoto vs IIES em 2010.	159
Figura 5.129. Tendência Coleta Regular de Lixo versus IIES para o ano de 2010.....	159
Figura 5.130. Interligação com a rede de abastecimento de água para os anos de 2000 e 2010.	160
Figura 5.131. Interligação à rede pública de esgoto nos anos de 2000 e 2010.....	161
Figura 5.132. Coleta regular de lixo nos anos de 2000 e 2010.....	162
Figura 5.133. Índice de renda familiar para os anos de 2000 e 2010	163
Figura 5.134. Índice de inclusão econômico-sanitário para os anos de 2000 e 2011...	164
Figura 5.135. Indicador de desenvolvimento local entre os anos de 2000 e 2010.	165
Figura 5.136. Relação entre IIES e NDVI.....	166
Figura 5.137. Relação entre IIES e temperatura.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Especificações técnicas do satélite Quickbird.	12
Tabela 3.1. Descrição das bandas do mapeador temático (TM) do Landsat 5.	36
Tabela 3.2. Constantes de calibração dos sensores TM e ETM+	38
Tabela 3.3. Classes sintéticas de mudanças.....	43
Tabela 3.4. Classes sintéticas de tendência de mudanças.....	44
Tabela 3.5. Classes sintéticas de mudanças.....	46
Tabela 3.6. Descrição das variáveis do modelo de estimativa de temperatura a partir das propriedades físicas dos materiais.....	47
Tabela 3.7. Relação entre os setores censitários de 2000 e 2010 que necessitaram de compatibilização.....	56
Tabela 3.8. Indicadores de renda e saneamento	57
Tabela 4.1. Composição da área da bacia do Rio Piabanha por município.....	61
Tabela 5.1. Erro RMS total referente ao georreferenciamento das imagens.	69
Tabela 5.2. Estatísticas dos dados referentes às médias de NDVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.....	79
Tabela 5.3. Estatísticas dos dados referentes às médias de SAVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.....	87
Tabela 5.4. Estatísticas da TSC média nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.....	108
Tabela 5.5. Estatísticas da TSC potencial média dos instantes avaliados nos períodos de 1986-1998 e de 2001-2011.	116
Tabela 5.6. Coeficientes das retas dos limites seco e úmido para cada imagem.....	122
Tabela 5.7. Equações do IUS para cada imagem avaliada.	122
Tabela 5.8. Classificação da cobertura na sub-bacia do rio Quitandinha.....	137
Tabela 5.9. Parâmetros de entrada do modelo das superfícies artificiais.	138
Tabela 5.10. Parâmetros de entrada do modelo das superfícies naturais	139
Tabela 5.11. Coeficientes e médias para ajuste da série de Fourier.	139
Tabela 5.12. Temperatura estimada para cada superfície às 09:40:27 horas.	142
Tabela 5.13. Medição do albedo para telhas de fibrocimento pintadas de branco.....	150
Tabela 5.14. Simulação do cenário atual.....	152
Tabela 5.15. Simulação do cenário projetado.....	152
Tabela 5.16. Correlação entre dados de IIES e NDVI e temperatura.....	166

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i> – Radiômetro Avançado de Muito Alta Resolução
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i> – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
EOS	<i>Earth Observing System</i> – Sistema de Observação da Terra
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> – Agência de Proteção Ambiental
ETM ⁺	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> – Mapeador Temático Melhorado
IIES	Índice de Inclusão Econômico-Sanitária
IUS	Índice de Umidade do Solo
JAXA	<i>Japan Aerospace eXploration Agency</i> – Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i> – Sensor Infravermelho Termal
TM	<i>Thematic Mapper</i> – Mapeador Temático
TOVAS	<i>TRMM Online Visualization and Analysis System</i> – Sistema de Análise e Observação em Tempo Real TRMM
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> – Missão de Medição de Precipitação Tropical
TSC	Temperatura Superficial Continental
LAI	<i>Leaf Area Index</i> – Índice de Área Foliar
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> – Espectrômetro Imageador de Resolução Moderada
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i> – Sistema de Imageamento Multiespectral
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – Administração Aeronáutica e Espacial Nacional Norte Americana
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> – Administração Oceânica e Atmosférica Nacional Norte Americana
OLI	<i>Operational Land Imager</i> – Imageador Operacional de Terras
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SVAT	<i>Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer</i> – Transferência de Energia Solo-Vegetação-Atmosfera

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As atuais demandas da sociedade vêm exigindo soluções, cada vez mais, complexas, que convergem para a necessidade de se estabelecer conexões entre os diversos ramos científicos. Em contraste à concepção que assume o conhecimento em sua especificidade, a ciência avança no campo interdisciplinar da pesquisa, adaptando-se às novas exigências de contextualização do saber.

Diante desse cenário, ao avaliar os tradicionais instrumentos do planejamento urbano, torna-se clara a necessidade do desenvolvimento de novas estratégias que considerem as relações entre os diversos fatores de desenvolvimento no tempo e no espaço.

O objetivo do planejamento passa a ser, então, alcançar um maior desenvolvimento econômico e uma melhor qualidade de vida, considerando a dimensão física do território, mas, igualmente, contemplando a questão ambiental e a complexidade socioeconômica e política da comunidade, minimizando, assim, as contradições e fraturas habituais nos planos setoriais (Castells, 1999).

As dinâmicas dos ecossistemas terrestres estão recebendo crescente atenção nos estudos de mudança global. A compreensão do desenvolvimento temporal da paisagem representa uma base fundamental para o seu planejamento, predição de cenários e para a tomada de decisão. Todavia esse processo envolve um grande número de informações que devem ser tratadas e administradas de forma a indicar mudanças mais acentuadas, cujas áreas merecem destaque em termos de proteção ambiental, no planejamento urbano e na gestão dos recursos naturais e econômicos.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, 2005), um sistema de monitoramento deve ser capaz de responder às seguintes questões: Quais são as condições atuais do ecossistema? Onde essas condições melhoram ou pioram no espaço de tempo estudado? Quais são as condições de estresse associadas a tais pioras? Os programas de gerenciamentos e as exigências políticas trabalham de modo eficiente?

Apesar do aumento da demanda do monitoramento, ainda são limitadas as soluções padronizadas – a procura maior é pelo modelo de monitoramento integrado, cuja visão da paisagem é holística, incluindo componentes da paisagem como a camada de vegetação, de solo, o uso do solo e a estrutura espacial da paisagem (Lang e Blaschke, 2009).

O sensoriamento remoto cumpre, dessa forma, um papel importante nesse cenário, permitindo detecção de dados e sobreposição de informações espaciais a um custo relativamente baixo.

Outro campo que ganha destaque nessa concepção de avaliação das condições ambientais e de bem-estar das populações é a utilização dos dados censitários populacionais, não apenas como uma fonte de informação, mas principalmente nas análises espaciais e temporais.

Nesse sentido, a expressividade dos estudos que associam a utilização de tecnologia geoespacial a informações sobre o contexto socioambiental das bacias hidrográficas como ferramenta de monitoramento vem crescendo e desenvolvendo-se sob diversas óticas e disciplinas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho propõe a caracterização da evolução da paisagem como subsídio ao planejamento urbano e à gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas por meio da aplicação de geotecnologias, associadas aos dados de sensoriamento remoto e censitários, de forma a permitir a observação dinâmica de aspectos físicos e socioeconômicos da área de estudo, assumida como a bacia experimental do rio Piabanha e a sub-bacia do rio Quitandinha, situadas no estado do Rio de Janeiro.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- fornecimento de subsídios para a gestão hídrica, na medida em que se trabalha com metodologia voltada aos indicadores de cobertura vegetal do solo, quantificada através dos índices de vegetação, à temperatura superficial continental da bacia e ao índice de umidade do solo;

- contribuições no desenvolvimento de dados importantes para sistemas de modelagem hidrometeorológica;
- acréscimo de novos subsídios ao planejamento urbano e agrícola, com o emprego de SIG e sensoriamento remoto, através da detecção de mudanças e de áreas submetidas ao estresse;
- simulação de cenários para intervenções urbanas no âmbito da melhoria do conforto térmico, com a implantação de telhados verdes e brancos, ao passo que se explora o refinamento de escala da temperatura superficial continental a partir da integração com a estimativa baseada nas propriedades térmicas dos materiais constituintes da paisagem, no nível do subpíxel da imagem Landsat-5;
- contribuições para o desenvolvimento sustentável, a partir do diagnóstico socioambiental, baseado no índice de inclusão econômico-sanitário (IIES); busca-se, dessa forma, conciliar informações do meio físico e da população, obtendo indícios de como os extratos sociais ocupam o espaço.

1.3 Método

Foi estabelecido, a fim de atingir os objetivos propostos, o método descrito a seguir:

- 1) análise temporal da cobertura vegetal da bacia, atrelada ao índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI) e índice de área foliar (LAI);
- 2) mapeamento da temperatura superficial continental (TSC) na bacia do rio Piabanha, espacial e temporalmente, estimados
 - a. a partir de métodos com base em imagens do sensor Landsat
 - i. com correção da emissividade;
 - ii. com correção dos efeitos atmosféricos;
 - iii. com correção dos efeitos do relevo;
 - b. a partir das propriedades térmicas dos materiais constituintes da paisagem, na sub-bacia do rio Quitandinha;
 - c. análise multiescala, com vistas à avaliação da estimativa obtida no subitem a;
- 3) estimativa do índice de umidade do solo (IUS);
- 4) detecção de mudanças na bacia hidrográfica

- a. a partir do método da imagem-diferença;
 - b. a partir do indicador de temperatura-índice de vegetação;
- 5) simulação do cenário projetado para a implantação de telhados verdes e brancos na sub-bacia do rio Quitandinha; e
 - 6) obtenção do índice de inclusão econômico-sanitária (IIES) para os censos do IBGE de 2000 e 2010, a partir dos setores censitários.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, sendo o primeiro deles voltado à inserção da pesquisa no contexto e à exposição dos objetivos, método e da estruturação do presente trabalho.

No Capítulo 2, é desenvolvida a fundamentação teórica dos principais temas abordados, com destaque à questão da utilização de geotecnologias como suporte à análise ambiental e tomada de decisão. A discussão é desenvolvida ainda no escopo do planejamento da paisagem e utilização de dados censitários na avaliação ambiental.

A metodologia aplicada no presente trabalho é exposta no Capítulo 3, onde é abordada a questão do pré-processamento das imagens de satélite utilizadas, detalhando os critérios para a seleção das imagens, seu georreferenciamento e processos de calibração radiométrica e obtenção da reflectância monocromática. Nesse capítulo, é apresentada toda a formulação e os procedimentos necessários à obtenção dos índices de vegetação, da temperatura da superfície continental (TSC) por meio de dados de sensoriamento remoto e a partir das propriedades físicas dos materiais, do índice de umidade do solo (IUS), da detecção de mudanças, da simulação do cenário de projeto para implantação dos telhados verdes e frios e da avaliação dos dados censitários.

O Capítulo 4 dedica-se à apresentação da bacia do rio Piabanha, área de estudo na qual foram aplicados os procedimentos de análise anteriormente expostos. São descritas as características físicas, sociais e econômicas da bacia. Nesse capítulo, é desenvolvida também a caracterização da sub-bacia do rio Quitandinha, região utilizada para avaliação da TSC supracitada e para simulação da implantação dos telhados verdes e frios.

No Capítulo 5, são apresentados todos os resultados obtidos e discussões desenvolvidas, a fim de subsidiar a análise da paisagem proposta para a região de estudo.

As considerações finais, conclusões e recomendações voltadas às análises realizadas estão expostas no Capítulo 6.

Em seguida, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento dos conceitos trabalhados na presente dissertação e os anexos contendo informações complementares ao trabalho.

CAPÍTULO 2– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A compreensão dos elementos físicos e socioeconômicos de uma bacia hidrográfica é fundamental na concepção de seu planejamento, seja em termos de gestão da água, monitoramento de desastres naturais, na agricultura, avaliação do desmatamento, ou ainda no diagnóstico da qualidade ambiental.

De acordo com Nucci (1996), o planejamento da paisagem surge como uma contribuição ecológica e de projeto (*design*) para o planejamento do espaço, onde se procura uma regulamentação dos usos do solo e dos recursos ambientais, garantindo a capacidade dos ecossistemas, o potencial produtivo e recreativo da paisagem e o máximo proveito do que a vegetação pode oferecer para a melhoria da qualidade ambiental.

Essa nova compreensão de paisagem é importante no acesso aos problemas complexos à luz de um desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, a utilização de geotecnologias é evidente no apoio às diversas esferas do planejamento, tornando possível a captação de dados relativos a grandes áreas para o diagnóstico da situação real e a combinação de camadas de informações, auxiliando no prognóstico de cenários e na tomada de decisão.

Todavia, apesar dessas ferramentas já fazerem parte do dia-a-dia da maioria dos escritórios e órgãos governamentais, seu potencial ainda é subutilizado. Os sistemas de informações geográficas bem alimentados por dados de sensoriamento remoto e ao lado de sistemas de apoio à tomada de decisão podem ser usados, conforme exposto por Lang e Blaschke (2009), para decisões de planejamento mais transparentes e que possam ser repetidas intersubjetivamente.

No que tange ao planejamento urbano, o processo ao qual o Brasil foi submetido, em geral, apresentou-se de forma desordenada, sob altos custos ambientais e sociais. Conforme explicita Moreira Junior (2010), o modo como a cidade se expande, com influência direta do jogo especulativo do mercado de terras, induz a transformações da paisagem urbana, que se altera desrespeitando aspectos ambientais.

O espaço passa a ser considerado suporte físico ou recurso, como o reflexo de um momento histórico, econômico e cultural. O monitoramento de áreas verdes urbanas

ganha, dessa forma, importância devido a sua função climática, na manutenção de corredores de ar puro e do ponto de vista sociopsicológico (Lang e Blaschke, 2009).

O uso de geotecnologias também vem se difundindo no âmbito da prevenção de desastres e monitoramento hidrológico. Conforme o exposto por Barros (2012), além da dificuldade atrelada à falta de um bom planejamento do sistema hídrico, a falta de conhecimento sobre o comportamento dos padrões hidrometeorológicos em diferentes escalas espaciais e temporais faz com que essa limitação torne-se ainda mais complexa.

Nesse sentido, a utilização de geotecnologia no monitoramento das variáveis envolvidas no balanço hídrico ganha destaque: em conjunto com as medições *in situ*, é possível desenvolver o monitoramento na escala da bacia, em diferentes sistemas espaciais e temporais (Nicácio, 2008; Barros, 2012).

2.1 Sensoriamento Remoto Aplicado a Análise da Paisagem

No âmbito das geotecnologias, o sensoriamento remoto insere-se, como indica a própria nomenclatura, na perspectiva da obtenção de dados por meio de sensores, sem que haja contato físico direto com o objeto de estudo. Esse processo encontra-se esquematicamente exposto na Figura 2.1.

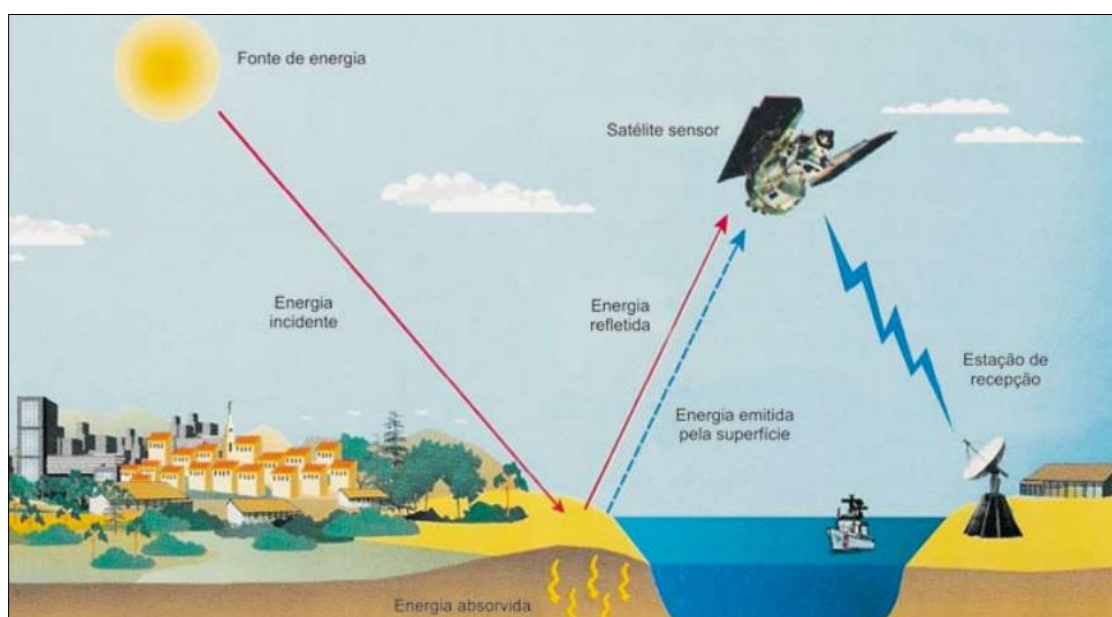


Figura 2.1. Obtenção de dados por sensoriamento remoto. FONTE: Florenzano (2013)

O sensoriamento remoto de recursos terrestres consiste na utilização conjunta de modernos sensores e equipamentos para processamento e transmissão de dados, a partir de plataformas como aeronaves e espaçonaves, a fim de estudar o meio ambiente

através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias constituintes do sistema terrestre (Novo, 1989; Campbell, 1996).

Para Ponzoni *et al.* (2012), as definições mais clássicas das técnicas de sensoriamento remoto, apesar de estarem fortemente relacionadas à sua fundamentação, podem ofuscar os seus principais conceitos, com destaque àqueles intrínsecos aos processos de interação entre a radiação eletromagnética e os diferentes objetos, ou alvos, dos quais pretende-se extrair informação.

Em geral, um sistema de sensoriamento remoto é composto pela fonte de energia, alvo ou objeto sensoriado, caminho de transmissão e sensor. A dinâmica entre esses elementos apresenta influência sobre as informações captadas.

A fonte de energia na qual os sensores remotos operam podem ter origem natural, como no caso dos satélites que captam informações da radiação proveniente do Sol e da Terra, ou artificial, como na captação do sinal emitido pelos próprios sistemas sensores.

A depender de sua resolução espacial, o sensor detectará uma determinada porção da superfície e registrará a radiância que dela emerge (Ponzoni *et al.*, 2012).

Ao serem expostos a uma determinada fonte de energia, os materiais que compõem a superfície terrestre refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com suas propriedades biofísicas e químicas. Esse comportamento é denominado assinatura espectral.

Conforme expõe Florenzano (2013), podem ser listados os principais fatores que interferem no comportamento espectral do objeto:

- **nível de aquisição do dado** - a altitude da plataforma, que pode ser de campo/laboratório, aérea ou orbital, apresenta influência, tanto na área imageada quanto na resolução da informação obtida, dos fatores ambientais e a forma de análise dos dados;
- **método de aquisição dos dados** - refere-se à forma como a informação é detectada e os processos pelos quais é submetido o sinal recebido pelo sensor;

- **condições inerentes ao alvo** - intrínsecos ao objeto sensoriado, como a presença de água, biomassa ou o vigor das culturas em seus estágios de crescimento;
- **condições ambientais** - são as variações externas ao objeto sensoriado, como as condições de iluminação, poluição e precipitação;
- **geometria da aquisição de dados** - diferenças espectrais resultantes da localização do alvo em relação à fonte e ao sensor, como, por exemplo, as diferenças entre as informações obtidas sobre um mesmo alvo localizado em região plana e numa vertente inclinada;
- **atmosfera** - a intensidade da radiação registrada pelo sensor é influenciada, dependendo do comprimento de onda, pelos constituintes da atmosfera, que podem vir a transmiti-la, absorvê-la ou espalhá-la.

Para Novo (1989), a visão sinóptica e os aspectos multispectrais e multitemporais dos sensores orbitais, aliados ao crescente desenvolvimento de sistemas computacionais de tratamento de imagens, caracterizam o sensoriamento remoto como uma tecnologia indispensável nas análises e estudos dos fenômenos ambientais terrestres.

Nesse sentido, a utilização do sensoriamento remoto no monitoramento ambiental vem tornando-se uma prática recorrente em diversas linhas de estudo, a destacar: monitoramento de áreas rurais, áreas de proteção ambiental, uso e ocupação do solo e análise da vegetação.

Sommer *et al.* (1998) analisam os princípios de técnicas de sensoriamento remoto existentes e novos métodos considerados adequados para monitorar mudanças de uso da terra rural e seus efeitos sobre as condições do solo. Foram apresentados como principais requisitos e desafios para a pesquisa e o monitoramento ambiental, com destaque para a necessidade de abordagens de sensoriamento remoto baseadas em parâmetros primários, sendo relacionados a propriedades físico-químicas dos materiais de superfície.

No âmbito da utilização do sensoriamento remoto como fonte primária de dados para alimentação de modelos de previsão, Beerli e Peled (2009) apresentam um modelo de alta precisão para o monitoramento agrícola. A inserção da avaliação espacial no

âmbito de grandes áreas permite que se opere um processo de monitoramento e gestão, ao mesmo tempo que inclui diversos elementos da cultura avaliada.

Taubenböck *et al.* (2009) avaliam, a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal, o monitoramento dos processos de expansão urbana. Foram obtidas informações sobre os padrões espaço-temporais no crescimento das grandes aglomerações urbanas da Índia. Os resultados demonstram um quadro característico de padrão espacial, gradientes e métricas da paisagem e, assim, ilustram o crescimento urbano e fornecem subsídios para a modelagem do desenvolvimento futuro.

Ainda no que tange ao monitoramento de áreas urbanas, Lucena (2012) estuda a formação da ilha de calor no espaço da região metropolitana do Rio de Janeiro por meio da análise de séries temporais de estações meteorológicas com dados de temperatura do ar e precipitação, da estimativa de diferentes parâmetros com base em dados de sensoriamento remoto e da modelagem atmosférica a partir do modelo de previsão numérica de tempo MM5. Destaca-se o importante papel do sensoriamento remoto em estudos urbanos com enfoque em índices de urbanização e de cobertura vegetal urbana e na TSC, que constituem indicadores valiosos no tratamento da ilha de calor urbana.

Nagendra *et al.* (2012) destacam a importância do monitoramento de áreas protegidas e seus arredores, dada a sua vulnerabilidade às pressões antropogênicas. O estudo mostra que o sensoriamento remoto tem um forte potencial, ainda pouco explorado, no auxílio ao monitoramento de áreas protegidas. Destaca-se, ainda, a importância da utilização dos dados gerados de forma mais eficaz, permitindo uma melhor gestão das áreas protegidas e auxiliando no planejamento da paisagem.

2.1.1 Satélites Artificiais

A utilização de satélites artificiais iniciou-se na década de 1950, com o lançamento do satélite Spunik, pela antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas, e, em seguida, pelo lançamento do Explorer-1, pelos Estados Unidos.

Atualmente, existem diversas plataformas orbitais em operação, a destacar: o Landsat, EOS (Terra e Aqua), CBERS e NOAA. Os sensores são os dispositivos presentes nos satélites capazes de detectar e registrar a radiação em determinada faixa do espectro eletromagnético.

O fornecimento livre de dados de sensores, que operam nas faixas do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético, vem oferecendo subsídios para o desenvolvimento de diversos trabalhos no Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Na linha da estimativa da evapotranspiração, destacam-se o uso do sensor AVHRR-NOAA por Paiva (2005), TM-Landsat e o MODIS por Nicácio (2008) e Barros (2012). Com vista à classificação do uso e cobertura do solo com uso do sensor TM-Landsat, Ribeiro (2001) apresenta contribuição na detecção de mudanças na cobertura do solo e Rosário (2013) para avaliação das áreas de proteção permanente. Ainda com base em dados do sensor TM, a bordo do satélite Landsat-5 e ETM+ do Landsat-7, Lucena (2012) estuda a ilha de calor no espaço da região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

Um dos sistemas orbitais mais populares no sensoriamento remoto é o Landsat, desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). A série de oito satélites teve início com o lançamento do Landsat-1 em 1972. Essa série de satélites pode ser considerada a principal no campo do sensoriamento remoto, não apenas devido ao período de fornecimento de dados contínuo mais longo, mas também pela sua notável facilidade de acesso e qualidade dos dados gerados.

Os satélites Landsat-1, 2 e 3 apresentam, como principal sistema de sensor, o *Multispectral Scanner System* (MSS), em órbita a uma altitude de 920 km. O sensor MSS possui quatro bandas, sendo uma na região verde do espectro, uma na região do vermelho e as outras duas no infravermelho próximo. Sua resolução espacial é de 80 metros, enquanto a resolução temporal é de 18 dias.

Nos satélites Landsat-4, 5 e 6, foi acrescentado ao MSS o sistema sensor *Thematic Mapper* (TM), com sete canais, sendo três no visível, um no infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e um no infravermelho termal, com resolução espacial de 120 m para o canal termal e 30 m para os demais. O Landsat-6 foi considerado perdido após seu lançamento, visto que não chegou a entrar em órbita.

A novidade do Landsat-7 foi a substituição do sensor TM pelo Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM⁺), que inclui o canal pancromático, com resolução espacial de 15 metros e 60 metros.

Em 2013, foi lançado o oitavo satélite da série, o Landsat-8. Os sistemas sensores na plataforma são o Operational Land Imager (OLI) e o Thermal Infrared Sensor (TIRS). Como novidades, foram adicionadas, ao OLI, uma banda do azul profundo para estudos costeiros e de aerossol, uma faixa do infravermelho de ondas e uma banda para avaliação da qualidade, que fornece informações sobre a presença de nuvens, água e neve. Em relação ao TIRS, foram adicionadas duas bandas térmicas.

Satélites de resolução espacial alta, como o Landsat, permitem obter informações sobre variáveis na escala regional, mas apresentam-se insuficientes para uma avaliação mais detalhada. Para aplicações que exigem maior refinamento de escala, surge a necessidade da utilização de satélite de altíssima resolução.

Dentre os satélites com sensores de altíssima resolução, destaca-se o QuickBird, primeiro da série desenvolvida pela *Digital Globe*. O satélite possui sensores capazes de adquirir imagens na forma multiespectrais e pancromático, com as características expostas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Especificações técnicas do satélite Quickbird.

Especificações Técnicas – Quickbird	
Lançamento	18 de outubro de 2001
Órbita	Heliossíncrona
Altitude	450 km
Faixa de imageamento	16.5 km no NADIR
Gravador de bordo	128 Gbit
Resolução Radiométrica	11 bits
Resolução Espacial	60 cm (pancromático) 2.8 metros (multiespectral)
Faixas Espectrais	Pancromática - 450-900 nm Azul – 450-520 nm Verde – 520-600 nm Vermelho – 630 – 690 nm

FONTE: *Digital Globe* (2003)

O uso de imagens de altíssima resolução no estudo da vegetação fornece importantes subsídios tanto para a compreensão dos processos teóricos envolvidos, quanto para conservação das funções ecológicas dos ecossistemas naturais e monitoramento dos padrões de biodiversidade nas florestas.

A utilização dessas imagens pode, todavia, apresentar limitações devido ao custo associado à sua aquisição e à cobertura de áreas relativamente pequenas. Nesse sentido, a integração entre os dados obtidos através de sensores distintos permite explorar suas principais potencialidades.

Virtanen e Ek (2014) produziram e compararam diferentes classificações de cobertura da terra usando imagens de satélite QuickBird, Terra/ASTER e Landsat-5 TM. O estudo mostrou que a utilização de imagens de satélite de alta resolução mostra-se útil na identificação de comunidades vegetais de forma detalhada e na previsão de seu comportamento ante as mudanças ambientais, climáticas e outras. Foi demonstrado, ainda, que as imagens de menor resolução espacial e maior abrangência apresentaram maior eficiência na detecção de bordas entre a vegetação e tipos de cobertura na paisagem analisada. Além disso, as imagens de altíssima resolução apresentaram um papel fundamental para a calibração e avaliação das estimativas feitas a partir de dados do Landsat, agregando informação aos estudos.

Também desenvolvido e operado pela NASA, em conjunto com a JAXA, a agência espacial japonesa, o satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) representa uma missão com objetivo de avançar a compreensão sobre a distribuição da precipitação tropical e sua relação com a água global e com os ciclos de energia. O satélite fornece dados sobre as características de precipitação em escala de tempo de 3 horas. Tal disponibilidade de dados em tempo real do TRMM conduziu a importantes aplicações no acompanhamento de ciclones tropicais, em aplicações hidrológicas e na assimilação de informações precipitação em modelos de previsão.

As informações fornecidas pelo TRMM têm aplicações importantes nos estudos voltados à hidrologia, ecologia e meteorologia. Em sinergia com dados de estações meteorológicas e informações obtidas por outros satélites, as potencialidades do TRMM podem ser exploradas de forma a ampliar sua aplicação.

2.1.2 Índices de Vegetação

A cobertura vegetal apresenta efeitos importantes no intercâmbio de energia na superfície continental e apresenta-se como um critério adequado para identificar regiões degradadas, sendo sua quantificação útil no estudo desse processo.

A fundamentação da proposição de índices de vegetação encontra-se no comportamento antagônico de reflectância da vegetação na região espectral do visível e do infravermelho próximo: quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, menor será sua reflectância na região do visível, dada a maior oferta de pigmentos fotossintetizantes; já a reflectância no infravermelho próximo será maior devido ao

espalhamento da radiação eletromagnética nas camadas de folhas. É, nesse princípio, que se baseiam a maior parte dos índices de vegetação (Ponzoni *et al.*, 2012).

No Brasil, a utilização do sensoriamento remoto no estudo da vegetação teve início da década de 1940, com os primeiros mapeamentos temáticos a partir de fotografias aéreas. Na década de 1980, tiveram início os estudos voltados às estimativas de desflorestamento e mapeamento de remanescentes florestais e culturas agrícolas. Apenas na década de 1990, as pesquisas, inicialmente de caráter qualitativo, passaram a explorar a quantificação da vegetação através de índices de vegetação (Ponzoni *et al.*, 2012).

O índice de vegetação mais amplamente utilizado na literatura é o índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), uma grandeza adimensional baseada na razão entre a diferença de refletâncias no visível e infravermelho próximo e a soma entre elas, proposta por Rouse *et al.* (1973). Através do NDVI, é possível mapear a vegetação em termos de condições e quantidade.

A refletância de um dossel de plantas é uma combinação dos espectros da vegetação e do solo: à medida em que a parcela da vegetação cresce, a parcela referente ao solo diminui; todavia, em alguns casos, sua contribuição continua significativa e deve ser considerada. Apesar da demonstrada eficácia do NDVI como um indicador em áreas com alta densidade vegetativa, seu uso apresenta limitações em regiões com vegetação esparsa. Nesse sentido, o índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI), proposto por Haute (1988), deriva-se do NDVI e busca minimizar as influências do solo através de um fator de ajuste.

Essa constante foi estimada a partir de medições experimentais de refletância nas bandas do infravermelho próximo e vermelho para as culturas de algodão e pastagem. A consideração do fator como 0,5, comumente utilizado nos estudos que envolvem o índice, abrange um amplo intervalo de condições da vegetação. A limitação no seu uso consiste na necessidade de análise para diferentes biomas e condições agrícolas (Haute, 1988).

Um parâmetro biofísico baseado em índices de vegetação é o índice de área foliar (*Leaf Area Index* - LAI), que depende de composição de espécies, estágio de

desenvolvimento e sazonalidade. Além disso, o LAI é fortemente dependente das condições dominantes e das práticas de gestão do local. A soma desses fatores, combinados com a diferença de métodos de avaliação, pode, portanto, conduzir a grande variação de valores relativos ao LAI, como é demonstrado na literatura relevante (Jonckheere *et al.*, 2004).

2.1.3 Estimativa da Temperatura Superficial

Um dos impactos causados pela substituição de coberturas naturais da superfície no processo de urbanização é a modificação térmica dos espaços. Esse tipo de alteração térmica tem efeitos sobre os processos físicos, químicos e biológicos da Terra.

Ao considerar a cidade um meio ambiente construído, Santos (1994) relaciona as mudanças no campo térmico urbano à segregação e fragmentação da população em bairros de acordo com diferentes particularidades em termos de planejamento, associadas às diferentes rendas. Tem-se, dessa forma, um retrato das diversas classes e modelos culturais.

A TSC representa, nesse contexto, um parâmetro físico chave nos processos ocorridos na superfície terrestre não apenas em escala regional e global, mas também no nível local.

Atrelada ao balanço de energia, bem como à evapotranspiração e aos processos de desertificação, a TSC representa um bom indicador de degradação da cobertura do solo, das alterações climáticas, bem como para a detecção de seca e avaliação de impacto com base na estimativa de índices de estresse da vegetação. Informações sobre a TSC são, por conseguinte, necessárias para uma vasta gama de aplicações, particularmente interessantes para as comunidades científicas que lidam com modelos meteorológicos e climáticos (Peres *et al.*, 2004).

Com o desenvolvimento tecnológico de sensores eficazes para sensoriamento remoto termal, o estudo da TSC tem sido ampliado mediante o emprego de sensores do infravermelho termal, sendo possível, com derivações da lei de Plank, mensurá-la a partir da temperatura de brilho. De modo geral, a TSC é representativa de diferentes propriedades da superfície: albedo, emissividade e propriedades térmicas de tipos de cobertura de uso da terra. Cada uma dessas características tem uma ampla gama de

variação com o uso da terra e mudanças em sua cobertura causadas pela urbanização (Lv e Zhou, 2011).

A validação das estimativas da TSC a partir de dados de sensoriamento remoto, no entanto, não é trivial, dada a alta variabilidade no espaço e no tempo. Exercícios de validação são comumente realizados através de comparações com medições realizadas *in situ*, ou por meio de um método baseado no fluxo radiativo dos materiais que compõem a paisagem.

A utilização de dados de campo é, geralmente, realizada em áreas homogêneas, tais como lagos, desertos e regiões com coberturas vegetais densas ou muito homogêneas, onde as medições das estações são representativas dos valores da escala de píxel (Ermida *et al.*, 2014).

Para superfícies heterogêneas, no entanto, a validação pode ser muito mais complexa que um escalonamento efetivo das medições em campo. Adicionalmente, a necessidades de dados de apoio coletados em campo agrega custos.

Nesse caso, a aplicação envolve o uso de cálculos de transferência radiativa, de forma a reproduzir observações no topo da atmosfera, assumindo a emissividade da superfície e os perfis atmosféricos como conhecidos. (Ermida *et al.*, 2014)

Os principais problemas encontrados na estimativa TSC a partir de dados de sensoriamento remoto referem-se principalmente ao fato de que a radiância medida apresenta influências da emissividade da superfície terrestre e da própria estrutura térmica e composição da atmosfera. Diversas formulações foram desenvolvidas, com diferentes níveis de refinamento, onde o problema de estimativa de TSC é resolvido a partir de uma determinada hipótese que se assume para se fechar o conjunto de equações e obter uma única solução (Peres *et al.*, 2008).

A baixa resolução da banda termal em relação às bandas do visível e do infravermelho próximo também representa uma limitação na obtenção de informações, representando uma problemática para as aplicações ambientais. No caso do sensor TM a bordo do satélite Landsat-5, a resolução espacial da banda termal é quatro vezes inferior às demais bandas, prejudicando a identificação de alvos de interesse na superfície,

principalmente se esses possuem áreas de dimensões menores ou iguais à dimensão do píxel da banda termal, que, no caso do TM – Landsat-5, é 120 x 120 m.

2.1.4 Estimativa da Umidade do Solo

O balanço de energia da superfície é significativamente alterado de acordo com as variações na umidade do solo, tornando-a, assim, um índice fundamental para a modelagem de processos hidrológicos superficiais, biológicos e biogeoquímicos. O conteúdo de água no solo é uma variável que define, entre muitos fatores, a duração e intensidade da seca, produção e colheita agrícola, nível de erosão do solo e impactos do escoamento superficial.

Considerando a importância do conhecimento da umidade no solo para gestão do espaço e de seus recursos, diversos métodos foram propostos para a sua determinação, como, por exemplo, o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além de métodos indiretos que a estimam a partir de outras propriedades do solo, como o espalhamento de nêutrons, a resistência elétrica e a reflectometria no domínio temporal (Schmugge *et al.*, 1980).

Apesar da acurácia dos métodos de determinação da umidade do solo em campo, o trabalho e custo associado ao processamento de uma única amostra resultam em medições pontuais, insuficientes para a caracterização de grandes áreas. Nesse caso, a determinação da umidade do solo a partir de métodos tradicionais pode tornar-se inviável. A escassez de dados de umidade do solo com o nível de precisão e a extensão geográfica necessários para estudos em escala regional limita o entendimento da interação entre a umidade do solo e a atmosfera nas bacias hidrográficas brasileiras.

Destaca-se, então, a importância do desenvolvimento de métodos que possibilitem a aquisição de informações acerca da umidade do solo para a análise espacial em áreas extensas, possibilitando o melhor entendimento dos processos e interações entre a atmosfera e o solo. Nesse contexto, o sensoriamento remoto insere-se como uma ferramenta adequada, pois, apesar da limitação de abrangência de alguns centímetros de profundidade do solo, sua utilização permite uma avaliação de grandes áreas.

A utilização de dados da banda térmica infravermelha para monitorar estresse hídrico no dossel fundamenta-se no fato de que, quanto maior sua umidade, maior será sua capacidade de condutividade térmica. Além disso, o fato de a evaporação resfriar a superfície dos solos contribui ainda mais na diferença entre as temperaturas de solos secos e úmidos.

De acordo com Carlson (2007), a idéia básica por trás dessas técnicas é que a temperatura radiante da superfície, associada aos fluxos de energia turbulentos, é sensivelmente dependente do teor de água no solo de superfície. Nesse contexto, inserem-se os modelos de transferência de energia solo-vegetação-atmosfera (SVAT) para a determinação do conteúdo de água presente em uma determinada superfície a partir de dados de temperatura radiante da superfície.

Com base nesses conceitos, diversos estudos sugerem que dados combinados de temperatura da superfície terrestre e índices de vegetação podem proporcionar informações sobre as condições de umidade da superfície.

Desenvolvido durante a década de 1990, destaca-se o método conhecido como o método do "triângulo", que se baseia na interpretação da distribuição espacial da TSC e do índice de vegetação. Removidos os valores referentes às nuvens, à superfície de água e aos valores extremos, se um número suficientemente grande de píxeis está presente, a forma da envolvente do gráfico assume a forma de um triângulo ou trapézio ligeiramente truncado. Na Figura 2.2, é apresentado esquematicamente o modelo proposto por Lambin (1994), que utiliza o NDVI e a TSC para obtenção do IUS.

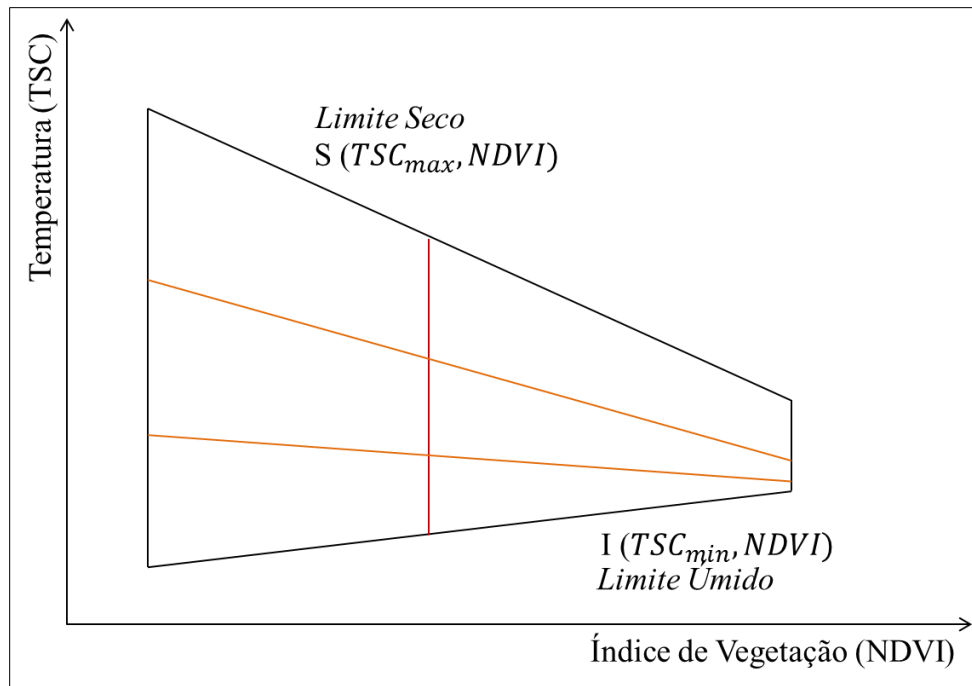


Figura 2.2. Diagrama de dispersão NDVI versus temperatura para determinação do IUS.

Observa-se que o limite superior ($S (TSC_{max}, NDVI)$) representa a condição seca, onde um determinado tipo de cobertura vegetal assume suas maiores temperaturas. No limite inferior ($I (TSC_{min}, NDVI)$), no qual ocorrem as menores temperaturas para uma determinada cobertura vegetal, representa-se sua condição úmida.

O método permite a utilização de dados espacializados para corrigir as condições de contorno para o modelo, dispensando a necessidade de dados auxiliares. Todavia, conforme expõe Carlson (2007), existem algumas limitações associadas ao processo, principalmente atrelados à subjetividade na identificação dos limites.

Há, ainda, a limitação de sua aplicação às regiões com topografia irregular e dentro do mesmo zoneamento climático e de uso do solo. A interpretação dos resultados em áreas acidentadas está sujeita à inferência não necessariamente correta de que regiões mais altas apresentam maiores índices de umidade.

Com o intuito de tornar os cálculos do índice de umidade em regiões de relevo montanhoso mais confiáveis, Hassan et al. (2007) sugerem a aplicação de correções à TSC em função da altitude. A consideração do modelo digital de elevação (MDE), associada aos cálculos de pressão atmosférica, permite a obtenção da temperatura potencial da superfície. Dessa forma, a TSC obtida através de dados de sensoriamento

remoto é ajustada ao valor representativo ao nível do mar, em uma atmosfera neutra-estratificada.

2.1.5 Detecção de Mudanças

A observação do desenvolvimento da paisagem no tempo é fundamental no entendimento dos processos e desenvolvimento de prognósticos, recebendo significado central para diversas tarefas dos órgãos de planejamento, com destaque àquelas dedicadas à proteção da natureza (Lang e Blaschke, 2009).

A base para qualquer procedimento de detecção de mudanças é a comparação de registros da realidade. Até que se pudesse contar com formas de sensoriamento apoiado em instrumentos, os sentidos foram os únicos meios disponíveis para se produzir registros e sistematizar informações para uso futuro (Kiel, 2008).

O desenvolvimento do sensoriamento remoto assume, então, um papel fundamental na identificação e quantificação de mudanças na cobertura do solo. Embora sua aplicação tenha adquirido espaço em diversos segmentos, a avaliação de mudanças por detecção digital ainda é recente, o que faz de sua consolidação científica uma etapa primordial para a obtenção de resultados mais precisos, acurados e confiáveis.

É importante salientar que os ecossistemas estão em permanente fluxo de mudanças, que ocorrem nas mais variadas escalas espaciais e temporais. As causas de tais mudanças podem ser naturais ou antropogênicas, ocorrendo ainda de forma combinada e paralela, distribuídas espacialmente de forma desigual.

Como a sustentabilidade dessas alterações é uma das preocupações primordiais da atualidade, ela faz crescer a demanda por informações relacionadas. A compreensão dos fluxos das transformações, em qualquer escala, é um grande desafio, pois as variáveis climáticas, a complexidade da cobertura e a antiguidade dos processos de conversão possuem grande peso nos resultados (Coppin, 2004).

A princípio, é de particular interesse, para a comunidade científica e gestores de ecossistemas, a compreensão dos distúrbios na vegetação causados por fenômenos naturais, como infestações de insetos e cheias, ou por atividades antrópicas, como a exploração de recursos e conversão da cobertura do solo.

A compreensão adequada da natureza da mudança e dos princípios envolvidos em sua detecção requer maior sofisticação de análise do que a detecção da mudança em si. Lambin (1997) expõe que as mudanças são possivelmente conduzidas por cinco categorias de causas: (i) mudanças nas condições climáticas a longo prazo; (ii) processos ecológicos e geomorfológicos, como erosão e a dinâmica natural da vegetação; (iii) alterações antrópicas na vegetação e paisagem; (iv) variabilidade climática interanual, associadas aos eventos de cheia e de seca; e (v) mudanças climáticas induzidas pela ação antrópica.

Na maioria dos casos, a detecção segura de mudanças pode vir a requerer dados de alguns anos, e em casos mais extremos, como a regeneração de florestas, décadas serão necessárias. De uma forma geral, a literatura científica apenas alerta para a importância de sua correta determinação, levando em conta os fins e os meios disponíveis e converge para períodos mínimos de três a seis anos, para os casos nos quais as mudanças analisadas possuem algum fator antrópico, ou ocorrem sob taxas médias (Kiel, 2008).

Dentre as diversas técnicas desenvolvidas para a detecção de mudanças a partir de dados de sensoriamento remoto, o indicador proposto por Lambin (1997) baseia-se nas relações biofísicas entre temperatura e cobertura vegetal, esquematizadas na Figura 2.3.

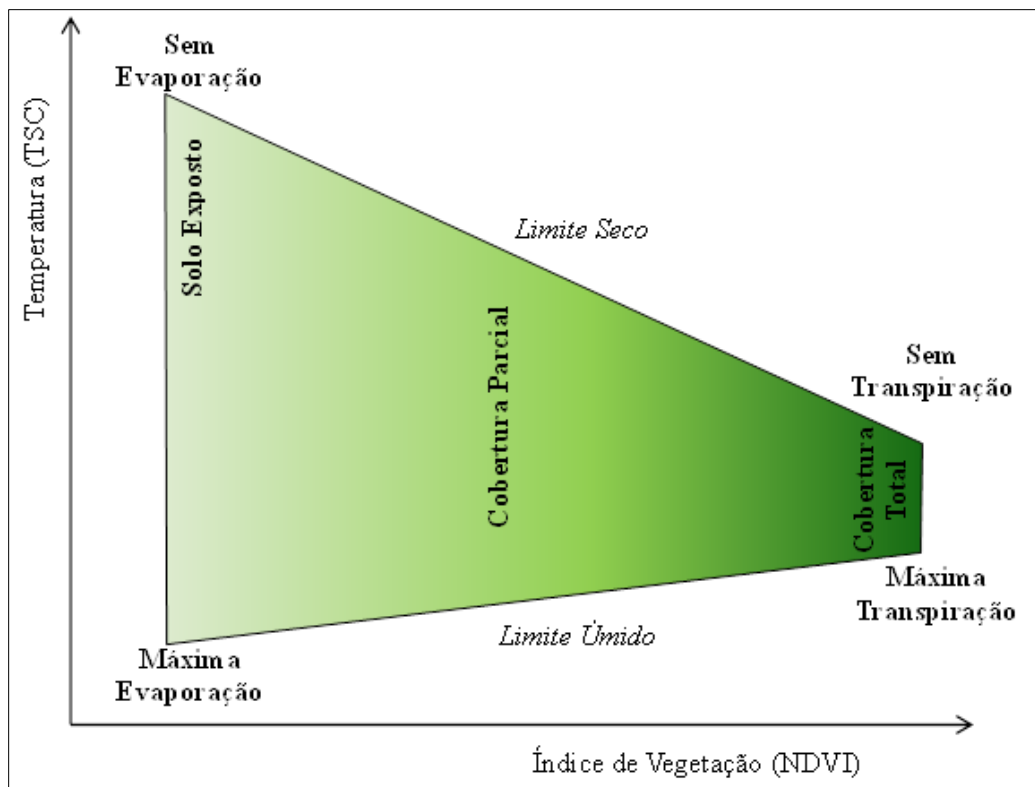


Figura 2.3. Relações biofísicas entre temperatura e índice de vegetação em termos da presença de água na superfície.

Para as superfícies sem cobertura vegetal, as variações na temperatura estão altamente relacionadas às variações no teor de umidade do solo: quão maior for o índice de água presente na superfície, maior será a evaporação e menor a temperatura a ela associada.

À medida que a cobertura vegetal aumenta, sob uma determinada umidade, as parcelas de evaporação da água e transpiração da camada vegetal somam-se.

A envoltória superior do trapézio, definida como o limite seco, corresponde também à linha de alta resistência à evapotranspiração. Já o limite inferior, ou limite úmido, representa a linha de maiores índices de evapotranspiração.

Lambin (1997) sugere que a razão entre a temperatura e o índice de vegetação representa uma boa forma de medir as mudanças ocorridas numa determinada superfície, ao transformar uma medida bidimensional em uma medida linear quantitativa, o que a torna adequada como indicador na análise multitemporal.

2.2 Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano Sustentável

De acordo com Silva (2004), o conceito de meio ambiente envolve três abordagens principais:

- meio ambiente natural, ou físico, constituído pelo solo, pela água, pelo ar atmosférico e pela flora, envolvendo a interação dos seres vivos e seu meio, onde se dá a correlação recíproca entre as espécies e as relações destas com o ambiente físico que ocupam;
- meio ambiente cultural, constituído pelo patrimônio histórico, artístico, arqueológico, paisagístico e turístico, considerando o sentido de valor especial que adquiriu ou de que se impregnou;
- meio ambiente artificial, constituído pelo espaço urbano construído.

Apesar de distinção clara entre as abordagens dadas, a gestão adequada do meio ambiente requer a consideração das relações e influências entre a preservação do meio ambiente natural e a garantia da qualidade de vida urbana para a população.

Em seu art. 2º, o Estatuto da Cidade, aprovado em 2010 pela Lei Federal 10.257, define, como uma das diretrizes gerais para o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade, a garantia do direito a cidades sustentáveis, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações.

Não havendo uma delimitação clara e específica para a expansão da urbanização nem fiscalização efetiva do poder público, a interferência humana sobre o espaço, muitas vezes, extrapola os limites impostos pelo sistema natural, como, por exemplo, através da ocupação de áreas de risco e de preservação ambiental, da realização de cortes no relevo para habitação, aterramentos, impermeabilização do solo, canalização de corpos de água, terraplanagem, entre outros procedimentos.

Entre as diversas estratégias traçadas a fim de integrar o meio ambiente natural e artificial, a intervenção nas coberturas de edificações, seja com a inserção de camada vegetal ou alteração do albedo da superfície, passa a representar uma opção sustentável

e economicamente viável na busca por soluções mitigadoras dos efeitos negativos trazidos pela urbanização.

2.2.1 Telhados Verdes e Telhados Frios (*Cool Roofs*)

O sistema de naturezação vem como uma alternativa real para sanar não só problemas como as ilhas de calor, mas também de poluição atmosférica, redução do calor transmitido para o interior das edificações e ampliação as áreas permeáveis. A naturezação urbana trata de transformar, em biótopos, os edifícios e espaços urbanos, a fim de que, unidos através de corredores verdes, eles facilitem a circulação atmosférica e melhorem o microclima da cidade (Rola, 2011).

Os telhados verdes podem, ainda, estar associados a sistemas de reutilização de água e coleta de água de chuva e às soluções paisagísticas. O conforto térmico dentro da estrutura predial também é influenciado pela presença de telhados verdes, que funciona como um isolador térmico, reduzindo a necessidade de utilização de aparelhos de ar-condicionado. Na Figura 2.4, observa-se uma estrutura básica do telhado verde.

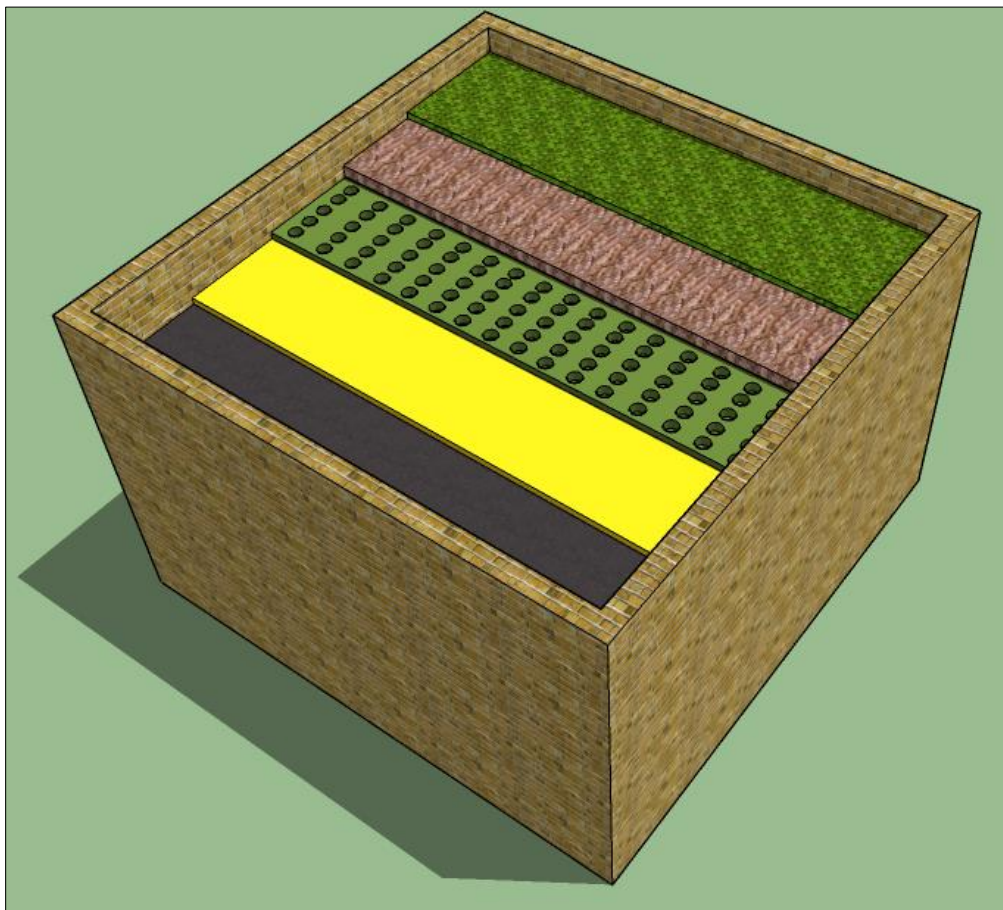


Figura 2.4. Implantação do telhado verde.

A primeira camada, representada na imagem em cinza, consiste em manta impermeável, inserida de forma a evitar infiltrações na cobertura. A camada mostrada em amarelo representa a manta anti-raiz, que, além de reforçar a impermeabilização da cobertura, evitará que o crescimento das raízes interfira na estrutura da edificação. A camada drenante, em verde, atua no direcionamento do fluxo de água e armazenamento de excessos, e pode ainda ser coberta por uma membrana de retenção de nutrientes. Em marrom, representa-se o substrato artificial, camada fundamental devido ao fato que a carga adicional da terra adubada convencional pode inviabilizar a solução adotada. Deve-se, portanto, atentar para a utilização de substratos artificiais de baixa densidade. Na camada superior, deve ser realizado o plantio de gramíneas pré-cultivadas.

Em 2012, foi promulgada a Lei Estadual N° 6.349, que autoriza a previsão dos telhados verdes nos projetos dos prédios públicos, autarquias e fundações do estado do Rio de Janeiro. O sistema consiste, basicamente, na implantação de vegetação arquitetada sobre laje de concreto ou cobertura. A melhoria do microclima dá-se com a transformação do dióxido de carbono (CO_2) em oxigênio (O_2) pela fotossíntese.

A Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro considera, em seu catálogo de referência, itens completos para inclusão de telhados verdes nos orçamentos das obras públicas do estado, todos englobando vegetação pré-cultivada, membrana de proteção anti-raiz e placas para drenagem controlada de módulo de substrato rígido para retenção do substrato nutritivo, de forma a proporcionar a oxigenação das raízes, evitando o seu amassamento por compactação e o carreamento de substrato.

A diferença básica entre os três sistemas propostos encontra-se na camada drenante, conforme descrito a seguir:

- sistema alveolar, de 60 a 80 kg/m^2 , constituído de membrana alveolar de PETG, com reservatórios de formato hexagonal e membrana de retenção de nutrientes composta de tecido reciclado;
- sistema galocha, de 45 a 75 kg/m^2 , com reservatório para água de placa PEAD embutida no módulo de substrato rígido para reservatório de água;
- sistema laminar, de 80 a 120 kg/m^2 , com grama.

A escolha do sistema deve levar em consideração as características da construção, com destaque à carga adicional que o sistema representa na estrutura em condições saturadas.

Diversos estudos experimentais e teóricos têm sido realizados para identificar o potencial de conservação de energia de telhados verdes. Os benefícios específicos de energia dependem do clima local e das características de construção específicas.

Considerando que os benefícios de transferência de calor são fornecidos principalmente por meio de processos de calor latente, o desempenho do sistema é superior em climas secos. Em paralelo, a espessura e as características térmicas do telhado vegetado influenciam diretamente na transferência de calor para o edifício, enquanto que o tipo e características das plantas definem os níveis de sombreamento e a transferência de radiação através das camadas (Santamouris, 2014).

A rega é outro fator importante, ao passo que determina a liberação de calor latente e regula o equilíbrio térmico do telhado. De modo geral, os estudos existentes, realizados para vários tipos de edifícios, características de telhado verde e zonas climáticas, revelam uma redução na demanda de energia anual que varia entre 1% e 40%, em casos extremos (Santamouris, 2014).

Zinzi (2012) destaca a dificuldade em modelar corretamente os telhados verdes, devido ao grande número de variáveis envolvidas nos mecanismos de transferência de calor. Em geral, faltam informações relacionadas aos dados de entrada necessários para os modelos adotados. Uma variável de grande influência é o conteúdo de água: enquanto telhados verdes bem regados proporcionam melhores condições para o resfriamento do edifício, sua capacidade de retenção de chuvas é reduzida. Dessa forma, torna-se fundamental que a gestão da água seja calibrada de acordo com as necessidades de cada região.

Outra alternativa que ganha espaço na construção civil e nos estudos acadêmicos sobre o tema é a utilização dos telhados frios (*cool roofs*), que se apresentam como uma solução sustentável, eficiente e economicamente viável. Essa técnica consiste na projeção de coberturas de forma a refletir maior parte da radiação solar e absorver menor quantidade de calor, conforme esquematizado na Figura 2.5. Essa propriedade pode ser obtida a partir da manipulação dos materiais utilizados nas coberturas dentro

do ambiente construído, a partir de pinturas, chapas, azulejos ou telhas com maior potencial reflexivo.

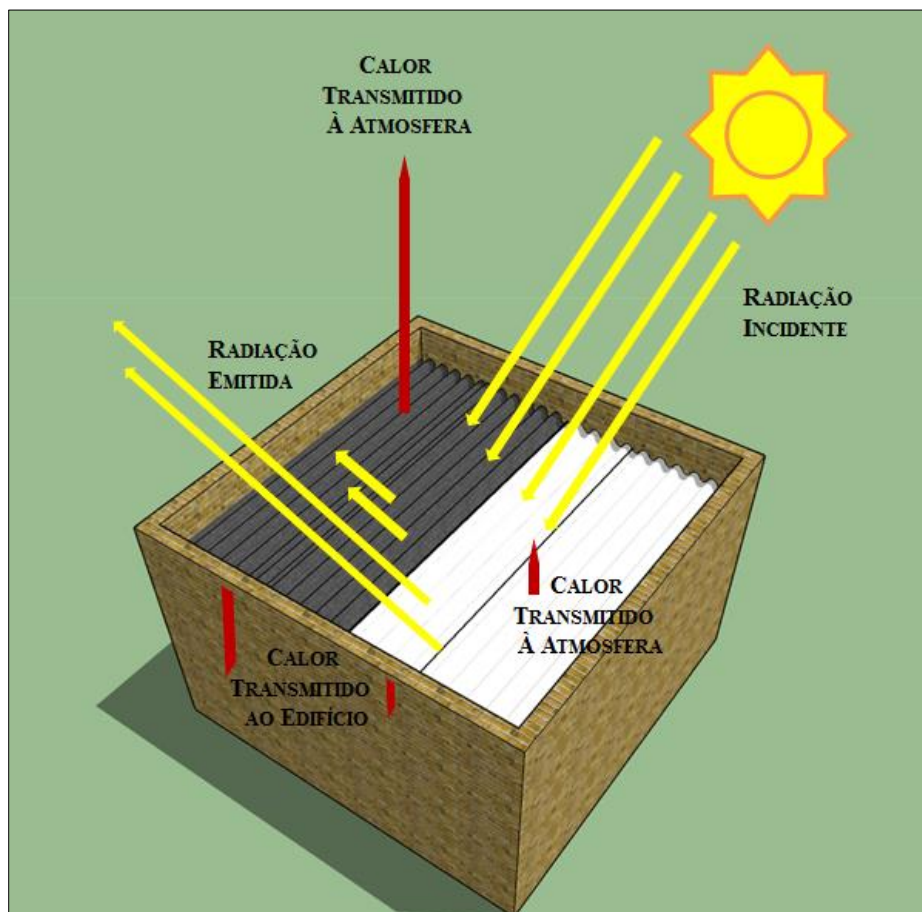


Figura 2.5. Interação da radiação solar incidente com coberturas escuras e claras.

O albedo representa, nesse contexto, uma propriedade dos materiais importante, ao passo que traduz a porcentagem da radiação incidente que é refletida por uma determinada superfície.

De acordo as simulações feitas por Menon *et al.* (2010) a nível global, para um período de 12 anos nos meses de junho a agosto, um acréscimo de 0,25 no albedo dos telhados e de 0,15 no albedo dos pavimentos nas áreas urbanas de toda a superfície terrestre acarretariam em uma compensação de CO₂ de aproximadamente 57 Gt. O estudo mostra ainda que a diminuição da temperatura da superfície terrestre global, com base no aumento do albedo de 0,003, foi de cerca de 0,01 °C.

Boixo *et al.* (2012) mostram, na simulação de implementação dos telhados frios em Andalusia, na Espanha, uma redução anual no consumo energético de 295.000 kWh, considerando apenas construções residenciais com coberturas planas. Evidencia-se uma

economia de 59 milhões de euros e a redução das emissões de CO₂ em 136.000 t. O estudo revela, ainda, que o potencial do benefício trazido pela implantação de telhados frios dependerá da temperatura ambiente, do tipo de construção e do preço referente à energia na região.

Apesar de existirem controvérsias sobre a expressividade da redução da temperatura global devido à implantação de telhados frios, é importante destacar sua incontestável contribuição no âmbito da eficiência energética. Trata-se de uma parte da solução para o problema da mudança climática global, e a simplicidade na implantação e manutenção relacionadas a essa solução, ante aos benefícios trazidos, reafirmam sua importância nos planos de desenvolvimento urbano sustentável das grandes cidades.

A cidade de Nova York conta, desde 2009, com uma lei municipal que visa a implantação dos telhados brancos. A iniciativa NYC *CoolRoofs* incentiva os proprietários do edifício a aplicar um revestimento branco reflexivo nas coberturas, o que reduz o consumo de energia, custos de refrigeração e as emissões de carbono. O programa tem como meta reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 30% até 2030. Em 2010, o governo federal dos Estados Unidos da América comprometeu-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 28% até 2020, e, como parte expressiva desse programa, encontra-se o programa de gerenciamento ativo das coberturas (*Roof Asset Management Program - RAMP*), que prevê a implantação de telhados frios em todos os edifícios públicos.

Na Europa, o uso de tintas e microfilmes com o intuito de aumentar o poder reflexivo das superfícies já é uma prática com considerável popularidade. Em 2011, foi fundado o Conselho Europeu Telhados Frios no intuito de desenvolver o conhecimento científico e a pesquisa em relação à tecnologia e de promover o uso e classificação de materiais associados aos conceitos de telhados frios na Europa.

No Brasil, entretanto, a implantação da legislação relativa ao telhado branco vem sendo questionada. Em 2009, tramitou, na câmara dos deputados, o projeto de lei 01-0615/2009, que, basicamente, acresce, ao Código de Obras e Edificações (Lei n.º 11.228/1992), que todos os telhados e coberturas das edificações deverão ser da cor branca, com todos os custos relacionados a essa implantação por conta dos proprietários dos imóveis.

A proposta gerou polêmica em diversos aspectos. Questionam-se fatores como a possibilidade de escurecimento das telhas devido ao surgimento de algas, fungos ou mofo, reação comum nas tintas imobiliárias tradicionais. Essa preocupação reafirma a necessidade da escolha de material com tratamento adequado para coberturas, sob pena de se obter resultados inversos aos esperados.

Nesse sentido, os materiais disponibilizados na construção civil voltados à implantação de telhados frios vêm evoluindo ao longo do tempo. Conforme descrito por Santamouris (2014), a primeira geração de materiais usados em telhados frios era composta de materiais naturais facilmente encontrados na natureza, caracterizados por valores de albedo relativamente altos, porém raramente superiores a 0,75. A segunda geração foi baseada no desenvolvimento materiais artificiais na cor branca, com valores de albedo próximos de 0,85. Numa terceira fase, passaram a ser desenvolvidos materiais coloridos com elevado valor de refletividade do espectro infravermelho. Mais recentemente, foram associados, aos materiais de alta refletividade, aditivos nanotecnológicos, como pinturas e telha termocromáticas.

Existe, ainda, resistência no desenvolvimento de estudos para telhados frios em regiões de clima moderado, nos quais a demanda por resfriamento é relativamente baixa, e ocorre em épocas específicas do ano. A maior crítica, nesse caso, é que os benefícios obtidos podem não vir a compensar o possível aumento da necessidade de aquecimento nas estações mais frias.

Kolokotroni (2013) examina o impacto da aplicação de uma tinta refletora sobre o telhado plano de um edifício de escritórios, resfriados naturalmente, na cidade de Londres, Inglaterra. Foi observado que a demanda pelo resfriamento foi significativamente reduzida, enquanto que o aumento na demanda por aquecimento não é tão expressivo. A economia de energia variou entre 1 e 8.5%, relativa a um albedo de 0,1 em condições similares. Dessa forma, os benefícios líquidos de energia apresentam-se positivos, associados ao conforto térmico proporcionado pelos telhados frios no interior dos prédios, compensando as penalidades energéticas referentes ao aquecimento.

Diante da controvérsia inerente ao tema, os estudos que visam a mensuração dos benefícios dos telhados frios, em escala local e global, representam uma colaboração

científica significativa à discussão. Todavia é fundamental que os resultados dos modelos físicos e matemáticos sejam contextualizados à realidade local, e que os aspectos econômicos e sociais sejam considerados na proposição de políticas públicas voltadas à garantia do direito adquirido no art. 225 da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988: *“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para às presentes e futuras gerações”*.

Um contraste geral entre os telhados frios e telhados verdes mostra que, apesar destes requererem maiores cuidados em termos de manutenção em relação àqueles, os benefícios propostos pelos telhados verdes extrapolam a questão da amenização das temperaturas, o que pode ser vantajoso em aspectos relacionados ao controle de cheias e da poluição urbanas.

Conforme descrito por Souza (2005), essas intervenções apresentam influências no aumento da umidade por evaporação natural, na melhoria da qualidade do ar, com o aumento da capacidade de filtração das partículas em até 85%, na criação de paisagem esteticamente agradável e no armazenamento de 30% a 100% de chuvas anuais.

2.2.2 Desenvolvimento Local e Dados Censitários

A utilização de informações de dados censitários para caracterizar espacial e temporalmente as condições ambientais adquire papel importante na avaliação do bem estar da população, conduzindo a soluções contextualizadas com os seus anseios e necessidades.

Para Kurkdjian e Pereira (2006), a representação mais detalhada da realidade socioespacial e a análise mais direta de aspectos familiares de uma área mostram os problemas territoriais mais urgentes e podem facilitar o diálogo e a negociação entre os diferentes atores urbanos, bem como a adoção de respostas sugeridas pela população a esses problemas.

Nesse sentido, a integração das ciências sociais e do sensoriamento remoto extrapola a simples fusão de dados: essa questão envolve também a quebra de tradições

de cada disciplina sobre a forma como o cientista avalia seu objeto de estudo (Wood e Skole, 1998).

No estudo das dimensões humanas das mudanças ambientais, coloca-se a questão da legitimidade científica dos resultados gerados pela junção de imagens de satélite com dados censitários. A busca por respostas a essa questão é válida, ao passo que é sempre mais factível usar fontes de dados já existentes do que produzir novos dados, principalmente para macroescalas de análise. (Alves, 2004)

A utilização de dados socioeconômicos e demográficos na investigação das mudanças associadas ao desmatamento, desertificação, expansão agropecuária e urbanização tem sido um tema cada vez mais abordado.

No âmbito da caracterização das condições de saneamento, Teixeira (2001) analisa a importância de variáveis socioeconômicas na definição de áreas prioritárias de investimento em saneamento, no município de Niterói. Soares (2004) avalia a evolução das características de saneamento e renda em sete municípios da Baixada Fluminense durante a década de 90, com base nos levantamentos censitários de 1991 e 2000, propondo o índice de inclusão econômico-sanitária – IIES.

Pandey e Seto (2013) examinam os impactos da urbanização sobre a perda de terras agrícolas na Índia, de 2001 a 2010, a partir da comparação de dados do censo com estimativas da conversão de terras agrícolas a partir de séries temporais do sensor MODIS, a fim de reconstruir histórias de mudanças de cobertura da terra.

Wood e Skole (1998) avaliam o desmatamento na Amazônia através da relação entre dados de sensoriamento remoto e dados do censo. O estudo de caso apresenta uma importante contribuição na identificação dos eventos históricos que contribuíram para a mudança da cobertura do solo na região.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida no presente trabalho partiu de dois blocos de análise, sendo realizada a avaliação da inter-relação entre eles e intra-relação entre os elementos que os compõem. Essa estrutura encontra-se esquematizada na Figura 3.1 e descrita nos itens a seguir:

- **fatores antrópicos** - a avaliação dos fatores antrópicos em relação à análise da paisagem baseou-se nos quesitos relativos aos dados censitários e à avaliação de cenários para substituição de materiais urbanos.
- **variáveis físicas** - a análise da cobertura vegetal foi baseada no NDVI, no SAVI e no LAI; foram detalhadas a obtenção dos valores do IUS e da TSC, que subsidiou a avaliação de cenários de substituição de materiais urbanos.
- **detecção de mudanças** - as mudanças ocorridas na bacia foram obtidas a partir das informações dos índices de vegetação e da avaliação associada à TSC.

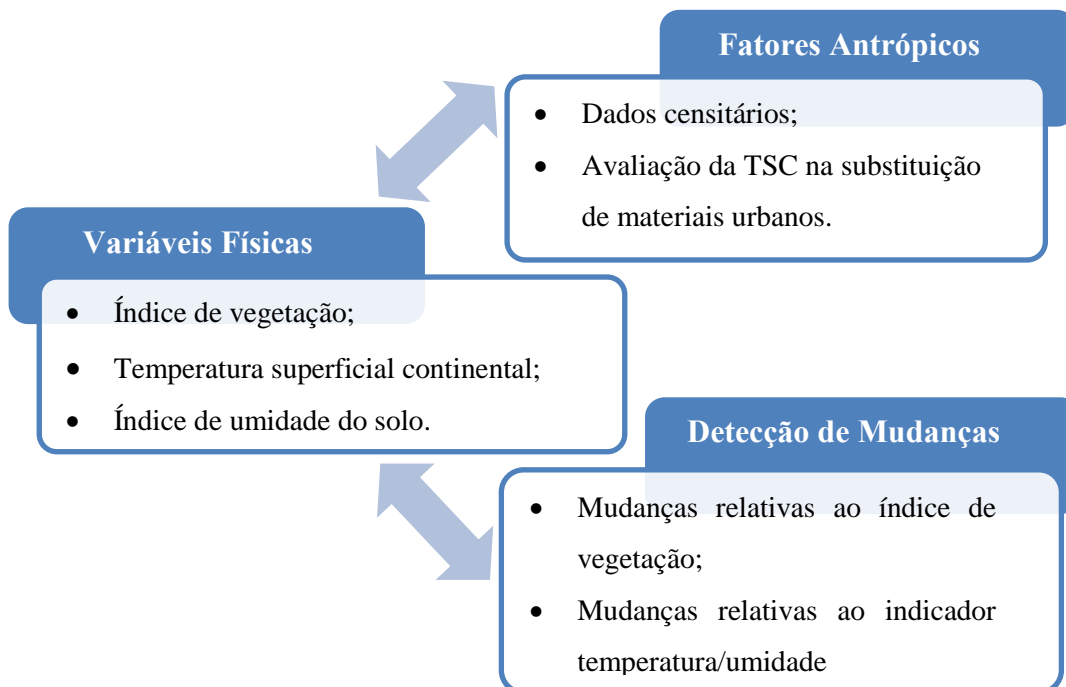


Figura 3.1. Esquematização das inter-relações dos blocos de análise.

A Figura 3.2 expõe o fluxograma metodológico das etapas que compõem a análise proposta nesta dissertação de forma simplificada.

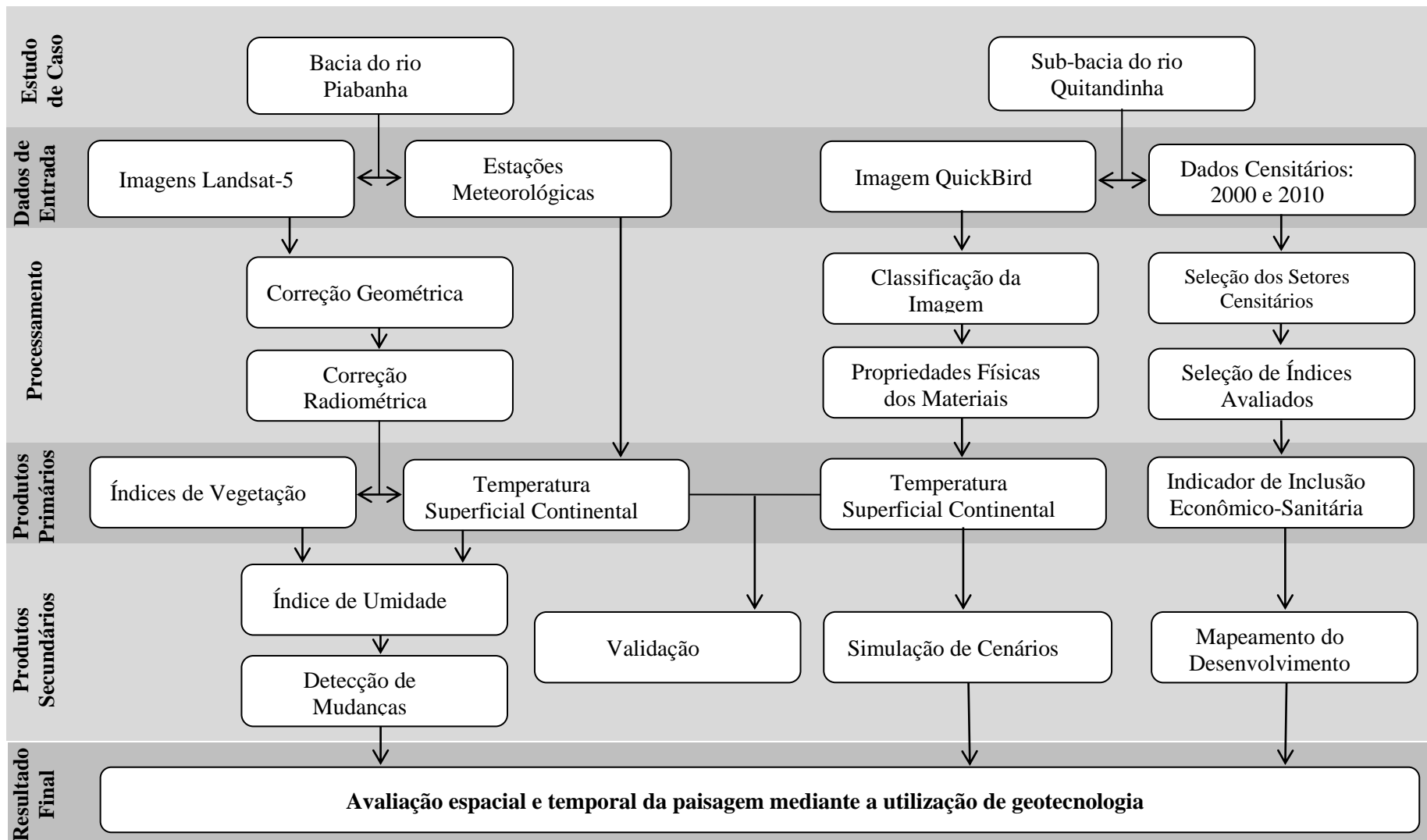


Figura 3.2. Fluxograma metodológico.

A seguir, estão explicitados os procedimentos para a coleta de informações, pré-processamento de imagens e obtenção dos produtos propostos, desenvolvidos com o auxílio dos códigos computacionais ArcGIS 10.1, Excel e Matlab.

3.1 Pré-Processamento

3.1.1 Seleção de Imagens

Para a seleção das imagens, obedeceu-se o seguinte critério de agrupamento:

- de março a agosto - período outono-inverno;
- de setembro a fevereiro - período primavera-verão.

Essas considerações têm a função principal de reduzir os erros decorrentes das influências atmosféricas características a cada período, sendo possível avaliar, com maior grau de exatidão, as variações decorrentes dos diferentes métodos utilizados, considerando as sazonalidades e os dados observados nas estações meteorológicas. Todas as imagens obtidas estão inseridas no período outono-inverno. Foram obtidas imagens temporalmente distantes, de forma a observar a evolução temporal das características mapeadas.

Outra questão considerada para a escolha das imagens a serem trabalhadas foi o índice de nuvens. Para uma abrangência total da área da bacia do rio Piabanha, é necessária a utilização das imagens relativas aos pontos 75 e 76 da órbita 217 do satélite Landsat. Para a imagem do ponto 75, os quadrantes de interesse são o 1º e o 2º; já na imagem do ponto 76, é de interesse, para o presente trabalho, a ausência de nuvens nos quadrantes 3º e 4º.

3.1.2 Correção Geométrica

O nível de pré-processamento das imagens orbitais do satélite Landsat-5, obtidas através do Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, não contempla a correção geométrica. Dessa forma, torna-se necessário o procedimento de georreferenciamento das imagens, assegurando, assim, a equivalência espacial entre as informações a serem comparadas.

O georreferenciamento das imagens foi realizado a partir da correção geométrica utilizando o modelo polinomial de 1º grau, registrando-as no sistema de referência WGS

84, projeção UTM, a partir da inserção de pontos de controle identificáveis em ambas as imagens.

Foram tomadas, como referência para correção geométrica das imagens do satélite Landsat-5, as ortofotos do projeto RJ-25 do IBGE. As fotografias aéreas coloridas ortorretificadas, em escala de 1:25.000, são articuladas por folhas segundo o recorte do mapeamento sistemático brasileiro e abrangem um quadrilátero geográfico de 07'30" de latitude por 07'30" de longitude.

A correção geométrica da imagem é realizada a partir do ajuste de uma equação aos dados dos pontos de controle inseridos, dada pela Equação 3.1 como

$$\begin{cases} x' = a_0 + a_1x + a_2y \\ y' = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases} \quad (3.1)$$

onde: x e y são as coordenadas da imagem original;

x' e y' correspondem às coordenadas de saída da imagem.

Durante a realocação de cada píxel, existe um erro associado, avaliado através da raiz do erro quadrático médio (EQM), correspondente a cada ponto de controle. Dessa forma, é possível avaliar os pontos de controle com maiores erros associados, eliminando-os e obtendo-se um ajuste com menor erro quadrático médio, expresso pela Equação 3.2:

$$EQM = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (3.2)$$

O EQM Total é obtido a partir da raiz quadrada da soma de todos os erros residuais e medido na unidade dos píxeis.

3.1.3 Calibração Radiométrica ($L_{\lambda i}$)

Na etapa referente à calibração radiométrica, é realizada a transformação do número digital associado a cada píxel em radiância espectral monocromática. Essa transformação é realizada através da Equação 3.3 (Chander e Markham, 2009) por

$$L_{\lambda i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) \times ND \quad (3.3)$$

onde: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral monocromática;

a_i e b_i são coeficientes de calibração;

ND é o número digital associado ao píxel.

Os coeficientes de calibração radiométrica do sensor TM – Landsat 5 (a_i e b_i) estão expostos na Tabela 3.1, juntamente com o comprimento de onda e os valores de radiância espectral no topo da atmosfera relacionado a cada banda das imagens.

Tabela 3.1. Descrição das bandas do mapeador temático (TM) do Landsat 5.

Banda Landsat 5	Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de Calibração		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($K_{\lambda i}$)
		a_i	b_i	
1	0,452 – 0,518	-1,52	193	1983
2	0,528 – 0,609	-2,84	365	1796
3	0,626 – 0,693	-1,17	264	1536
4	0,776 – 0,904	-1,51	221	1031
5	1,567 – 1,784	-0,37	30,2	220
6	10,45 – 12,42	1,2378	15,3032	N/A
7	2,097 – 2,349	-0,15	16,5	83,44

Fonte: adaptado de Chander e Markham (2009)

3.1.4 Refletância Monocromática ($\rho_{\lambda i}$)

A refletância monocromática quantifica a capacidade de refletir a radiação solar, definida pela razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente. De acordo com Allen *et al.* (2002), é possível determiná-la através da Equação 3.4 por:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \times L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \times \cos Z \times dr} \quad (3.4)$$

onde: π traduz a consideração de atmosfera isotrópica;

$\rho_{\lambda i}$ é a refletância monocromática;

$L_{\lambda i}$ é a radiância espectral monocromática;

$K_{\lambda i}$ é a radiância solar no topo da atmosfera, cujos valores utilizados estão expostos na Tabela 3.1;

Z é o ângulo zenital em radianos, cujo cosseno equivale ao seno do ângulo de elevação solar, disponível no cabeçalho dos produtos Landsat 5;

dr é o quadrado da razão entre a distância média entre a Terra e o Sol em um determinado dia do ano, dado pela Equação 3.5 (Tasumi, 2003) como

$$dr = 1 + 0,333 * \left(\cos DJ \times \frac{2\pi}{365} \right) \quad (3.5)$$

onde DJ é o dia sequencial do ano.

3.2 Caracterização da Bacia do Rio Piabanha a partir do satélite Landsat-5

3.2.1 Índices de Vegetação

A fim de realizar estimativas qualitativas e quantitativas da cobertura vegetal, foram calculados os índices de vegetação NDVI e SAVI, conforme as equações explicitadas a seguir.

3.2.1.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

O NDVI, já consagrado pela literatura, foi calculado através da Equação 3.6:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (3.6)$$

onde ρ_4 é a reflectância monocromática do infravermelho próximo (banda 4);

ρ_3 é a reflectância monocromática do vermelho (banda 3).

Os valores obtidos para o NDVI situam-se entre -1 e 1. Superfícies vegetadas apresentam, em geral, NDVI entre 0 e 1. Água e nuvens apresentam-se com valores negativos.

3.2.1.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo

Quanto ao SAVI, foi utilizada a Equação 3.7 proposta por Haute (1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L) \times (\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (3.7)$$

onde L é um fator de ajuste ao solo, que varia entre 0,1 e 1,0, sendo adotado o valor de L=0,5 no presente estudo (Bezerra, 2006; Barros, 2012);

ρ_3 e ρ_4 são reflectância monocromática das bandas 3 e 4, respectivamente.

Baseado nas informações do SAVI, foi desenvolvido o parâmetro biofísico LAI, definido pela razão entre a área foliar e a proporção de dossel. Foi selecionada a equação proposta por Allen *et al.* (2002), indicado na Equação 3.8:

$$LAI = -\frac{\ln \frac{0,69 - SAVI}{0,59}}{0,91} \quad (3.8)$$

3.2.2 Determinação da Temperatura de Superfície Continental (TSC)

O sensoriamento remoto usado na determinação TSC vem tornando-se uma ferramenta poderosa, à medida que possibilita sua análise temporal e espacial em resoluções adequadas. Porém, para estimar a TSC, são necessárias parametrizações e definição de hipóteses, o que a torna objeto de análise em diversos trabalhos, dada a

importância de sua determinação para estudos ambientais que envolvem o balanço de energia na superfície.

O presente trabalho analisa a estimativa da TSC de acordo com duas abordagens: a primeira delas representa parte do algoritmo SEBAL, modelo de estimativa da evapotranspiração em bacias hidrográficas, que utiliza dados meteorológicos e de sensoriamento remoto e baseia-se na temperatura de brilho no topo da atmosfera como uma aproximação da TSC (Allen *et al.*, 2002); outra metodologia explorada considera a correção dos efeitos atmosféricos de forma simplificada (Souza e Silva, 2005); por fim, além da correção atmosférica, é aplicada, à camada de TSC, um fator de correção relacionado ao relevo (Hassan *et al.*, 2007).

3.2.2.1 Temperatura com correção da Emissividade (T_{s1})

A temperatura de superfície continental é determinada como uma aproximação da temperatura de brilho, dada pela equação de Plank modificada (Allen *et al.*, 2002), indicada na Equação 3.9 como

$$T_{s1} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_1 \times K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (3.9)$$

onde: T_s é a temperatura da superfície;

K_1 e K_2 são constantes de calibração da banda termal, expostos na Tabela 3.2;

ϵ_6 é a emissividade, calculada conforme a Equação 3.10;

$L_{\lambda 6}$ é a radiância espectral termal.

Tabela 3.2. Constantes de calibração dos sensores TM e ETM+.

Satélite	K_1	K_2
	W/(m ² sr μm)	Kelvin
Landsat5 – TM	607,76	1260,56
Landsat7 – ETM+	666,09	1282,71

FONTE: adaptado de Chander e Markham (2009)

Um dos possíveis fatores que podem representar uma fonte de erro na estimativa da TSC é a emissividade da superfície. No presente trabalho, as emissividades na faixa espectral da banda termal do Landsat 5 foram obtidas conforme a Equação 3.10, de acordo com Allen *et al.* (2002):

$$\begin{cases} \epsilon_6 = 0,97 + 0,00331 \times LAI; & \text{para } LAI < 3 \\ \epsilon_6 = 0,98; & \text{para } LAI > 3 \end{cases} \quad (3.10)$$

3.2.2.2 TSC com Correção Atmosférica (T_{s2})

Outra abordagem para a estimativa da TSC envolve não apenas a correção da emissividade da superfície, mas também dos efeitos da atmosfera. Nesse caso, soma-se, à temperatura de brilho, um fator de correção, como expressa a Equação 3.11:

$$T_{s2} = T_b + \Delta T \quad (3.11)$$

A temperatura de brilho é obtida a partir da inversão da função de Planck, que, de acordo com Wukelic *et al.* (1989), pode ser estimada pela Equação 3.12:

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_i} + 1\right)} \quad (3.12)$$

onde T_b é a temperatura de brilho (K);

K_1 e K_2 são constantes de calibração do Landsat-5 (Tabela 3.2).

O fator de correção foi obtido de acordo com o procedimento baseado no trabalho de Souza e Silva (2005), dado pela Equação 3.13 como

$$\Delta T = \frac{B_i(T_b) \times \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1\right) - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \times B_i(T_a)}{\frac{\partial B_i(T_b)}{\partial T_b}} \quad (3.13)$$

onde: $B_i(T_b)$ é a radiância térmica medida pelo satélite, dada por $L_{\lambda 6}$;

$B_i(T_a)$ refere-se à radiância emitida pela atmosfera dada pela função de Planck,

onde T_a é a temperatura média da camada atmosférica, dada pela Equação 3.14:

$$B_i(T_a) = \frac{K_1}{\ln\left(\frac{K_2}{T_a} - 1\right)} \quad (3.14)$$

O termo T_a é definido a partir da temperatura do ar a 2 metros da superfície (T_0), com base na Equação 3.15, determinada empiricamente por Qin *et al.* (2001):

$$T_a = 19,73 + 0,909T_0 \quad (3.15)$$

Os fatores α_1 e α_2 são definidos nas Equações 3.16 e 3.17 como

$$\alpha_1 = \tau_i \times \varepsilon_1 \quad (3.16)$$

$$\alpha_2 = (1 - \tau_i)[1 + (1 - \varepsilon_1) \times \tau_i] \quad (3.17)$$

onde τ_i é a transmitância atmosférica definida pela Equação 3.18 por

$$\tau_i = 0,951 - 0,01 \times w \times \exp\left(\frac{3w}{1+w}\right) \quad (3.18)$$

onde w corresponde ao vapor de água, obtido pela equação de Leckner (Iqbal, 1983), expressa pela Equação 3.19 como

$$w = 0,493 \times UR \times \frac{e_s}{T_0} \quad (3.19)$$

onde UR refere-se à umidade relativa do ar;

e_s é a pressão de saturação de vapor de água (hPa), dada pela Equação 3.20 (Iqbal, 1983) :

$$e_s = 0,01 \times \ln \left(26,23 - \frac{5416}{T_0} \right) \quad (3.20)$$

A simplificação do cálculo do fator “w” é adequada ao nível de detalhamento da análise proposta pelo presente trabalho. Para um maior detalhamento, podem ser inseridas informações do perfil atmosférico em trabalhos futuros.

3.2.2.3 Temperatura com correção em função do relevo

Os métodos utilizados para a detecção da TSC a partir de dados de sensoriamento remoto apresentam melhores resultados quando envolvem regiões de relevo regular.

Nesse caso, foi aplicada a metodologia proposta por Hassan *et al.* (2007), que consiste basicamente em desenvolver a correção da temperatura de regiões de maior altitude para sua representativa a nível do mar, reduzindo as influências do relevo.

Inicialmente, a pressão atmosférica em função do relevo é calculada para cada píxel, tomando como camada base o modelo digital de elevação (MDE), conforme Equação 3.21:

$$p = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 \times z}{293} \right)^{5,26} \quad (3.21)$$

onde p é a pressão atmosférica estimada em função do relevo;

z é a elevação do píxel.

A TSC potencial é obtida através da Equação 3.22 na forma

$$\theta_s = T_s \left(\frac{p_o}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (3.22)$$

onde: T_s é a TSC;

p_o é a pressão atmosférica ao nível do mar, aqui assumida como 101,3 kPa;

R é a constante do gás, admitida como $287 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

c_p é a capacidade térmica específica do ar, de aproximadamente $1004 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

A estimativa da TSC apresentada neste item foi selecionada para as aplicações relativas à determinação do IUS e de detecção de mudança pelo indicador de Lambin.

3.2.2.4 Avaliação em função da precipitação

Para o período entre 2001 e 2011, foi desenvolvida uma avaliação da TSC potencial em contraste com a precipitação observada nos dias antecedentes a cada imagem. Para obtenção dos dados de precipitação, foi utilizado o sistema TOVAS (*TRMM Online Visualization and Analysis System*), que consiste numa interface desenvolvida pela NASA para visualização e análise dos dados do satélite TRMM, disponíveis a cada 3 horas. Foram solicitados dados de precipitação dos 15 dias antecedentes a cada imagem avaliada. Como área de análise, foi selecionado o polígono de coordenadas N=-22,083°, S=-22,583°, L=-42,666° e O=-43,416°, conforme exposto na Figura 3.3.

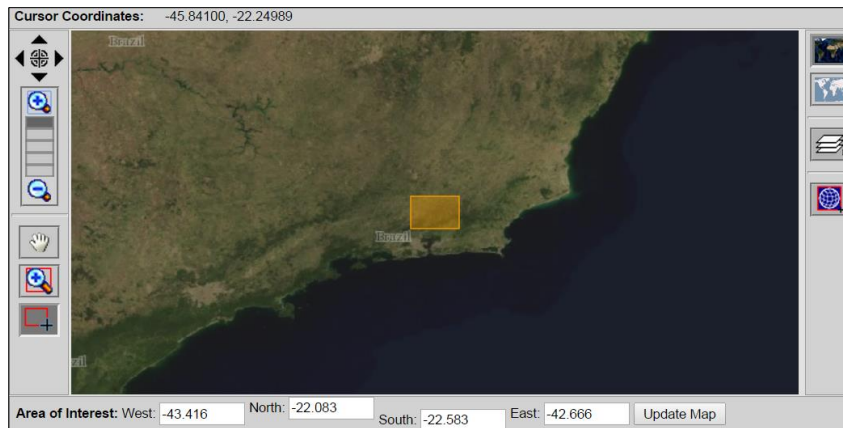


Figura 3.3. Área de abrangência da bacia do rio Piabanha para seleção de dados TRMM. FONTE: TRMM *Online Visualization and Analysis System* (TOVAS); acesso em 05 de maio de 2014.

3.2.3 Índice de Umidade do Solo

A estimativa do IUS foi desenvolvida através dos valores de NDVI e da TSC potencial (θ_s), ambos obtidos conforme explicitado nos itens anteriores, de acordo com a Equação 3.23 na forma

$$IUS = \left(\frac{T_{max} - TSC}{TSC_{max} - TSC_{min}} \right) \quad (3.23)$$

onde: *IUS* é o índice de umidade do solo estimado;

TSC refere-se à temperatura superficial continental;

T_{smax} e T_{smin} representam os limites seco e úmido, respectivamente, referente a cada imagem avaliada.

As retas representativas dos limites superior e inferior foram ajustadas usando a técnica dos mínimos quadrados, a partir do gráfico de dispersão relacionando os valores de NDVI versus TSC potencial em cada píxel, para cada imagem.

Por haver disparidade entre o tamanho do píxel dos dados de NDVI, com dimensões de 30 m x 30 m, e TSC, com dimensões de 120 m x 120 m, houve a necessidade de reamostrar os dados de NDVI.

As nuvens de pontos obtidas seguiram modelo descrito por Lambin (1994), e os limites superior e inferior foram obtidos conforme, respectivamente, as Equações 3.24 e 3.25:

$$TSC_{máx} = a_s \times NDVI + b_s \quad (3.24)$$

$$TSC_{min} = a_i \times NDVI + b_i \quad (3.25)$$

Desta forma, a Equação 3.23 pode ser reescrita como a Equação 3.26:

$$IUS = \left(\frac{a_s \times NDVI + b_s - TSC}{(a_s - a_i) \times NDVI + (b_s - b_i)} \right) \quad (3.26)$$

3.2.4 Detecção de Mudanças

Para avaliar as mudanças na cobertura vegetal no período avaliado, foram utilizados os métodos da imagem-diferença e o indicador temperatura-índice de vegetação.

O método da imagem-diferença consiste na produção, a partir da subtração píxel a píxel de duas imagens temporalmente distintas, de uma terceira imagem representativa das mudanças ocorridas temporal e espacialmente. É possível, dessa forma, realçar diferenças decorrentes da conversão no uso do solo, desmatamento, desflorestamento e da sazonalidade.

O índice de vegetação selecionado foi o NDVI. Conforme anteriormente descrito, os valores de NDVI foram obtidos a partir das imagens do satélite Landsat-5 temporalmente distintas, identificando áreas em que ocorreu ganho ou perda do vigor vegetativo.

Na etapa inicial, cada mapa é confrontado com o mapa do ano anterior a partir a subtração dos mesmos. Destaca-se, ainda, que, nessa etapa, os valores de NDVI foram normalizados para o intervalo de 0 a 1, de forma a facilitar as futuras comparações.

No intuito de potencializar a interpretação visual dos mapas temáticos de mudança e a posterior classificação qualitativa da imagem, foi aplicada, aos mapas temáticos gerados nesta etapa, a análise de maioria, que consiste em substituir células em uma quadrícula com base no valor assumido pela maioria das células adjacentes.

Na medida em que a vizinhança do píxel passa a ser majoritariamente inserida em uma determinada classe, o píxel passa a ser reclassificado como tal. Nesse caso, foi utilizada uma janela de 3x3 píxeis, totalizando uma vizinhança de 8 píxeis.

Após o tratamento, as imagens foram agrupadas em cinco classes sintéticas, expostas na Tabela 3.3, representando, de forma significativa, as mudanças ocorridas na bacia em termos do índice de vegetação estudado e possibilitando a conseguinte geração dos mapas temáticos de tendência de mudanças.

Tabela 3.3. Classes sintéticas de mudanças.

Índice	Classe
-2	Alta diminuição
-1	Diminuição
0	Sem mudança
1	Crescimento
2	Alto crescimento

Para avaliar a tendência das mudanças ocorridas, a simples subtração dos mapas de mudança pode apresentar limitações, ao passo que diferentes processos de mudança podem vir a resultar em valores iguais.

Nesse sentido, foi gerado um algoritmo em Matlab, exposto no Anexo A, para a classificação, de forma a agrupar as mudanças sem perda de informação, com base nas 25 classes sintéticas propostas por Kiel (2008), expostas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Classes sintéticas de tendência de mudanças.

Mudança Final		Mudança Inicial		Tendência	
Índice	Classe	Índice	Classe	Índice	Classe
-2	Alta diminuição	-2	Alta diminuição	1	Desvegetando
-2	Alta diminuição	-1	Diminuição	2	Diminuição desacelerada
-2	Alta diminuição	0	Sem mudança	3	Desvegetado
-2	Alta diminuição	1	Crescimento	4	Revegetação acentuada
-2	Alta diminuição	2	Alto crescimento	5	Recomposição acentuada
-1	Diminuição	-2	Alta Diminuição	6	Diminuição Acelerada
-1	Diminuição	-1	Diminuição	7	Diminuição Estável
-1	Diminuição	0	Sem Mudança	8	Decomposto
-1	Diminuição	1	Crescimento	9	Revegetação
-1	Diminuição	2	Alto Crescimento	10	Recomposição
0	Sem mudança	-2	Alta diminuição	11	Diminuição acentuada
0	Sem mudança	-1	Diminuição	12	Diminuição
0	Sem mudança	0	Sem mudança	13	Estável
0	Sem mudança	1	Crescimento	14	Crescimento
0	Sem mudança	2	Alto crescimento	15	Crescimento acentuado
1	Crescimento	-2	Alta Diminuição	16	Desvegetação Acentuada
1	Crescimento	-1	Diminuição	17	Desvegetação
1	Crescimento	0	Sem Mudança	18	Recomposto
1	Crescimento	1	Crescimento	19	Crescimento Estável
1	Crescimento	2	Alto Crescimento	20	Crescimento Acelerado
2	Alto crescimento	-2	Alta diminuição	21	Decomposição acentuada
2	Alto crescimento	-1	Diminuição	22	Decomposição
2	Alto crescimento	0	Sem mudança	23	Revegetado
2	Alto crescimento	1	Crescimento	24	Crescimento desacelerado
2	Alto crescimento	2	Alto crescimento	25	Vegetando

Analogamente, foi desenvolvida a detecção de mudanças baseada no indicador temperatura-índice de vegetação, proposto por Lambin (1997), que leva em consideração os valores de temperatura superficial e índice de vegetação, e é expresso pela Equação 3.27.

$$i = \arctan\left(\frac{\text{Temperatura Superficial Continental}}{\text{Índice de Vegetação}}\right) \quad (3.27)$$

No presente trabalho, a estimativa de temperatura utilizada foi a obtida através dos dados do sensor Landsat-5, com correção dos efeitos atmosféricos e topográficos. Como índice de vegetação, foi utilizado o NDVI.

A fim de obter maior sensibilidade em termos do indicador proposto, os valores de NDVI foram normalizados entre 0 e 1. Já as temperaturas variam entre 0°C e 60°C. A razão entre a temperatura e o NDVI retornará valores com limite inferior a 0, quando a temperatura for de 0°C, e limite superior tendendo positivamente ao infinito quando os valores de NDVI tenderem a 0.

Dessa forma, observa-se que o indicador apresentará valores maiores nas regiões submetidas a maior estresse, onde as temperaturas são maiores e o índice de vegetação menor, como é o caso de regiões urbanas compostas por materiais de elevada capacidade térmica e reduzido vigor vegetativo, por exemplo.

O indicador, que retorna os valores dos arcos correspondentes à tangente dadas pela razão entre temperatura e NDVI, variará no primeiro quadrante do ciclo trigonométrico entre 0 e $\frac{\pi}{2}$. A Figura 3.4 apresenta, no ciclo trigonométrico, a forma como o indicador variará de acordo com os possíveis valores assumidos pela razão temperatura/NDVI de cada píxel.

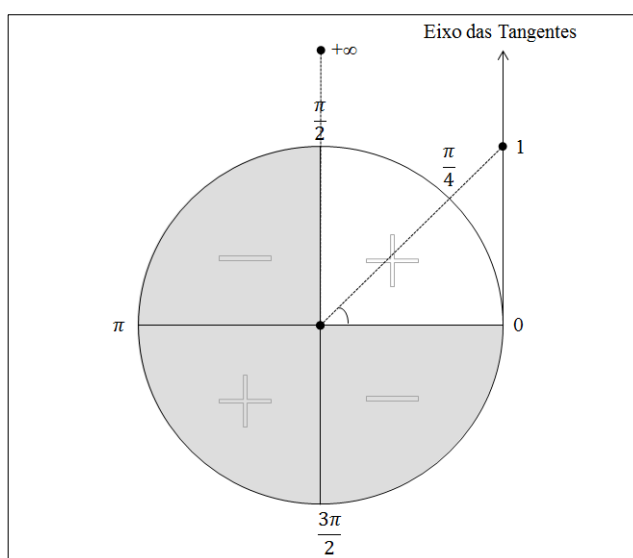


Figura 3.4. Representação das tangentes no ciclo trigonométrico.

Para facilitar as comparações e harmonizar a interpretação das informações geradas, o indicador foi também escalado e invertido entre valores de 0 e 1, de forma que o valor máximo da série original passa a ser 0, representativo da condição de maior estresse, e o valor mínimo por 1, indicativo das condições de menor estresse.

Analogamente ao realizado com os mapas de NDVI, cada imagem do indicador temperatura-índice de vegetação foi confrontada com a do ano anterior, a partir de subtração.

Diferentemente do que ocorre com o NDVI, um indicador já bastante difundido e cuja sensibilidade diante das variações permite uma avaliação direta dos valores, o

indicador temperatura-índice de vegetação, ao englobar simultaneamente duas variáveis, requer maior detalhamento em sua análise de variações.

Dessa forma, a classificação preliminar foi subsidiada pela avaliação do histograma das sete imagens-diferença geradas. Após a classificação inicial, foi aplicado o tratamento baseado na análise de majoridade. Em seguida, as imagens também foram agrupadas em cinco classes sintéticas, conforme mostra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Classes sintéticas de mudanças.

Índice	Classe
-2	Aumento extremo das condições de estresse
-1	Aumento nas condições de estresse
0	Sem mudança significativa
1	Diminuição das condições de estresse
2	Diminuição extrema das condições de estresse

3.3 Avaliação da Temperatura na Bacia do Rio Quitandinha a partir das Propriedades dos Materiais Urbanos

3.3.1 Temperatura de Superfície Continental a partir das Propriedades dos Materiais

Outra abordagem dada à estimativa de temperatura, utilizada no presente trabalho como avaliação dos resultados obtidos a partir dos dados de sensoriamento remoto, refere-se à metodologia proposta por Albuquerque (2009), baseada no modelo de balanço de fluxo de energia com inclusão de uma camada de vegetação.

Os fluxos de energia considerados são: Q_s ondas curtas, R_L ondas longas, H_s calor sensível e LE calor latente. Assim como nas demais variáveis atribuídas ao modelo, os subscritos g, h, f e gf representam o elemento ao qual se refere, sendo “g” referente ao solo, “h” à altitude do topo do dossel, “f” à folhagem e “gf” ao solo acrescido de camada de vegetação.

A Tabela 3.6 traz o resumo das variáveis aplicadas ao modelo e a Figura 3.5 ilustra os fluxos de energia.

Tabela 3.6. Descrição das variáveis do modelo de estimativa de temperatura a partir das propriedades físicas dos materiais.

Variável	Localização	Simbologia
Umidade Específica	na altitude de referência	q_a
	na folhagem	q_f
	no dossel	q_{af}
	e no solo	q_g
Temperatura	na altitude de referência z	T_a
	na folhagem	T_f
	no dossel	T_{af}
	no solo	T_g
	do solo com vegetação de referência no subsolo	T_{gf}
Velocidade do vento na altura de referência (z)		u_a
Coeficientes de transferência de calor	no solo	c_{H0}
	no solo com vegetação	c_{Hg}
	no interior do dossel	c_f
	no topo do dossel	c_{Hh}
Razão de umidade	à superfície	w_g
	média no subsolo	w_2

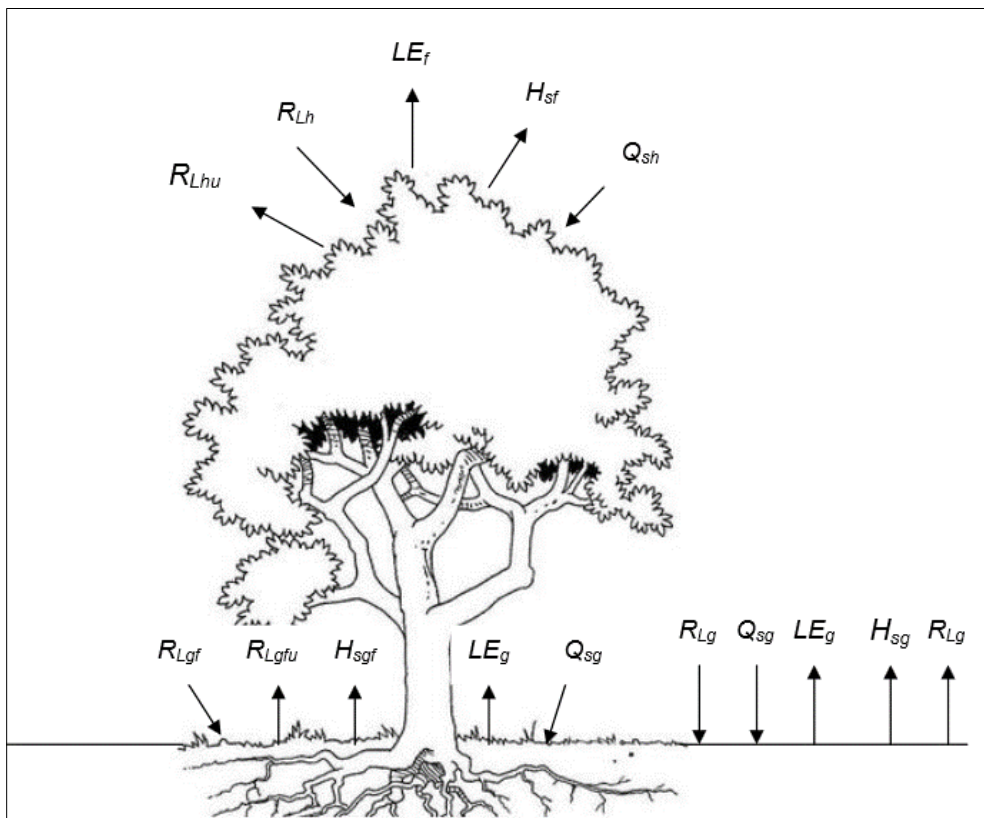


Figura 3.5. Fluxos de energia. FONTE: Albuquerque (2009)

A Equação 3.28 expressa a equação governante do modelo por

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{c_1 G}{\rho_s c_s d_1} - \frac{c_2 (T_g - T_r)}{\tau_1} \quad (3.28)$$

onde: T_g é a temperatura da superfície em *Kelvin* ;

T_r é a principal componente do termo de restauração da equação, representando a temperatura do subsolo profundo;

ρ_s é a densidade do solo em $g \cdot cm^{-3}$;

c_s é o calor específico do solo em $cal \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$;

d_1 é proporcional à profundidade alcançada pela onda de variação de temperatura diária, sendo resolvida pela Equação 3.29 como

$$d_1 = (K_s \tau_1)^{1/2} \quad (3.29)$$

onde: K_s é a difusividade térmica do solo em $cm^2 \cdot s^{-1}$;

τ_1 corresponde ao período de um dia em segundos;

c_1 e c_2 são, respectivamente, $2\pi^{1/2}$ e 2π , conforme propostos por Deardorff (1978) para a espessura da camada tendendo a zero;

G é a soma dos fluxos da atmosfera no solo em $cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, expresso pela Equação 3.30:

$$G = Q_{sg} + R_{Lg} - R_{Lgu} - H_{sg} - L_{sg} \quad (3.30)$$

Para a inclusão de camada de vegetação, é considerado um fator de sua densidade, expresso por σ_f : esse valor pode variar de 0, no caso de ausência de vegetação, a 1, quando é observada a presença de vegetação densa, bloqueando a incidência de ondas curtas. O balanço do fluxo de energia no solo com presença de vegetação passa a ser descrito pela Equação 3.31:

$$G_{gf} = Q_{sgf} + R_{Lgf} - R_{Lgfu} - H_{sgf} - L \cdot E_{gf} \quad (3.31)$$

Como entrada, os dados de temperatura e umidade (T_a e u_a) para o dia avaliado são ajustados a uma série de Fourier, de forma a tornar a série contínua. Devido à influência do ar acima do dossel, da folhagem e da superfície do solo no ar inserido no

volume do dossel, sua temperatura média e umidade específica são estimadas, respectivamente, pelas Equações 3.32 e 3.33:

$$T_{af} = (1 - \sigma_f)T_a + \sigma_f(0,3T_a + 0,6T_f + 0,1T_{gf}) \quad (3.32)$$

$$q_{af} = (1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0,3q_a + 0,6q_f + 0,1q_g) \quad (3.33)$$

onde T_f é a temperatura da superfície da folhagem, parametrizada em função do balanço de energia no dossel;

q_f é a umidade específica, dada pela Equação 3.34:

$$q_f = r'' \cdot q_{sat}(T_f) + (1 - r'')q_{af} \quad (3.34)$$

onde $q_{sat}T_f$ representa a umidade específica saturada à temperatura da folhagem;

r'' representa a parcela da evaporação potencial dada pela Equação 3.35

$$r'' = 1 - \delta_c \frac{r_s}{r_s + r_a} \left[1 - \left(\frac{W_{dew}}{W_{dmax}} \right)^{2/3} \right] \quad (3.35)$$

$$\text{onde } \delta_c = \begin{cases} 0, & \text{se } (q_{af} > q_{sat}(T_f)) \\ 1, & \text{em qualquer outra situação.} \end{cases} ;$$

W_{dew} é a razão entre a massa de água retida na folhagem e a área do solo;

W_{dmax} é valor máximo de W_{dew} ;

r_a é a resistência atmosférica, dada pela Equação 3.36:

$$r_a = (c_f \cdot u_{af})^{-1} \quad (3.36)$$

onde u_{af} representa o vento médio na camada de vegetação (Equação 3.37):

$$u_{af} = 0,83\sigma_f \cdot c_{Hh}^{1/2} \cdot u_a + (1 - \sigma_f)u_a \quad (3.37)$$

r_s é a resistência generalizada do estômato da folha, conforme Equação 3.38:

$$r_s = 2 \left[\frac{Q_{max}}{Q_s} + \zeta + \left(\frac{w_{wilt}}{w_s} \right)^2 \right] \quad (3.38)$$

onde w_{wilt} é a razão de umidade do solo que leva a vegetação ao ponto de murchar;

w_s é a umidade do solo na zona de enraizamento:

$$w_s = 0,9w_2 + 0,1w_g \quad (3.39)$$

onde w_2 é a razão de umidade do solo média;

w_g é a razão de umidade do solo na superfície.

A seguir, é descrita a formulação para obtenção de cada parcela do fluxo de energia referente à superfície com e sem a inclusão da camada de vegetação.

O termo Q_s representa o fluxo radiativo de ondas curtas, Q_{\max} o seu valor máximo, ζ a dependência sazonal, que, conforme Albuquerque (2009), em latitudes temperadas, vale zero na estação de crescimento da vegetação e um número bem maior que a unidade nas outras estações do ano.

O fluxo de ondas curtas absorvido pela superfície sem vegetação (Q_{sg}) e com a sua inclusão (Q_{sfg}) resume-se à equação de Q_s , expressa pela Equação 3.40:

$$Q_s = (1 - \sigma_f)(1 - \alpha_g)S(\cos\zeta)\tau_s^{\sec(\zeta)} \quad (3.40)$$

onde τ_s representa a transmissividade da atmosfera;

S é a intensidade da radiação solar no topo da atmosfera;

α_g representa o albedo do solo;

ζ é o ângulo solar zenital, dado pela Equação 3.41:

$$\cos\zeta = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos A_s \quad (3.41)$$

onde φ representa a latitude do local;

δ , em graus, representa a declinação solar;

A_s representa o ângulo solar relativo à hora local.

O fluxo radiativo de ondas longas absorvido (R_L), considerando céu claro sem nebulosidade, é simplificado pela Equação 3.42, que representa uma combinação proporcional a σ_f do comportamento da superfície em condições de solo exposto (R_{Lg}) e vegetação densa (R_{Lf}):

$$R_L = (1 - \sigma_f) \varepsilon_g \cdot 0,67 \cdot 0,67 (1670 q_a)^{0,08} \sigma \cdot T_a^4 + \frac{\sigma_f [\varepsilon_f \cdot \sigma \cdot T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot T_{gf}^4]}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \cdot \varepsilon_g} \quad (3.42)$$

onde ε_g representa a emissividade da superfície;

ε_f representa a emissividade da folhagem;

$\sigma \cdot T_a^4$ representa a radiação total emitida pela superfície;

$0,67(1670 q_a)^{0,08}$ é a parametrização da emissividade efetiva do ar.

O fluxo radiativo de ondas longas emitido pela superfície sem a presença de vegetação (R_{Lgu}) e com a inclusão da camada de vegetação (R_{Lfgu}) é resultado do produto da radiação total pela emissividade da superfície, expressa por R_{Lu} , conforme descrito pela Equação 3.43:

$$R_{Lu} = (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \cdot \sigma \cdot T_{gf}^4 + (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g \cdot 0,67 \cdot 0,67 (1670 q_a)^{0,08} \sigma \cdot T_a^4] + \frac{\sigma_f [\varepsilon_g \cdot \sigma \cdot T_{gf}^4 + (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot T_f^4]}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \cdot \varepsilon_g} \quad (3.43)$$

O fluxo de calor sensível emitido pela superfície é dado pela Equação 3.44:

$$H_{sg} = \rho_a \cdot c_p \cdot c_{H0} \cdot u_a (T_g - T_a) \quad (3.44)$$

onde ρ_a representa a densidade do ar;

c_p é o calor específico à pressão constante;

u_a é a velocidade do vento na altitude de referência em $m \cdot s^{-1}$;

c_{H0} é o coeficiente de transferência de calor ou de umidade, dado pela Equação 3.45 para uma atmosfera neutra:

$$c_{H0} = \frac{k^2}{\ln(z_r/z_0)^2} \quad (3.45)$$

onde k representa a constante de von Karman, atribuindo-se 0,41;

z_r representa a altitude de referência em metros, considerando-se 2 m;

z_0 representa o comprimento da rugosidade da superfície em metros.

Considerando a inclusão de uma camada de vegetação, substitui-se c_{H0} por c_{Hg} , u_a por u_{af} e T_a , por T_{af} .

O fluxo de calor latente emitido pela superfície ($E \cdot L$) é dado pela Equação 3.46:

$$L_{sg} = L \cdot \rho_a \cdot c_{H_0} \cdot u_a \cdot \alpha [q_{sat}(T_g) - q_a] \quad (3.46)$$

onde $q_{sat}(T_g)$ representa a umidade específica saturada do ar à temperatura da superfície;

q_a a umidade específica do ar na altitude de referência;

α é o coeficiente de saturação de água no solo, dado pela Equação 3.47:

$$\alpha = \min(1, w_g / w_k) \quad (3.47)$$

onde min é a função mínimo;

w_g é a razão do volume de água no solo pelo volume do solo à superfície;

w_k é a razão do volume de água no solo saturado;

L é o calor latente de vaporização é dado pela Equação 3.48:

$$L = [2501 - 0,00237 (T_a - 273,16)] \quad (3.48)$$

Analogamente ao fluxo de calor sensível emitido, ao se considerar a inclusão de uma camada de vegetação, substitui-se C_{H_0} por C_{Hg} , u_a por u_{af} e T_a por T_{af} .

A aplicação da formulação supracitada foi auxiliada pela rotina em Fortran, disponibilizada pelo autor do modelo. Foram utilizados dados de temperatura e umidade do ar na altitude de referência fornecidos pela estação meteorológica do projeto EIBEX, do dia 13/08/2011, de forma a realizar a devida correspondência com a data de imagem Landsat-5 avaliada, permitindo, assim, a comparação entre os dois métodos de obtenção da TSC.

A espacialização das temperaturas obtidas baseou-se na classificação da imagem Quickbird da região de acordo com os materiais constituintes da paisagem. A proximidade da data de aquisição das imagens Quickbird e Landsat-5 também foi fundamental para a correspondência das variações de temperatura, representativos do uso e ocupação do solo no momento avaliado.

3.3.2 Comparação entre TSC a partir das Propriedades dos Materiais e Dados do Satélite Landsat-5

A superfície obtida a partir da abordagem do comportamento térmico dos materiais constituintes da paisagem associada à espacialização com base na imagem do satélite Quickbird, descrita no item anterior, resulta em uma camada representativa da TSC com resolução espacial de aproximadamente 0,6 m. Já a estimativa da TSC a partir de dados do satélite Landsat-5 apresenta dimensões de píxel de 120 m. A avaliação de informações com escalas espaciais distintas pode apresentar limitações; a fim de contorná-las, foram desenvolvidas duas abordagens para comparação entre os métodos de estimativa da TSC.

Inicialmente, para cada píxel de área 120 m x 120 m correspondente à temperatura obtida por dados do satélite Landsat-5, foi obtida a média das temperaturas estimadas com o modelo baseado nas propriedades dos materiais, cuja resolução espacial é de 0,6 m x 0,6 m, abrangendo uma área com 40.000 píxeis inclusos. A consideração supracitada encontra-se esquematizada na Figura 3.6.

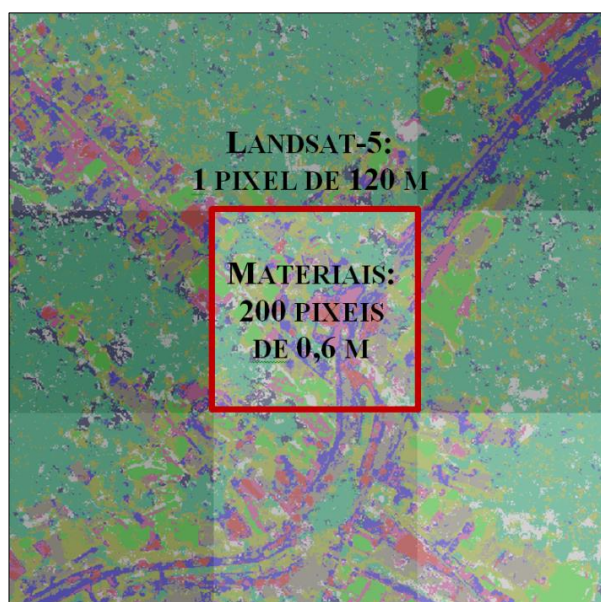


Figura 3.6. Compatibilização de escalas para comparação dos modelos.

Para a segunda abordagem, foi realizada a interpolação de uma superfície espacial de estimativa da TSC baseada nos dados obtidos a partir do satélite Landsat-5. Os dados foram representados espacialmente como observações centralizadas referentes

à área de cada píxel. O interpolador selecionado para o ajuste de uma modelo de previsão para as regiões entre os pontos de dados foi o de krigagem.

No intuito de validar a qualidade da previsão do modelo, foi realizada a validação cruzada, que consiste em remover alguns dos dados da série, e o restante é utilizado para prevê-los. Dessa forma, é gerado um gráfico contendo todos os dados observados no eixo x, e valores previstos pelo modelo no eito y, de forma a possibilitar a visualização da proximidade desses pontos.

3.3.3 Cenário de Projeto para implantação dos Telhados Verdes e Frios

Considerando a importância da compreensão científica e quantificação dos efeitos de intervenções sustentáveis no ambiente urbano, o modelo proposto por Albuquerque (2009) foi utilizado para simular a influência da substituição de alguns materiais na TSC na região da sub-bacia hidrográfica do rio Quitandinha.

Inicialmente, foi simulada a instalação de telhados verdes nas superfícies de concreto planas. O valor do albedo da camada superficial do telhado verde é bem representado pela grama.

Em seguida, foi simulada a inserção de camada de tinta branca nos telhados de fibrocimento, originalmente de cor escura. Devido à especificidade do material analisado, a informação referente ao albedo para os telhados brancos foi obtida experimentalmente, a partir da operação simultânea de dois piranômetros sobre a estrutura de fibrocimento com camada de tinta branca.

O experimento foi realizado em dias de céu claro, com equipamento situado na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro/RJ, nas instalações do IGEO/CCMN. A localização do equipamento para a medição foi tal que se evitou a interferência de vegetação e do sombreamento por prédios.

O equipamento utilizado pode ser observado na Figura 3.7. Trata-se de dois piranômetros do modelo CS300, que medem a radiação solar incidente com um detector de silício fotovoltaico. A resposta do detector é uma corrente, convertida em tensão por um potenciômetro, cuja resistência é ajustada quando o sensor é calibrado de modo a que todos os sensores tenham a mesma sensibilidade de saída.



Figura 3.7. Equipamento para obtenção do albedo para a telha de fibrocimento com camada de tinta branca.

A associação dos dois piranômetros permite determinar o albedo do material, a partir dos dados de radiação incidente sobre a superfície, coletado pelo piranômetro voltado para cima, e a radiação emitida pela superfície, detectada pelo piranômetro voltado para baixo.

É importante destacar a necessidade da aplicação de tintas com tratamentos especiais contra mofo, algas, bactérias e fungos, que podem comprometer a qualidade da cobertura, sob pena de produzir o efeito inverso do pretendido devido ao escurecimento da superfície. Foi utilizada tinta branca de alta reflexividade com tratamento adequado à aplicação.

O cenário projetado consistiu na implantação conjunta da solução relacionada aos telhados verdes e aos telhados brancos.

3.4 Dados Censitários

A avaliação dos dados censitários da sub-bacia do rio Quitandinha foi desenvolvida com base na metodologia proposta por Soares (2004) para a concepção do índice de inclusão econômico sanitário.

Inicialmente, foi necessária a compatibilização entre os setores censitários representativos dos anos de 2000 e 2010. Como seis dos setores do censo de 2000 foram subdivididos em onze setores no censo de 2010, houve necessidade de junção conforme apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Relação entre os setores censitários de 2000 e 2010 que necessitaram de compatibilização.

ID do Setor em 2000	ID do Setor em 2010
330390605000189	330390605000189
	330390605000271
330390605000174	330390605000174
	330390605000253
330390605000185	330390605000254
	330390605000185
	330390605000270
330390605000152	330390605000152
	330390605000268
330390605000103	330390605000103
	330390605000250
330390605000099	330390605000099
	330390605000101

As variáveis selecionadas para obtenção dos indicadores componentes do IIES foram:

- média do rendimento nominal mensal das pessoas responsáveis por domicílios particulares permanentes;
- domicílios particulares permanentes com abastecimento de água da rede geral;
- domicílios particulares permanentes com banheiro ou sanitário e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial;
- domicílios particulares permanentes com lixo coletado.

Os indicadores calculados a partir das variáveis supracitadas encontram-se detalhados na Tabela 3.8. Todas as variáveis utilizadas encontram-se indicadas na coluna de “Descrição”. No campo “Composição”, é apresentada tanto a planilha em que a variável foi extraída em cada um dos censos, quanto a variável conforme exposta nas planilhas disponibilizadas pelo IBGE.

Destaca-se que, para o indicador de Renda, foram considerados os valores de salário mínimo correspondentes às datas dos censos demográficos avaliados. Para o ano de 2000, foi utilizado o salário mínimo no valor de R\$151,00, enquanto, para o ano de 2010, no valor de R\$510,00.

Tabela 3.8. Indicadores de renda e saneamento.

Indicador	Descrição	Composição	
Renda Nominal Normalizada (<i>RendaNomNorm</i>)	Renda familiar por domicílio em salários mínimos vigentes no período do censo, normalizada para valores entre 0 e 1.	2000: <i>Planilha “Básico”</i>	$\frac{Var06}{R\$ 151,00}$
		2010: <i>Planilha “Básico”</i>	$\frac{Var07}{R\$ 510,00}$
Interligação com a Rede de Abastecimento (<i>IntCRede</i>)	Índice de domicílios ligados à rede de abastecimento de água em relação ao número total de domicílios do setor	2000: <i>Planilha “Domicílios”</i>	$\frac{Var0018}{Var003}$
		2010: <i>Planilha “Domicílios01”</i>	$\frac{Var0012}{Var002}$
Interligação com a Rede de Esgoto (<i>RedEsg</i>)	Índice de domicílios ligados à rede de esgoto em relação ao número total de domicílios do setor	2000: <i>Planilha “Domicílios”</i>	$\frac{Var0030}{Var003}$
		2010: <i>Planilha “Domicílios01”</i>	$\frac{Var0017}{Var002}$
Coleta Regular de Lixo (<i>ColRegLix</i>)	Índice de domicílios contemplados por coleta regular de lixo em relação ao número total de domicílios do setor	2000: <i>Planilha “Domicílios”</i>	$\frac{Var0048}{Var003}$
		2010: <i>Planilha “Domicílios01”</i>	$\frac{Var0035}{Var002}$

O IIES foi calculado conforme indicado na Equação 3.49:

$$IIES = \frac{RendaNomNorm + IntCRede + RedEsg + ColRegLix}{4} \quad (3.49)$$

A avaliação do índice de inclusão econômico-sanitária foi realizada com base nas seguintes faixas de classificação propostas por Soares (2004), a seguir detalhadas como

- $0 < IIES < 0,25$: **região excluída**
- $0,26 < IIES < 0,50$: **região semi-excluída**
- $0,51 < IIES < 0,75$: **região semi-incluída**

- $0,76 < IIES < 1$: **região incluída**

Para o cálculo do desenvolvimento local na década de 2000, foi utilizada a Equação 3.50:

$$Desenvolvimento\ Local = \frac{IIES_{2010} - IIES_{2000}}{\max(IIES_{2010}, IIES_{2000})} \quad (3.50)$$

Foram utilizadas as seguintes faixas, também propostas por Soares (2004) como

- **retrocesso** : desenvolvimento local $< -2\%$;
- **estagnação**: $-2\% < \text{desenvolvimento local} < 2\%$;
- **médio desenvolvimento**: $2\% < \text{desenvolvimento local} < 50\%$;
- **desenvolvimento acentuado**: desenvolvimento local $> 50\%$.

Definidos o IIES para os dados dos censos de 2000 e 2011, foi desenvolvida uma avaliação preliminar de sua relação com as características físicas da bacia, relativas ao índice de vegetação e às temperaturas observadas na região.

Foram feitas as seguintes relações, observando a correção entre os seguintes dados:

- IIES de 2000 e média do NDVI dos anos de 1986, 1990, 1994 e 1998;
- IIES de 2010 e média do NDVI dos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011;
- IIES de 2000 e média da TSC dos anos de 1986, 1990, 1994 e 1998;
- IIES de 2010 e média da TSC dos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIABANHA E SUB-BACIA DO RIO QUITANDINHA

O presente trabalho conta com a análise em dois níveis de detalhamento: *a priori*, é avaliada a bacia do rio Piabanha, de forma a desenvolver uma análise da paisagem na região de interesse. Nesse caso, foi considerado o ponto de exutório da bacia na foz do rio Piabanha, no rio Paraíba do Sul.

Em um segundo momento, onde a avaliação de cada píxel é desenvolvida a partir dos materiais urbanos que compõem a paisagem, avaliou-se a sub-bacia do rio Quitandinha, em função da imagem em resolução adequada disponível.

4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha

O rio Piabanha, com extensão de cerca de 80 km, encontra-se totalmente inserido no estado do Rio de Janeiro. O rio representa um dos principais afluentes do rio Paraíba do Sul, desaguando em seu curso médio.

Sua nascente situa-se no município de Petrópolis, onde recebe contribuições dos rios Quitandinha, Itamarati, Poço do Ferreira, das Araras, Santo Antônio, ribeirão Retiro das Pedras e córrego da Jacobá. Em continuidade, a jusante, o rio atravessa o município de Areal, onde estão localizados os seguintes afluentes: córrego do Cedro e rios Preto e Fagundes. No município de Três Rios, o rio Piabanha apresenta, como contribuintes, os córregos Cascatinha e Mundo Novo, desaguando no rio Paraíba do Sul.

A hidrografia da bacia é apresentada na Figura 4.1

Com área de aproximadamente 2050 km², a bacia do rio Piabanha abrange os municípios do estado do Rio de Janeiro, a saber: Areal, Paraíba do Sul, Paty dos Alferes, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Teresópolis e Três Rios. A Figura 4.2 ilustra a localização da bacia.

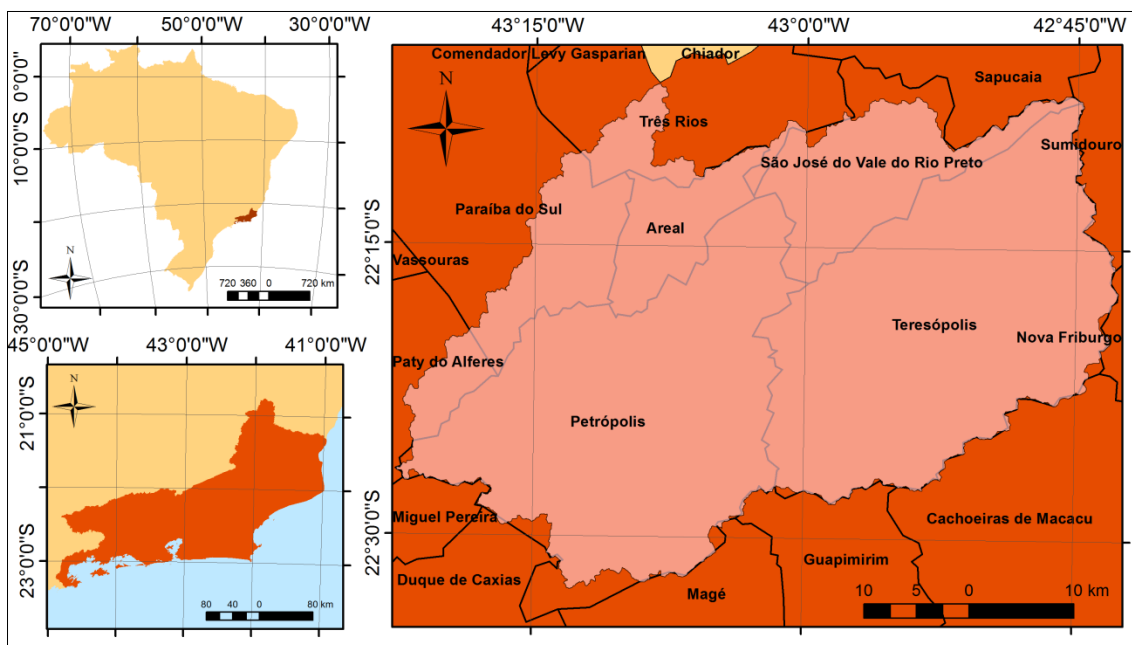


Figura 4.2. Localização da bacia do rio Paibanha.

Na Tabela 4.1, encontra-se detalhada a área de cada município inserida na bacia, bem como a porcentagem em relação a sua área total.

Tabela 4.1. Composição da área da bacia do Rio Piabanha por município.

Município	Área inserida na Bacia do rio Piabanha	
	(km ²)	(% da área total do município)
Areal	111,80	100%
Paraíba do Sul	140,23	24,17%
Paty dos Alferes	43,63	13,65%
Petrópolis	729,11	94,29%
São José do Vale do Rio Preto	203,45	84,73%
Teresópolis	764,57	100%
Tres Rios	57,69	17,80%
Área Total da Bacia (km²)	2050,48	

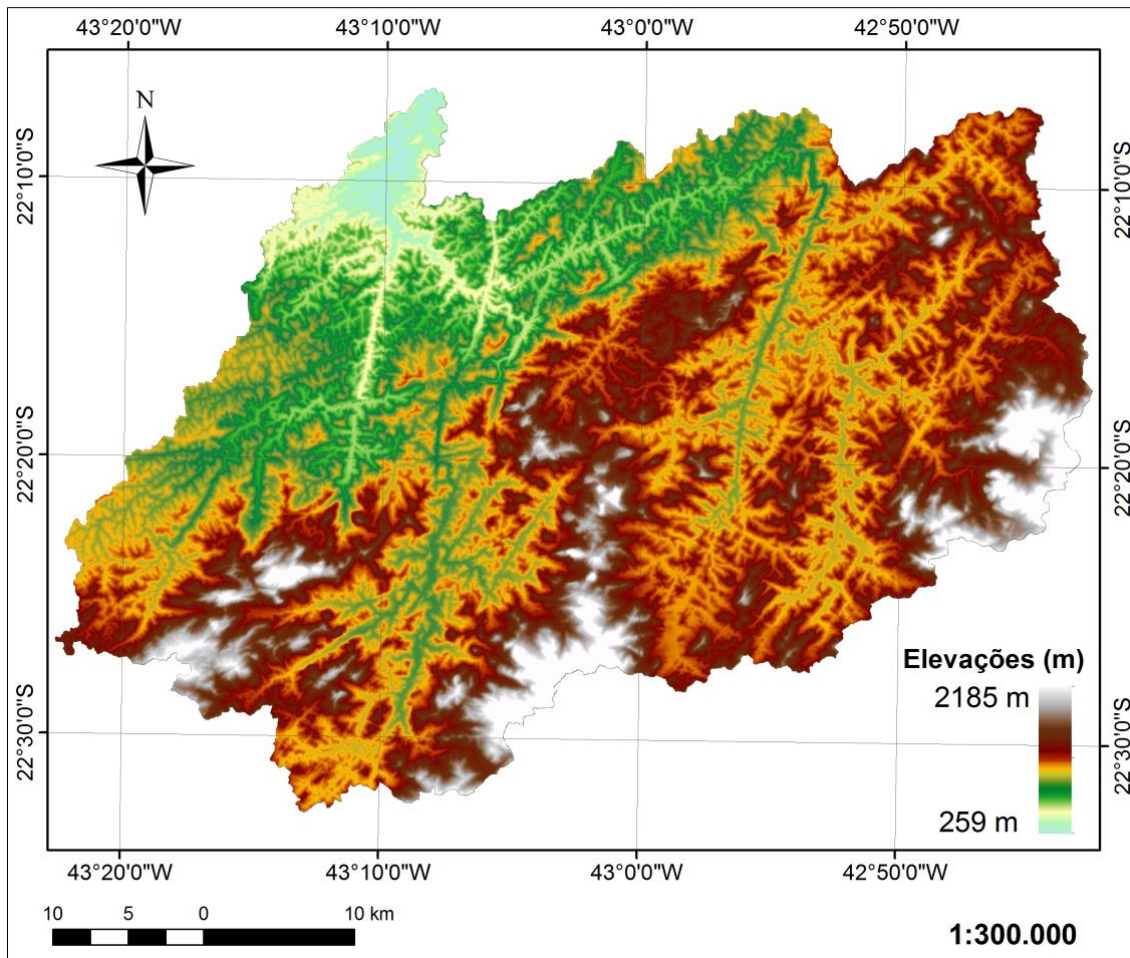


Figura 4.4. Relevo na bacia do rio Piabanha/RJ.

Conforme exposto por Lou (2010), as fortes restrições à ocupação dadas pelo relevo são a principal razão do nível relativamente alto de cobertura florestal natural da bacia. Apesar da expressiva cobertura florestal, as condições de relevo e solos e a elevada pluviosidade resultam em alta vulnerabilidade à erosão.

As condições ambientais dessa região não são indicadas para a agricultura, tendo em vista, principalmente, o relevo montanhoso, com afloramentos de rocha e solos de alta erodibilidade, que, associados à elevada pluviosidade anual, com fortes chuvas, tornam essa região extremamente suscetível à erosão, lixiviação de nutrientes do solo e comprometimentos à qualidade das águas por assoreamento e poluição química e orgânica (CEIVAP, 2002).

Apesar das restrições inerentes ao relevo, o uso agrícola ainda pode ser observado, que, juntamente com o uso urbano e industrial, apresenta-se corresponsável pela erosão dos solos e degradação das águas na bacia.

Predominam as culturas de ciclo curto, como verduras e legumes, e não se verifica o uso de técnicas de conservação de solo, como terraceamento e plantio em curva de nível, apesar das fortes declividades e do potencial de erosão hídrica da região. Em geral, as áreas cultivadas localizam-se nas margens dos rios e córregos, ocupando áreas de preservação permanente (APPs). Uso abusivo de agrotóxicos, lançamento de esgotos de origem doméstica e animal (currais e pocilgas) e erosão das margens são problemas comuns aos cursos de água nessas áreas, comprometendo a qualidade das águas utilizadas para a irrigação das culturas e abastecimento doméstico (Gonçalves, 2008).

O nível de ocupação e a intensidade de uso das terras e das águas da bacia do rio Piabanha situam-na entre as sub-bacias do Paraíba do Sul de alta prioridade para a realização de ações de proteção e recuperação de florestas, solos e águas, sendo recomendadas medidas rigorosas de restrição de uso, especialmente no curso superior do rio Piabanha.

Em relação à região urbana, a bacia apresenta situações críticas de erosão, com destaque aos municípios de Petrópolis e Teresópolis, associadas à ocupação inadequada das íngremes encostas.

De acordo com Kling (2005), o principal impacto produzido nesta bacia é a rápida taxa de urbanização, com consequências substanciais na drenagem das águas pluviais, nas enchentes, nos deslizamentos e nos desastres provocados pelo desequilíbrio no escoamento das águas, nas contaminações no corpo hídrico, no acentuado desmatamento e no acúmulo de lixo. Nesse sentido, o estudo das mudanças na cobertura do solo da região e no seu índice de vegetação representa um diagnóstico fundamental.

A Figura 4.5 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo na bacia, desenvolvido por Rosário (2013).

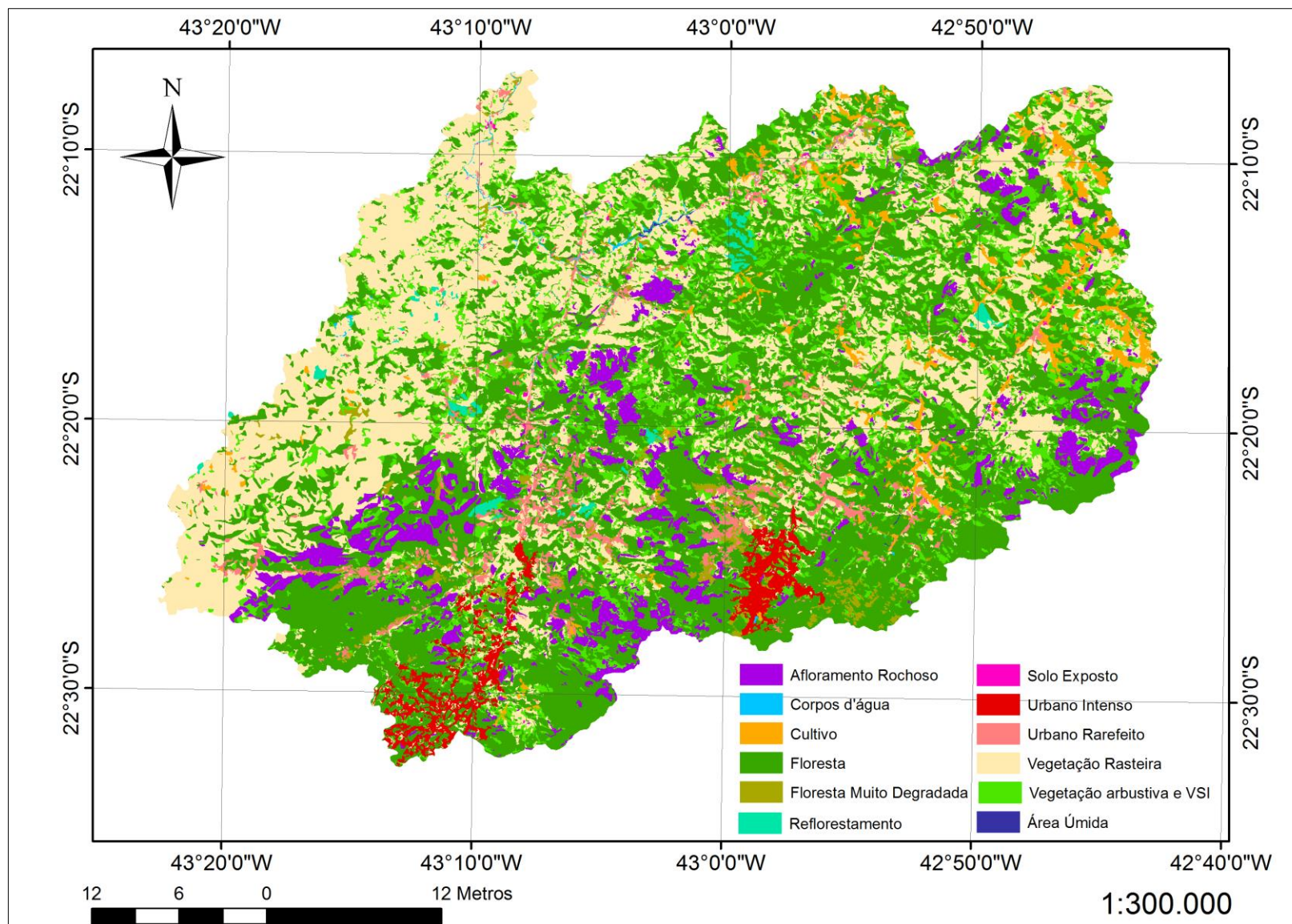


Figura 4.5. Uso e ocupação do solo na bacia do rio Piabanha/RJ. FONTE: adaptado de Rosário (2013)

Os problemas ambientais existentes na bacia são diversos, tendo em vista as formas inadequadas de ocupação e uso do solo e a falta de infraestrutura básica, principalmente em saneamento. Mesmo nas áreas rurais, a maioria das residências não tem sistema de tratamento (fossa/filtro/sumidouro), o que agrava a situação de deterioração dos cursos de água, já comprometidos com fertilizantes e agrotóxicos.

4.2 Sub-bacia Hidrográfica do Rio Quitandinha

A bacia do rio Quitandinha, afluente do alto rio Piabanha, encontra-se totalmente inserida no município de Petrópolis. A região avaliada nesta dissertação compreende a área de contribuição da bacia inserida na imagem do sensor QuickBird disponível. Para a delimitação da área de estudo, o exutório considerado situa-se às coordenadas $43^{\circ}11'29''\text{W}$ e $22^{\circ}31'25,3''\text{S}$, cuja localização pode ser observada na Figura 4.6:

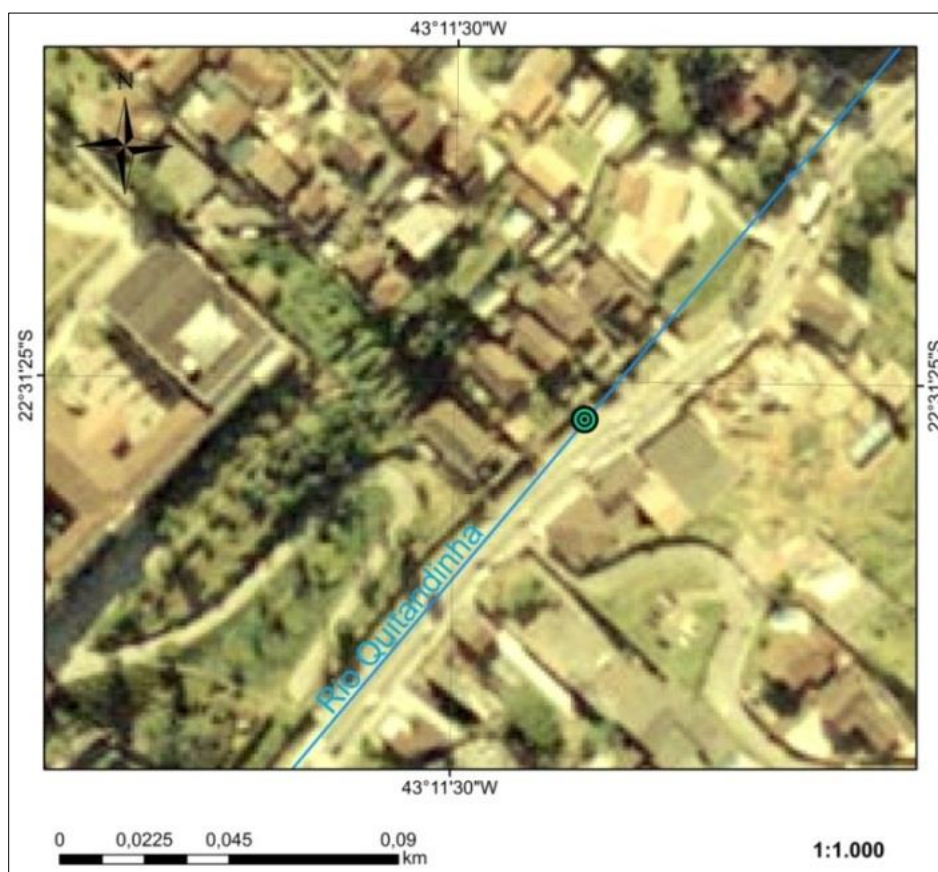


Figura 4.6. Exutório da sub-bacia do rio Quitandinha.

A delimitação da bacia do rio Quitandinha e da sub-bacia avaliada no presente trabalho encontram-se expostas na Figura 4.8.

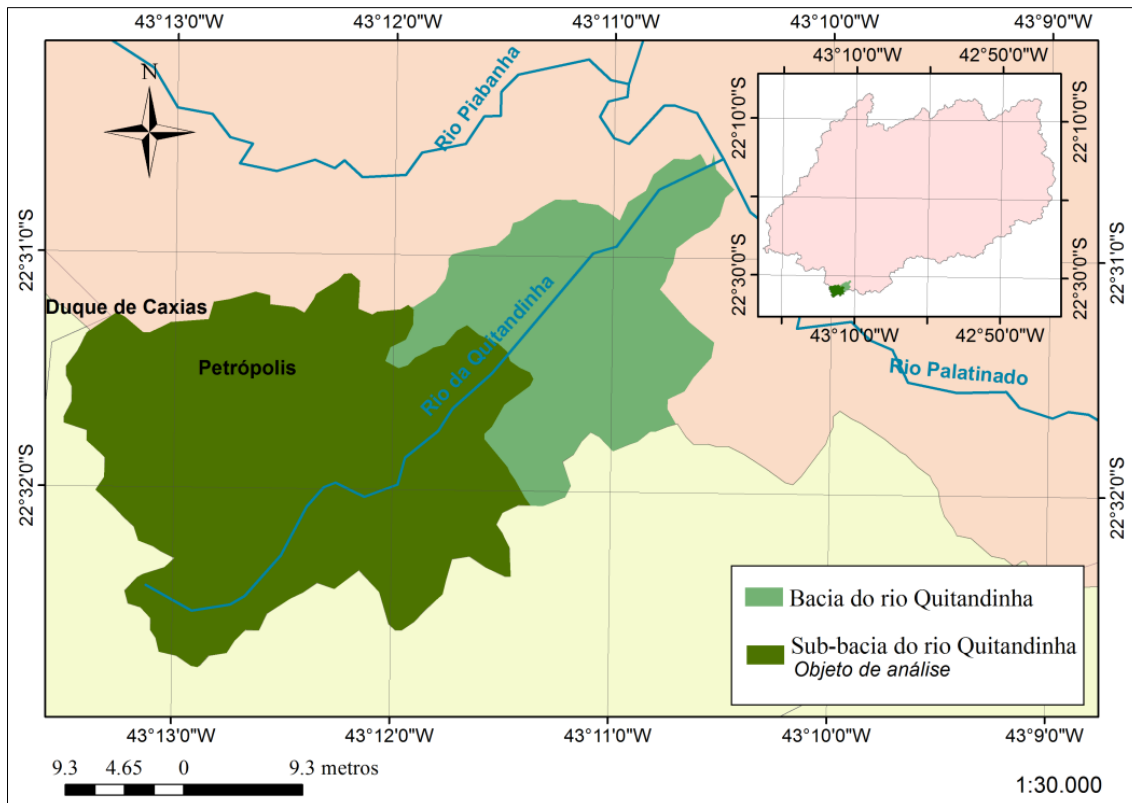


Figura 4.7. Delimitação da sub-bacia do rio Quitandinha.

O rio Quitandinha apresenta-se canalizado em toda sua extensão. Devido à urbanização já consolidada às margens, a região é frequentemente atingida pelo efeito das cheias que causam transbordamento da calha do rio. A vulnerabilidade da região é acentuada por sua condição de relevo acidentado, com a presença de solos rasos, o que induz à produção de sedimentos.

O uso residencial predomina na bacia do rio Quitandinha, havendo destaque à presença de um sítio comercial. A vegetação encontrada apresenta-se em estágios diferentes, podendo ser distinguida pela imagem de satélite e em campo. Vias sem pavimentação, com solo exposto ao intemperismo, também podem ser identificadas, assim como áreas em solo exposto e sem aparente movimentação de massa. (Carvalho, 2011).

O recorte da imagem aérea da região pode ser observado na Figura 4.8.

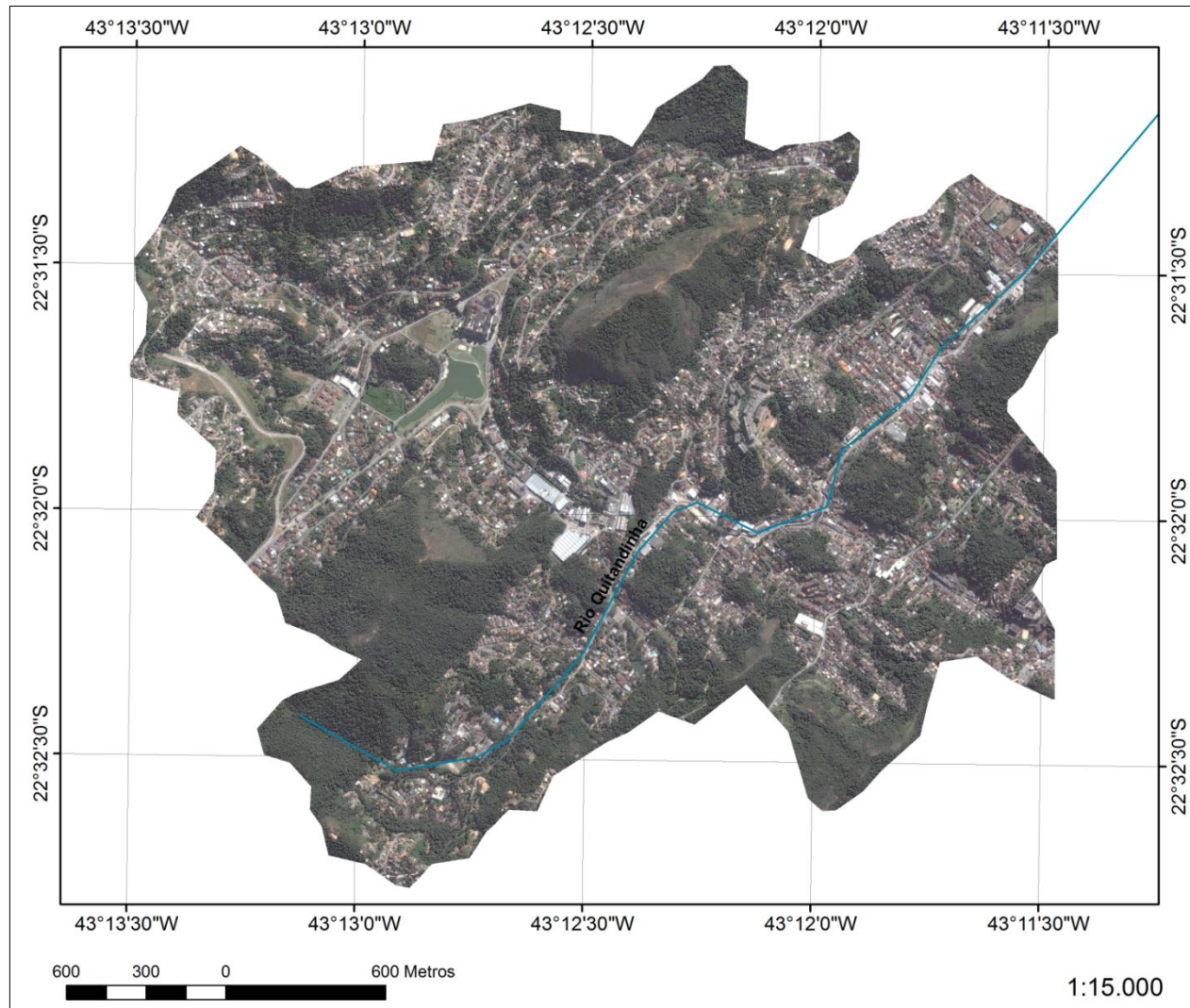


Figura 4.8. Recorte da imagem aérea da sub-bacia do rio Quitandinha.

CAPÍTULO 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos da aplicação da metodologia descrita à bacia de estudo. Inicialmente, expõem-se os erros relativos à correção geométrica de cada uma das imagens do satélite Landsat-5, informação base para os cálculos realizados.

Em seguida, são mostrados e discutidos os mapeamentos dos índices de vegetação, temperatura e umidade, a partir dos quais se sugere a detecção de mudanças a bacia. É apresentado, também, o resultado da simulação do cenário de projeto para implantação dos telhados verdes e frios. Por fim, são apresentados e avaliados os resultados referentes à espacialização dos índices socioeconômicos e obtenção do índice de inclusão econômico-sanitário.

5.1 Pré-processamento

Para cada imagem do satélite Landsat-5, foram inseridos 25 pontos de controle e com distribuição espacial representativa da região, permitindo exclusão dos 10 pontos com maiores erros residuais, que representam a diferença entre onde o ponto terminou posicionado e a localização real que foi especificado. Esses pontos e o erro associado a eles encontram-se exposto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Erro RMS total referente ao georreferenciamento das imagens.

ANO	Erro RMS Total Inicial (m)	Erro RMS Total Final (m)
2011	27,8067	11,5065
2008	20,2754	13,7637
2005	28,3492	10,5395
2001	27,3308	13,3889
1998	23,4191	12,7708
1994	18,5305	9,83466
1990	14,7099	11,9775
1986	18,8343	12,4291

Considerando que as bandas com melhor resolução obtidas pelo sensor TM apresentam píxel de 30 metros, é possível afirmar que os erros obtidos estão dentro dos padrões de aceitabilidade esperados, ou seja, são inferiores às dimensões relativas a um píxel.

5.2 Caracterização da Bacia do Rio Piabanha a partir do Satélite Landsat-5

A bacia do rio Piabanha teve suas características relativas à vegetação (NDVI, SAVI e LAI), temperatura (TSC) e índice de umidade (IUS) estimadas a partir de dados do satélite Landsat-5, com seleção de uma imagem para cada um dos anos de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

Em seguida, a partir dessas informações, foi possível estabelecer a detecção de mudança na bacia em termos do vigor vegetativo e das condições de estresse hídrico.

Os resultados obtidos podem ser observados a seguir.

5.2.1 Índices de Vegetação

A cobertura vegetal da bacia do rio Piabanha foi estimada, conforme descrito, a partir dos índices de vegetação NDVI e SAVI e do parâmetro biofísico LAI.

5.2.1.1 Índices de Vegetação por Diferença Normalizada

O mapeamento do NDVI pode ser observado da Figura 5.1 à Figura 5.8.

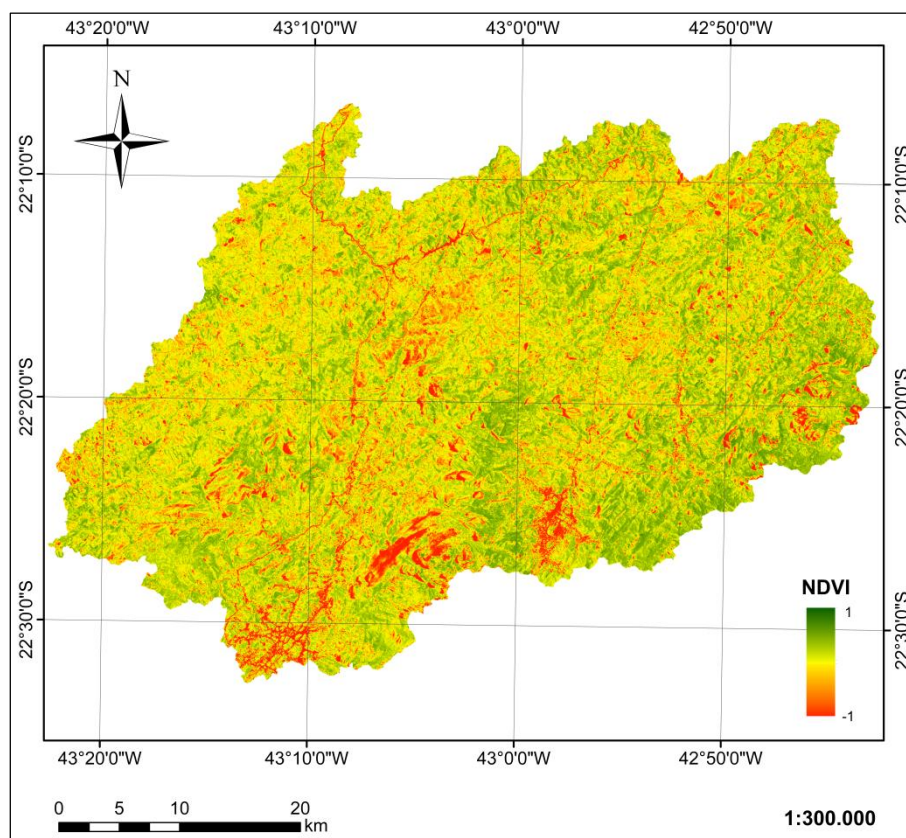


Figura 5.1. Mapa do NDVI para 19/03/1986.

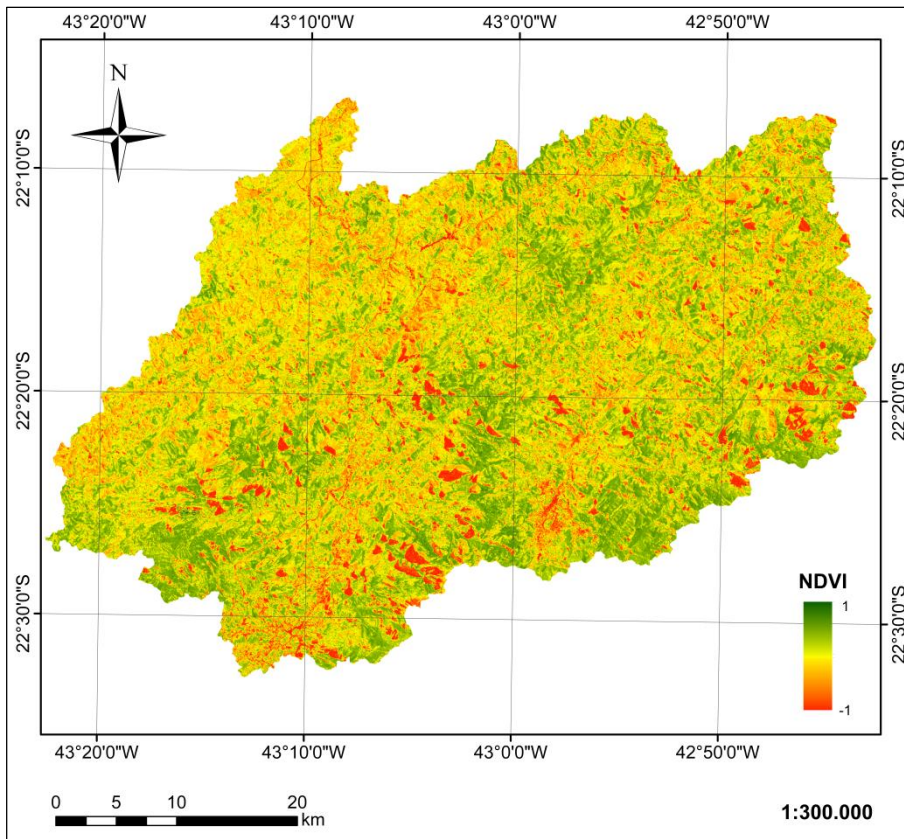


Figura 5.2. Mapa do NDVI para 28/03/1990.

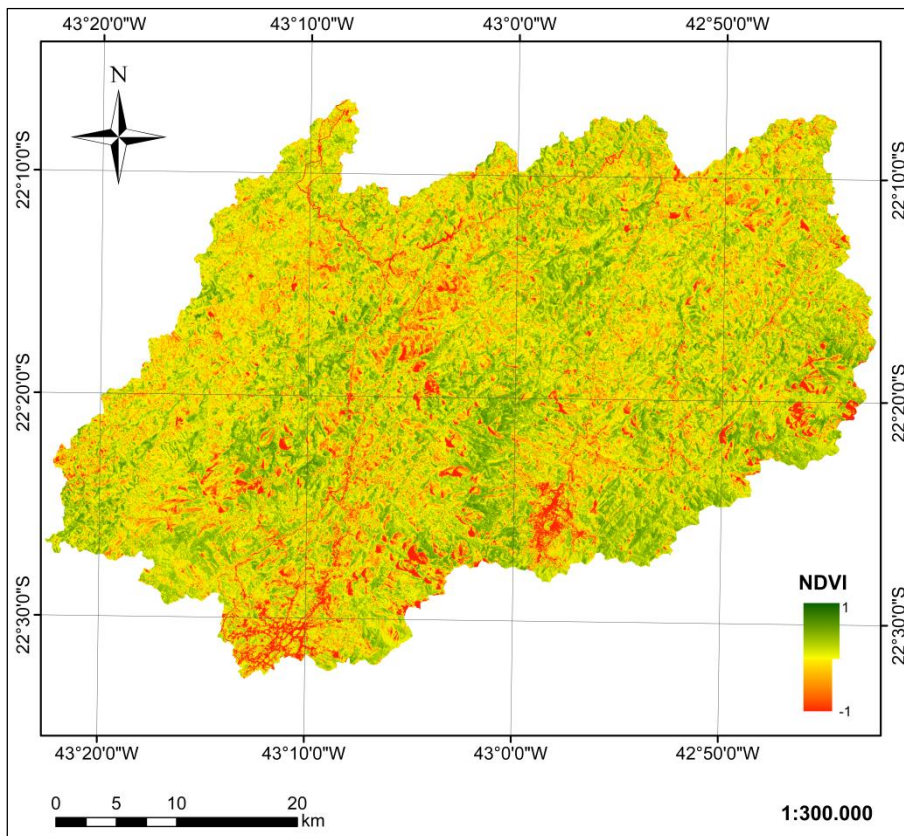


Figura 5.3. Mapa do NDVI para 29/07/1994.

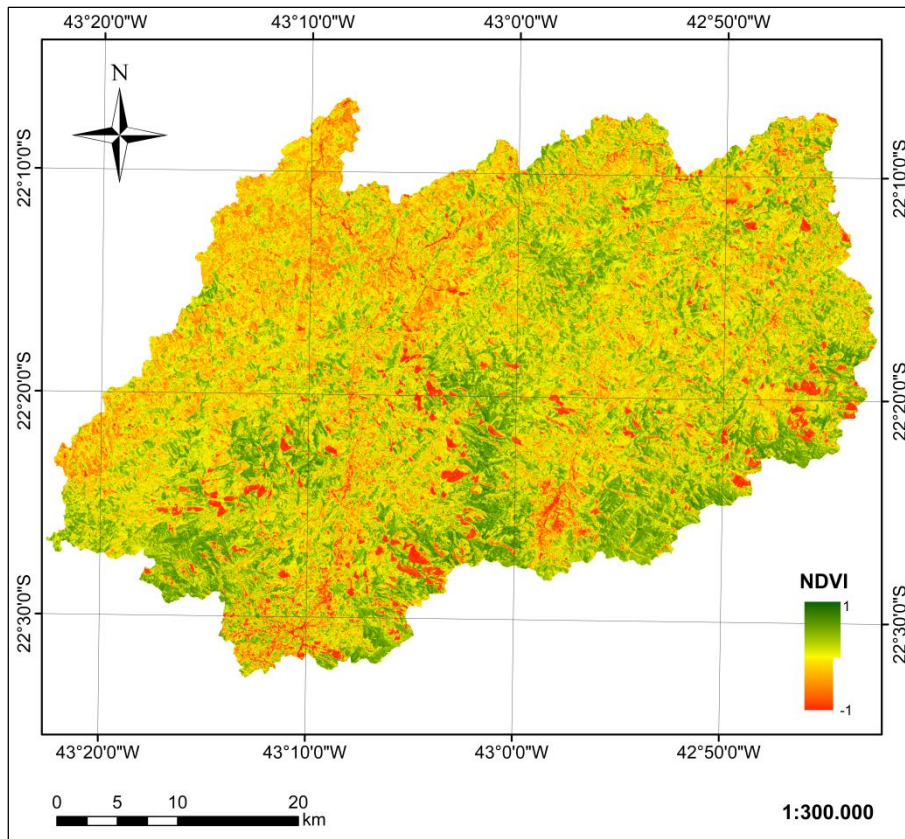


Figura 5.4. Mapa do NDVI para 08/07/1998.

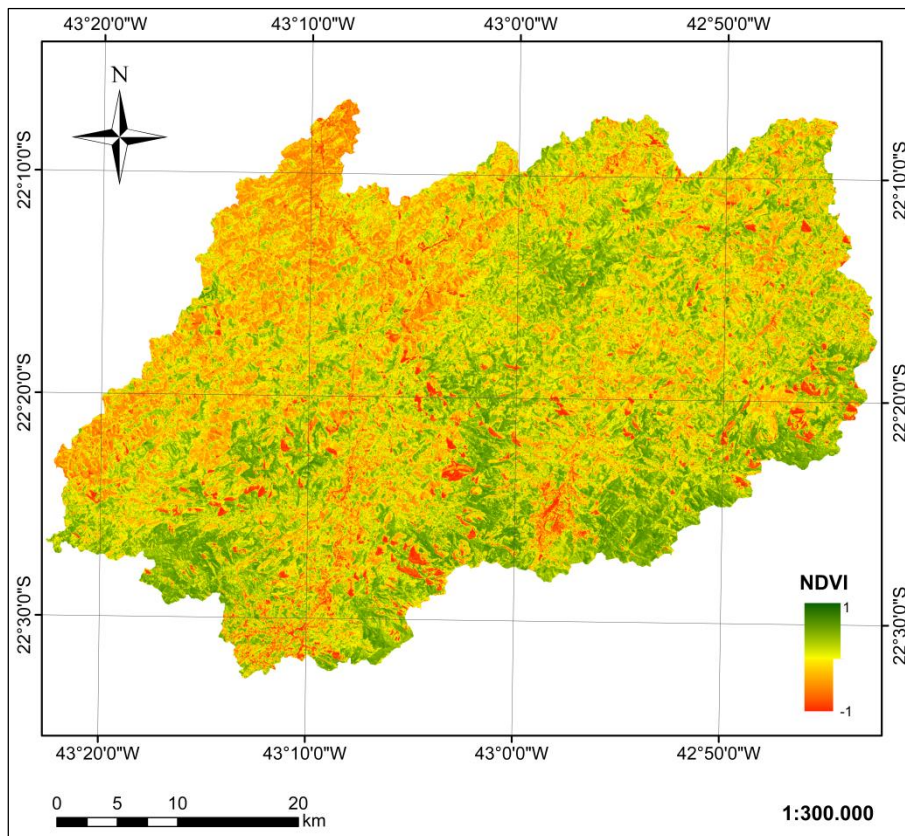


Figura 5.5. Mapa do NDVI para 01/08/2001.

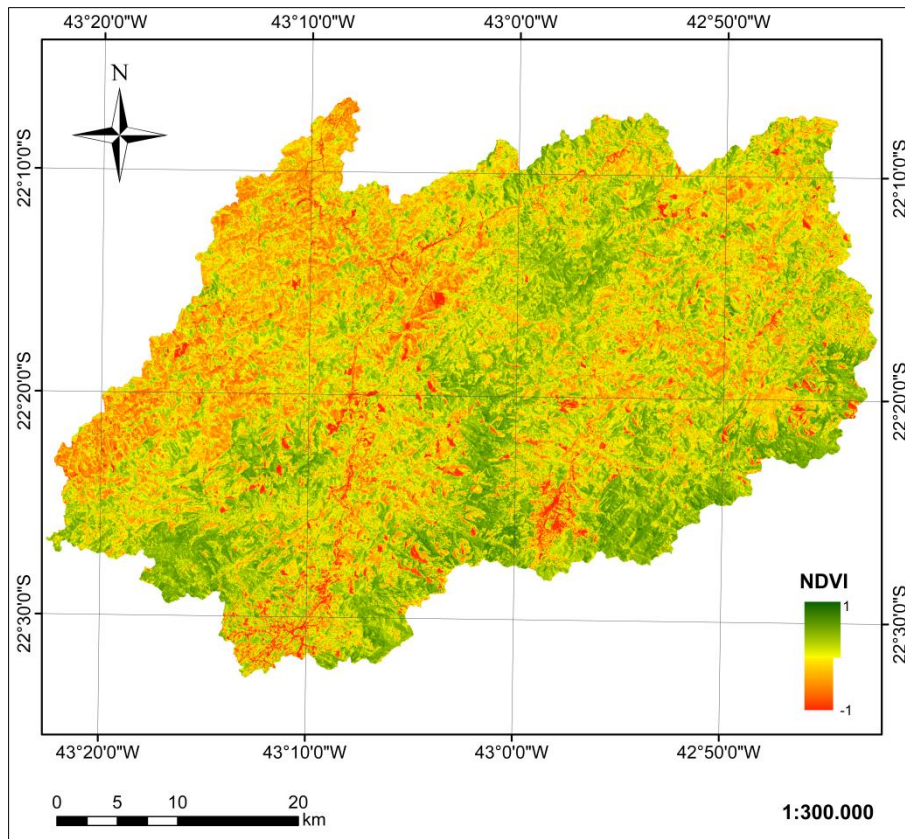


Figura 5.6. Mapa do NDVI para 28/08/2005.

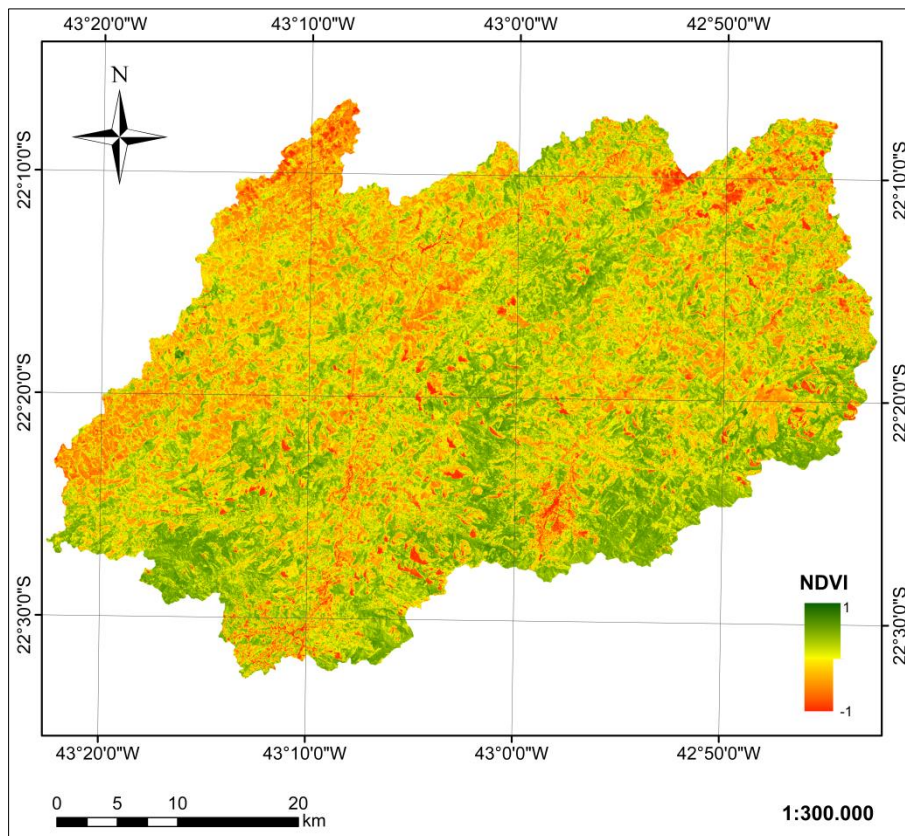


Figura 5.7. Mapa do NDVI para 20/08/2008.

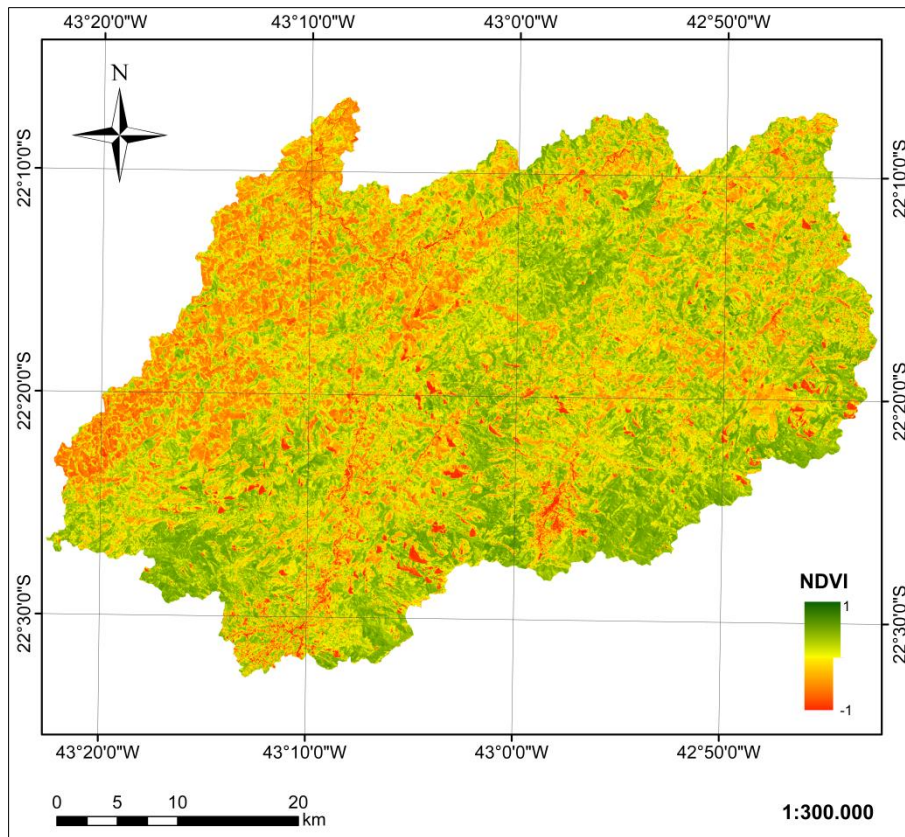


Figura 5.8. Mapa do NDVI para 13/08/2011.

Nos mapas anteriormente apresentados, é possível, através da inspeção visual, a avaliação espacial da variação do NDVI, sendo possível identificar, numa análise pontual dos oito momentos selecionados, uma tendência geral de redução. A fim de avaliar a distribuição dos valores de NDVI de forma quantitativa, é apresentada, na Figura 5.9, sua distribuição de frequência acumulada para cada imagem analisada.

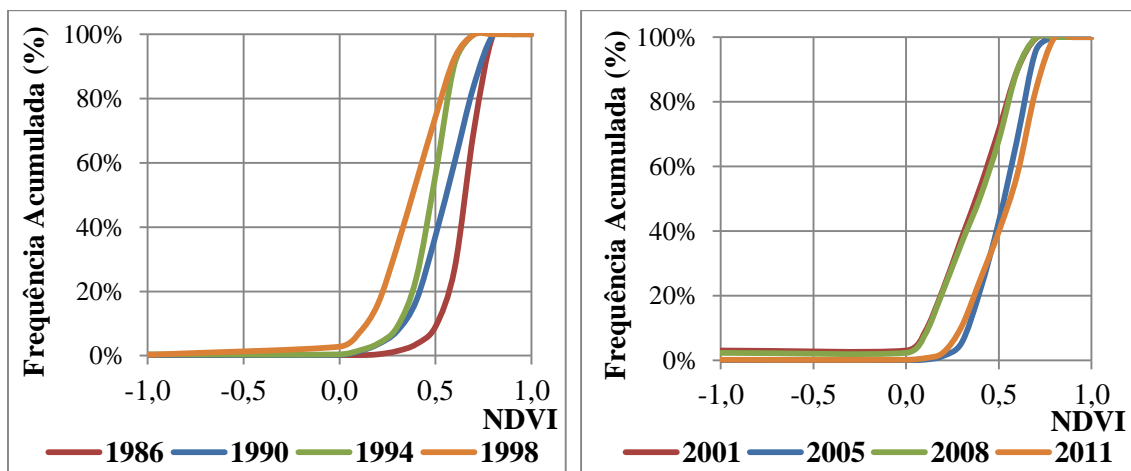


Figura 5.9. Distribuição de frequência dos valores NDVI para 1986, 1990, 1994 e 1998 à esquerda e, para 2001, 2005, 2008 e 2011, à direita.

Na Figura 5.9, à esquerda, é possível observar as distribuições para os momentos selecionados nos anos de 1986, 1990, 1994 e 1998. Para esse período, destaca-se a redução gradativa dos valores de NDVI, indicando a possibilidade de perda do vigor vegetativo entre os instantes avaliados.

Nas imagens dos anos de 1990 e 1998, representadas no gráfico à esquerda, respectivamente pelas linhas azul e laranja, é possível observar um maior espalhamento da curva de distribuição de frequência dos valores de NDVI.

Para os instantes avaliados nos anos de 2000, 2005, 2008 e 2011, observam-se as distribuições contidas à direita na Figura 5.9. Os instantes dos anos de 2005 e 2011 apresentam maior frequência de valores maiores do NDVI quando comparados aos anos de 2001 e 2008.

Apesar do cuidado em buscar imagens do satélite Landsat-5 dentro do mesmo período sazonal, a influência de condições climáticas atípicas nesses dois anos pode ser significativa na distribuição dos valores de NDVI da área de estudo, considerando a distância espacial entre os momentos avaliados e a degradação do sensor com o tempo.

Para detalhar a questão da variação do NDVI, foi obtida a média e variância dos oito momentos avaliados, conforme é apresentado respectivamente na Figura 5.10 e na Figura 5.11.

Observa-se que os valores médios de NDVI variam entre -0,49 e 0,76. A variância entre as estimativas nos instantes analisados vai de $3,6 \times 10^{-4}$ a 0,5. Foi quantificado que, em 75% dos píxeis, a variância calculada foi inferior a 0,025. A dispersão dos dados de cada píxel é, dessa forma, baixa em relação ao valor médio.

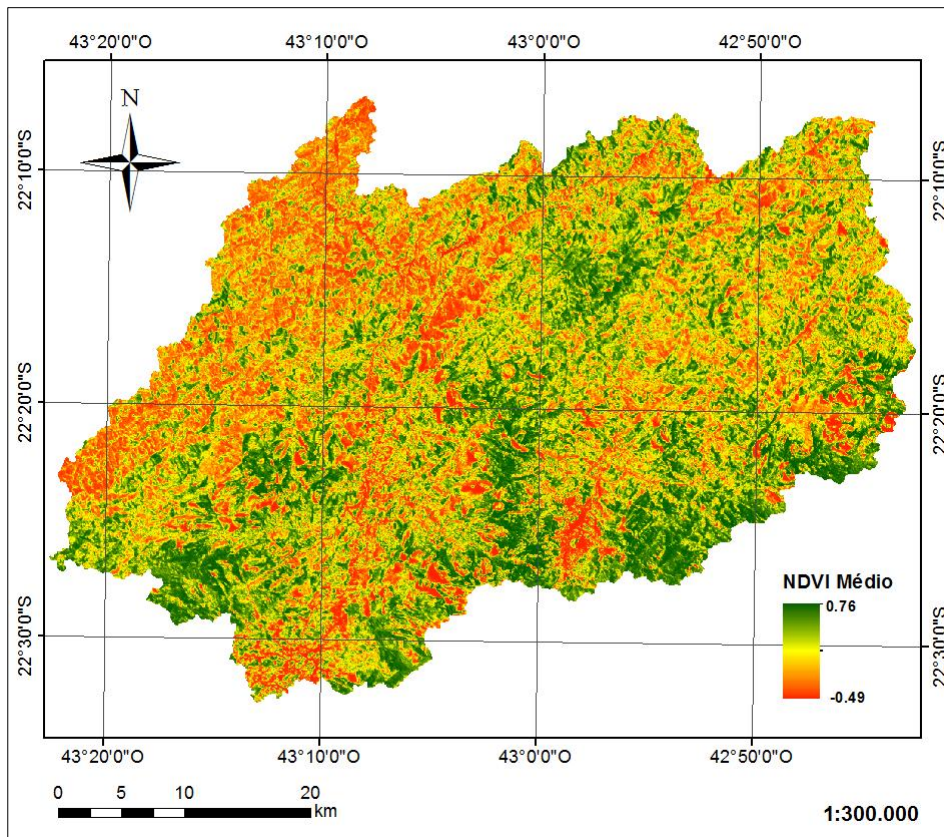


Figura 5.10. Média do NDVI das imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

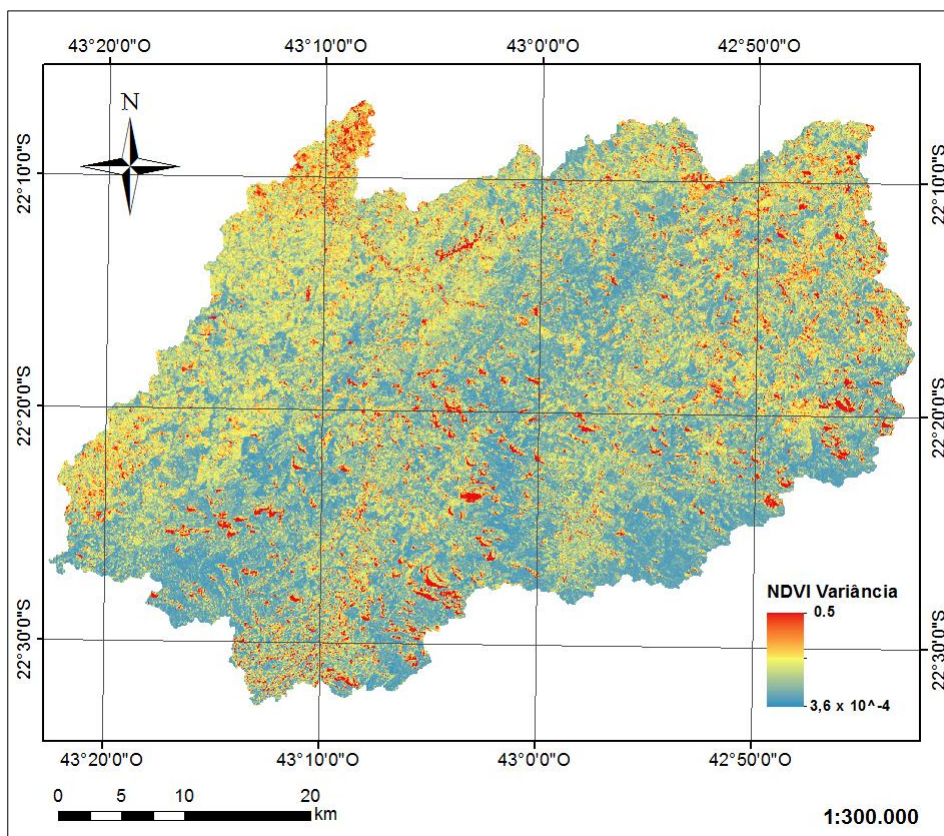


Figura 5.11. Variância entre as estimativas de NDVI nas imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

Adicionalmente, o período de análise foi dividido em dois blocos: as imagens referentes aos anos de 1986, 1990, 1994 e 1999 representam as, aqui denominadas, condições iniciais da bacia; e as dos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011, que ilustram as condições da bacia em sua condição final no período avaliado.

Foram gerados mapas médios das condições iniciais e condições finais, expostos na Figura 5.12 e na Figura 5.13.

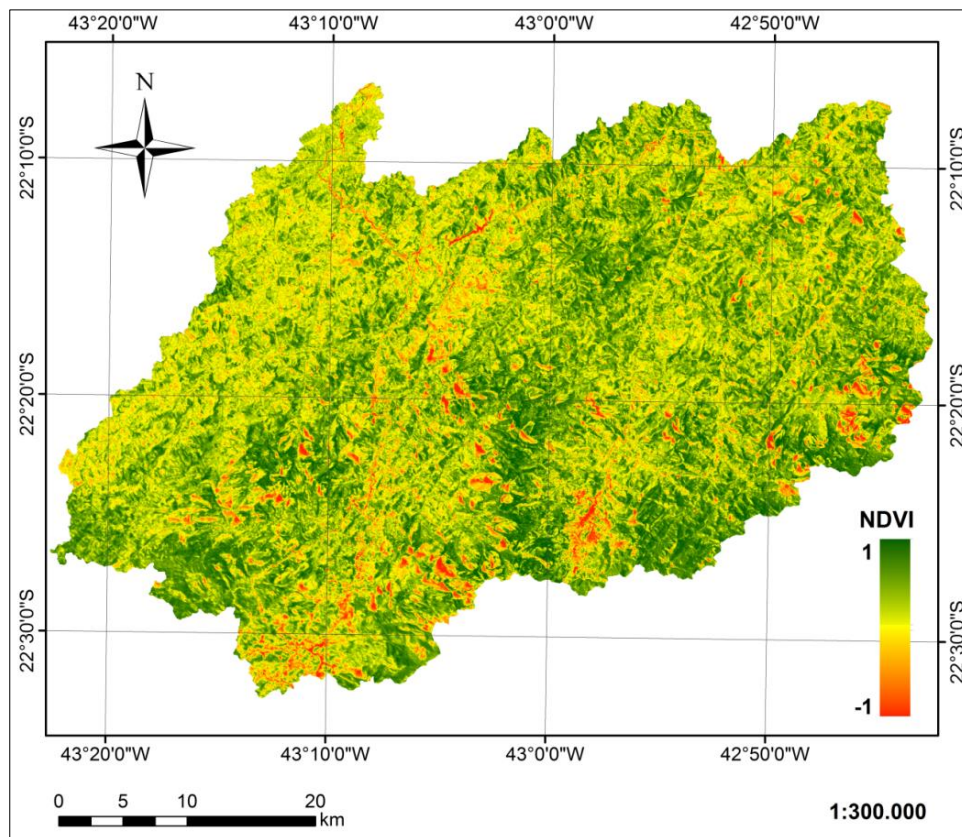


Figura 5.12. Mapa da média do NDVI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.

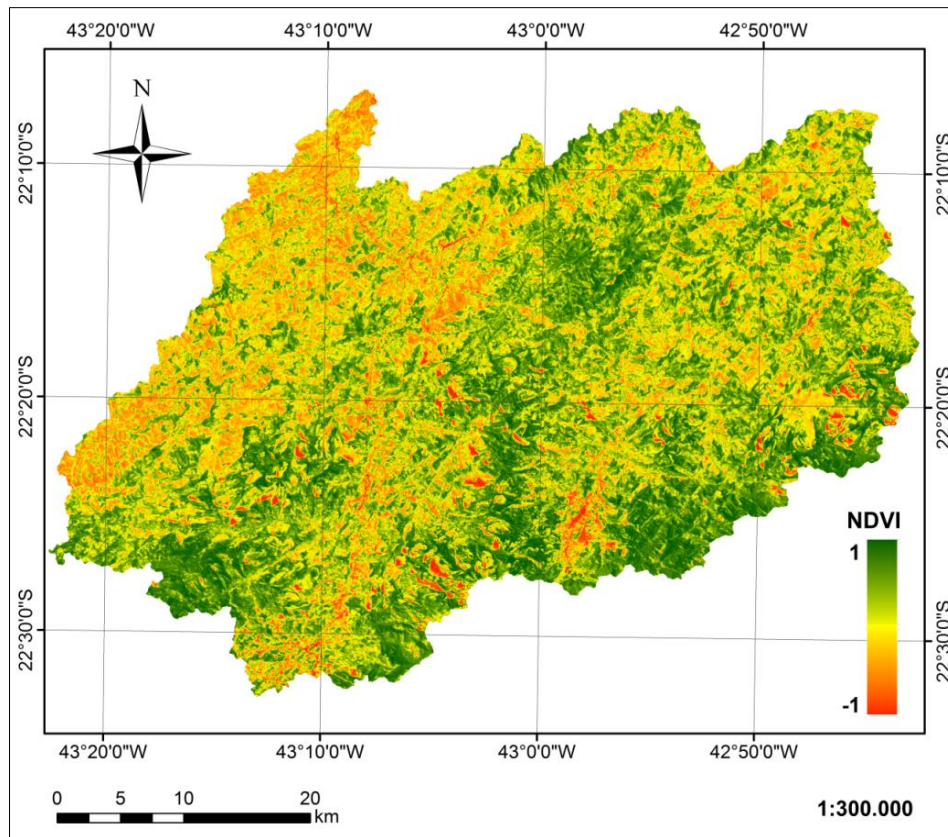


Figura 5.13. Mapa da média do NDVI para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.

Como é possível observar na Figura 5.14, houve uma redução nos valores de NDVI entre o cenário médio dos primeiros e dos últimos instantes avaliados, expresso pelo deslocamento da curva de distribuição acumulada representativa das condições finais da bacia (linha verde) para a esquerda.

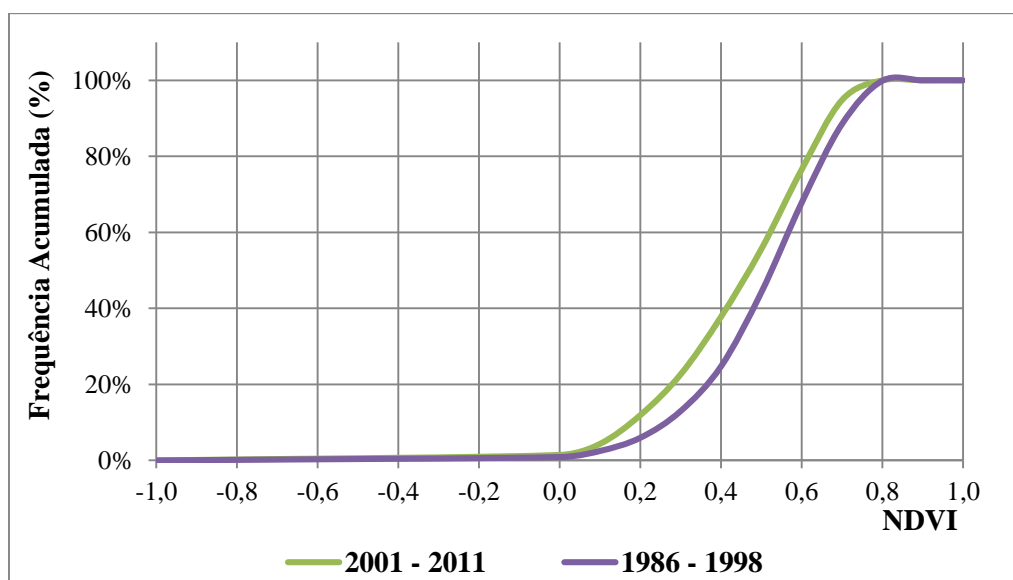


Figura 5.14. Distribuição de frequência acumulada das médias dos valores do NDVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Conforme inferido anteriormente e exposto na Tabela 5.2, os valores mínimo, máximo e a média da série de dados de NDVI para o período final são inferiores aos da série de dados do período inicial. O desvio padrão indica uma menor variabilidade da série final e conseqüentemente uma maior proximidade dos valores em torno da média (0,45).

Tabela 5.2. Estatísticas dos dados referentes às médias de NDVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Período	Estatística			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1986 - 1998	-0,55	0,81	0,50	0,17
2001-2011	-0,58	0,77	0,45	0,15

5.2.1.2 Índices de Vegetação Ajustada ao Solo

Uma avaliação análoga foi desenvolvida para o SAVI, cujos mapas de distribuição espacial encontram-se expostos da Figura 5.15 à Figura 5.22.

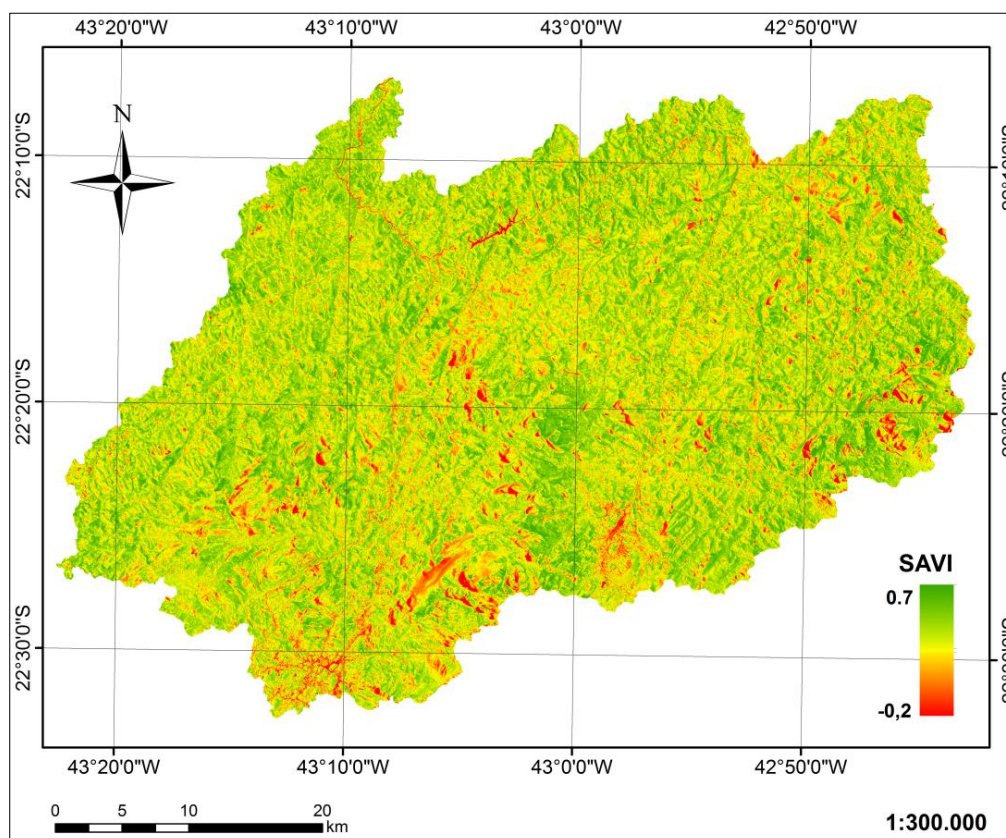


Figura 5.15. Mapa do SAVI para 19/03/1986.

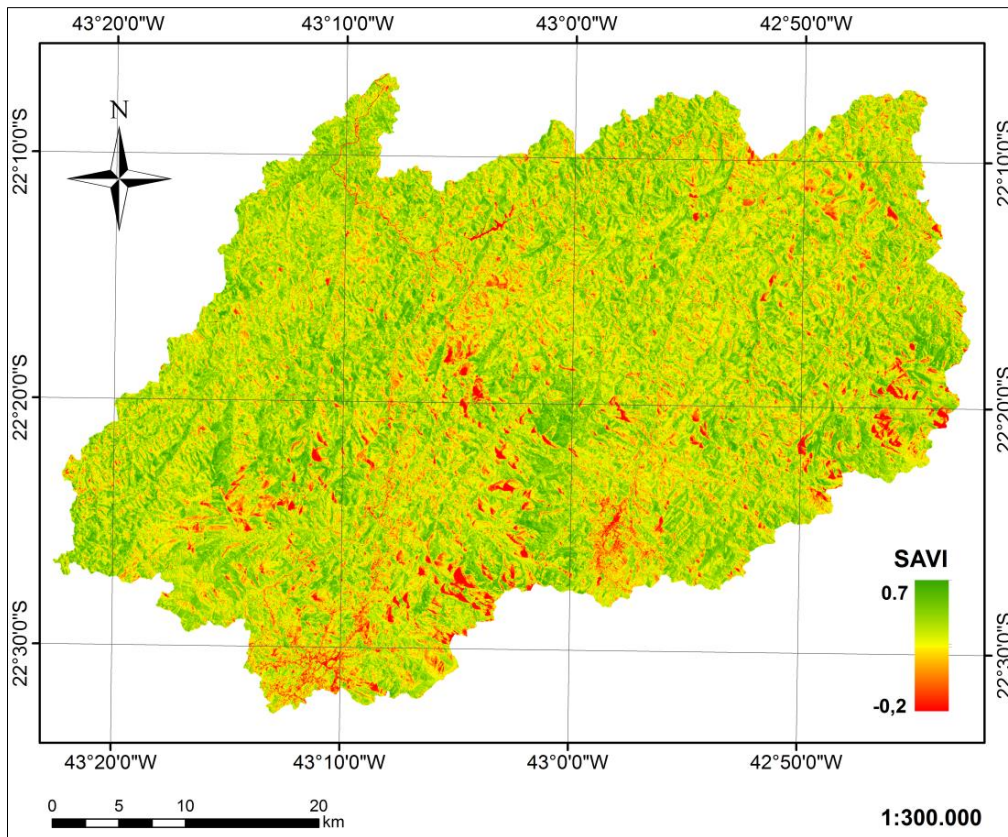


Figura 5.16. Mapa do SAVI para 28/03/1990.

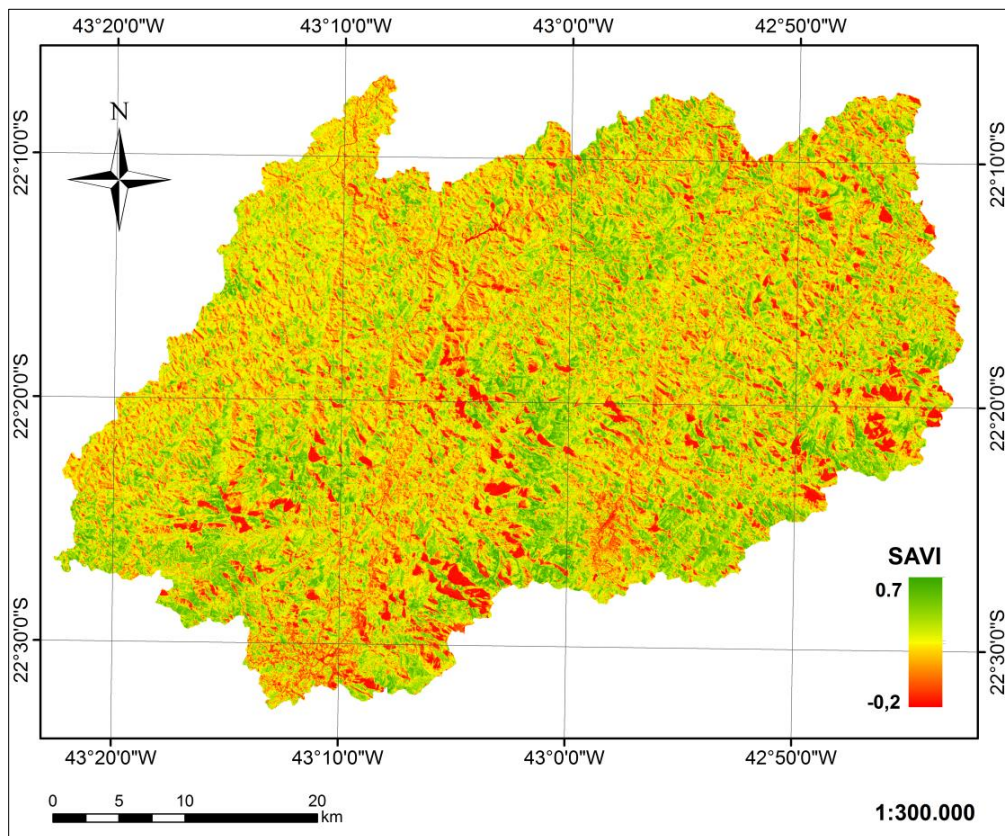


Figura 5.17. Mapa do SAVI para 29/07/1994.

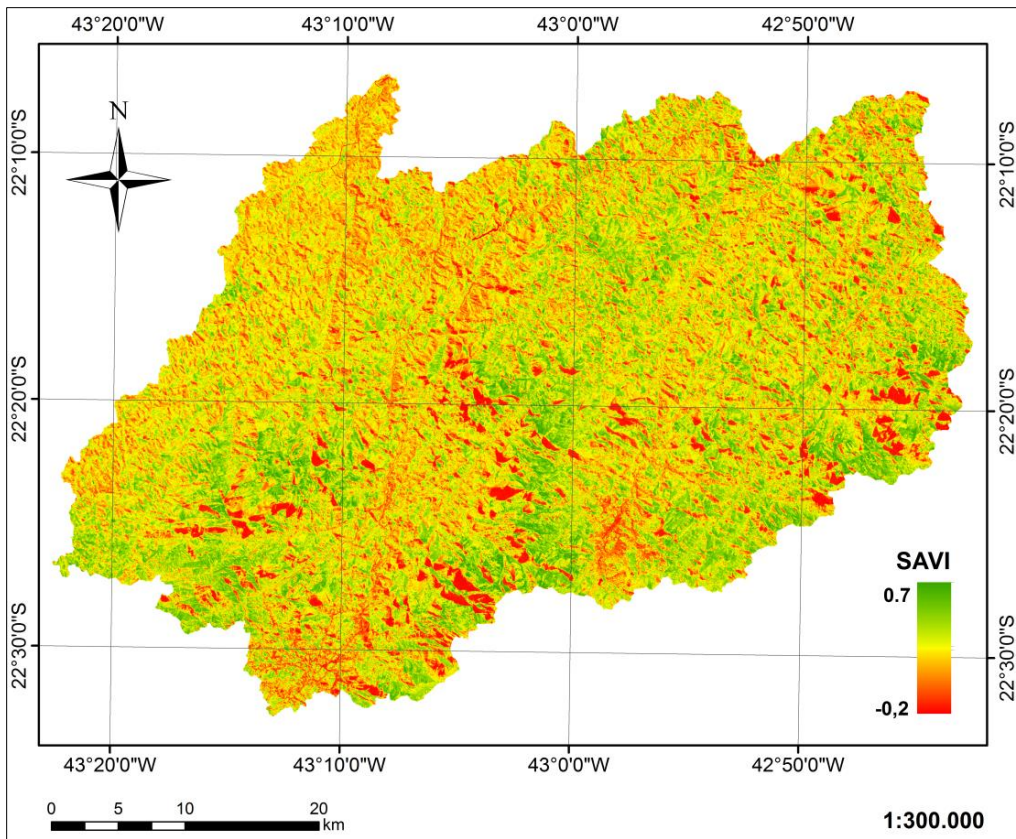


Figura 5.18. Mapa do SAVI para 08/07/1998.

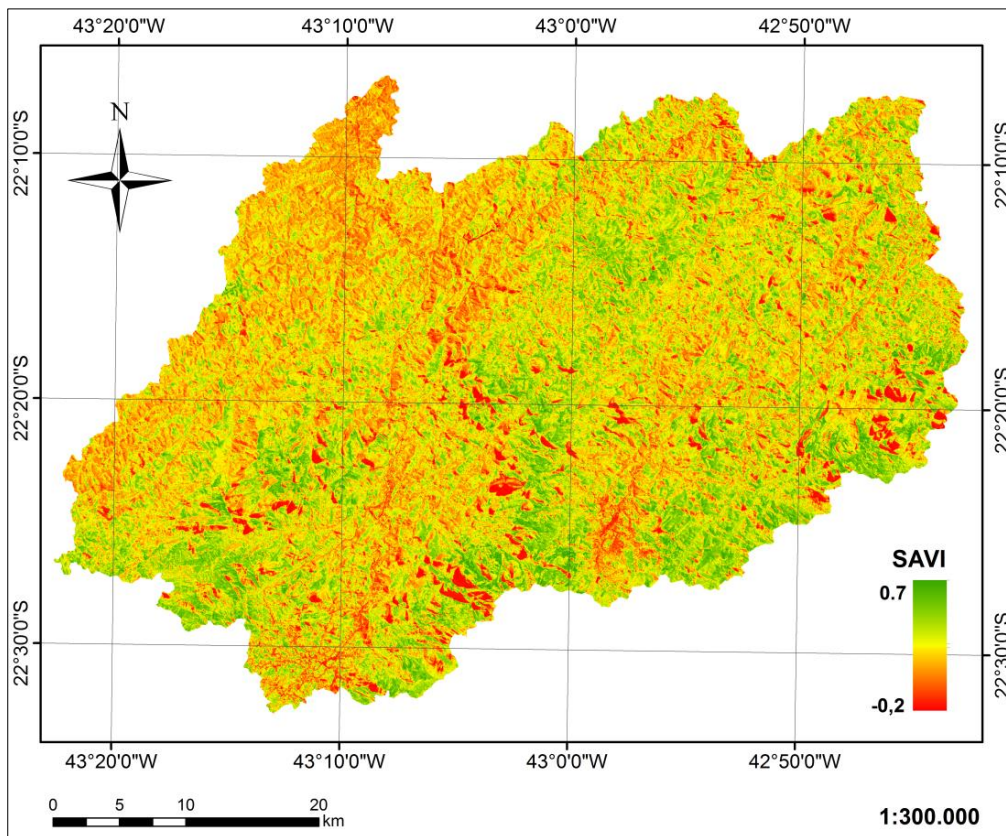


Figura 5.19. Mapa do SAVI para 01/08/2001.

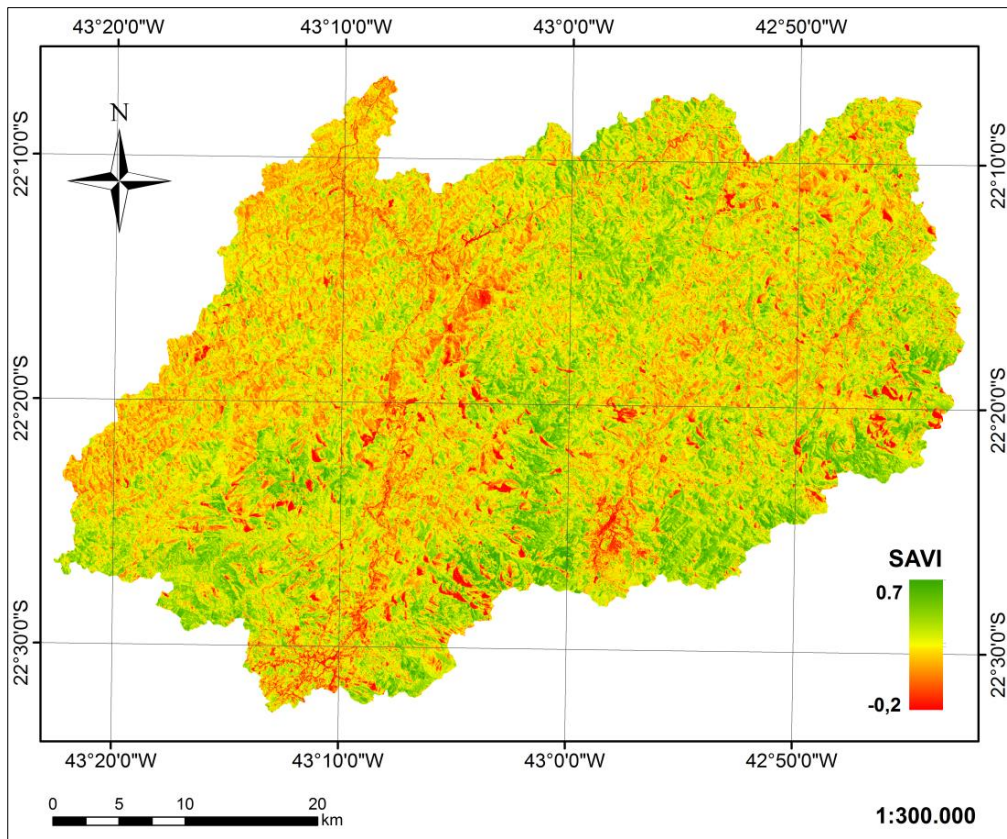


Figura 5.20. Mapa do SAVI para 28/08/2005.

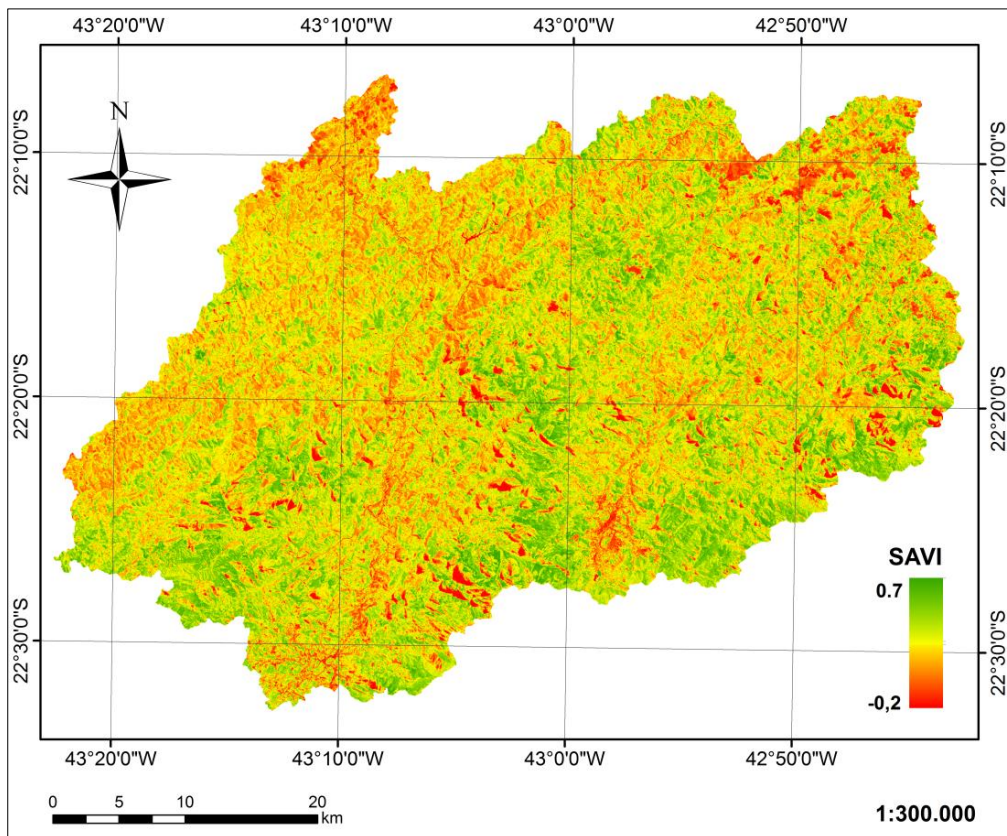


Figura 5.21. Mapa do SAVI para 20/08/2008.

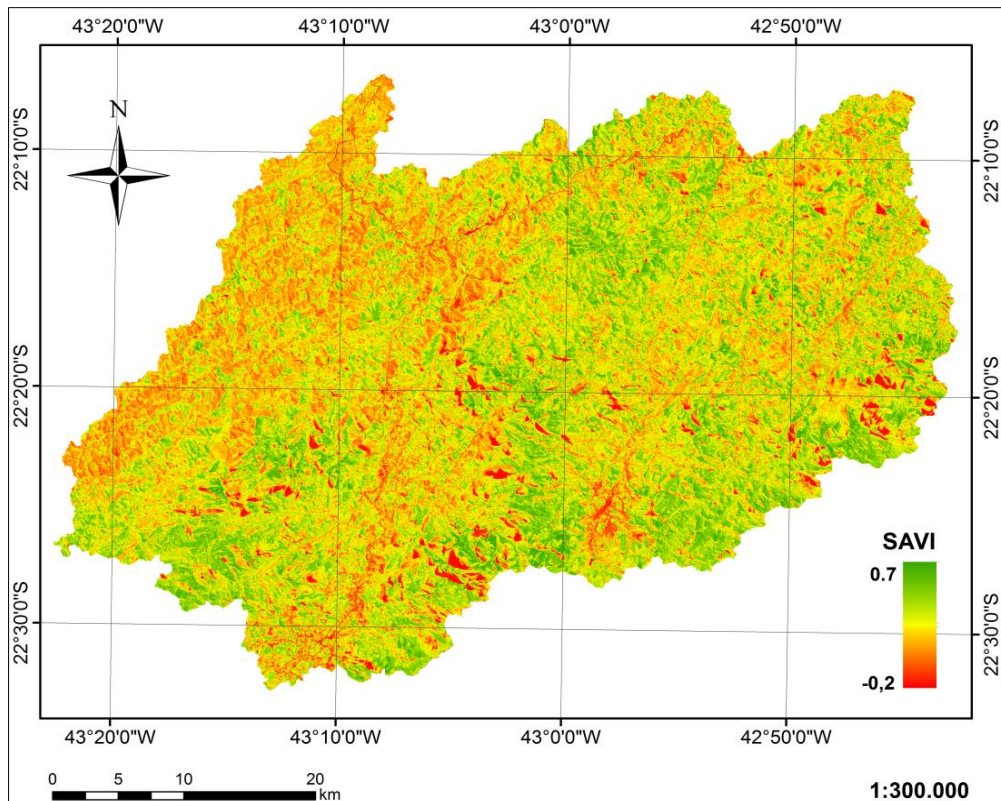


Figura 5.22. Mapa do SAVI para 13/08/2011.

A análise visual permite inferir uma redução nos valores de SAVI de maneira geral nos instantes avaliados, mais marcante entre os momentos dos anos de 1986 e 1990 e os demais. Para os instantes dos anos de 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011, não é possível a detecção de alterações significativas apenas pela simples observação dos mapas. A fim de confirmar essa inferência, foram gerados os gráficos expostos na Figura 5.23, que mostram a distribuição de frequências acumuladas nos quatro primeiros instantes, à esquerda, e nos quatro últimos, à direita.

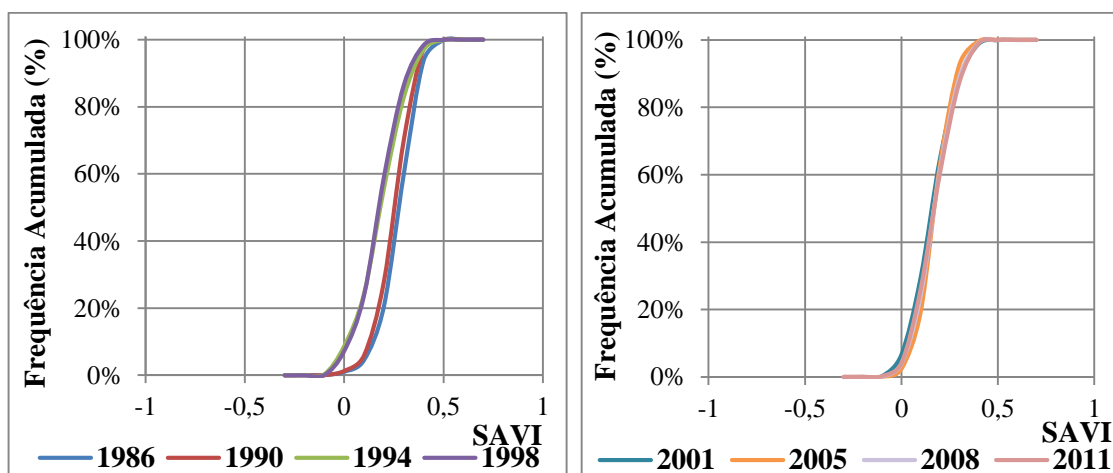


Figura 5.23. Distribuição de frequência dos valores do SAVI para 1986, 1990, 1994 e 1998 à esquerda e, para 2001, 2005, 2008 e 2011, à direita.

Existe uma semelhança entre a distribuição dos valores de SAVI nos instantes analisados, com destaque para o ano de 2005, no qual se observa uma maior concentração de valores em torno da mediana, expresso pela maior verticalidade da curva. Em termos práticos, todavia, não existem mudanças expressivas entre as distribuições observadas.

A média de todos os momentos analisados, bem como a variância entre as medidas podem ser observadas, respectivamente, na Figura 5.24 e na Figura 5.25.

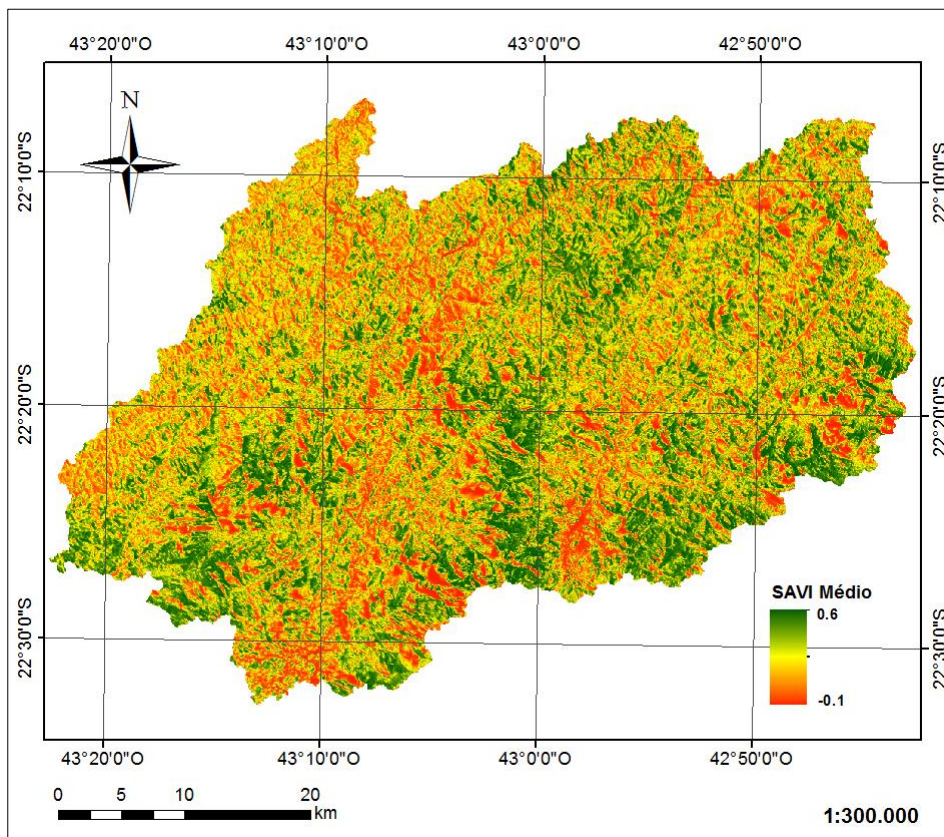


Figura 5.24. Média do SAVI das imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

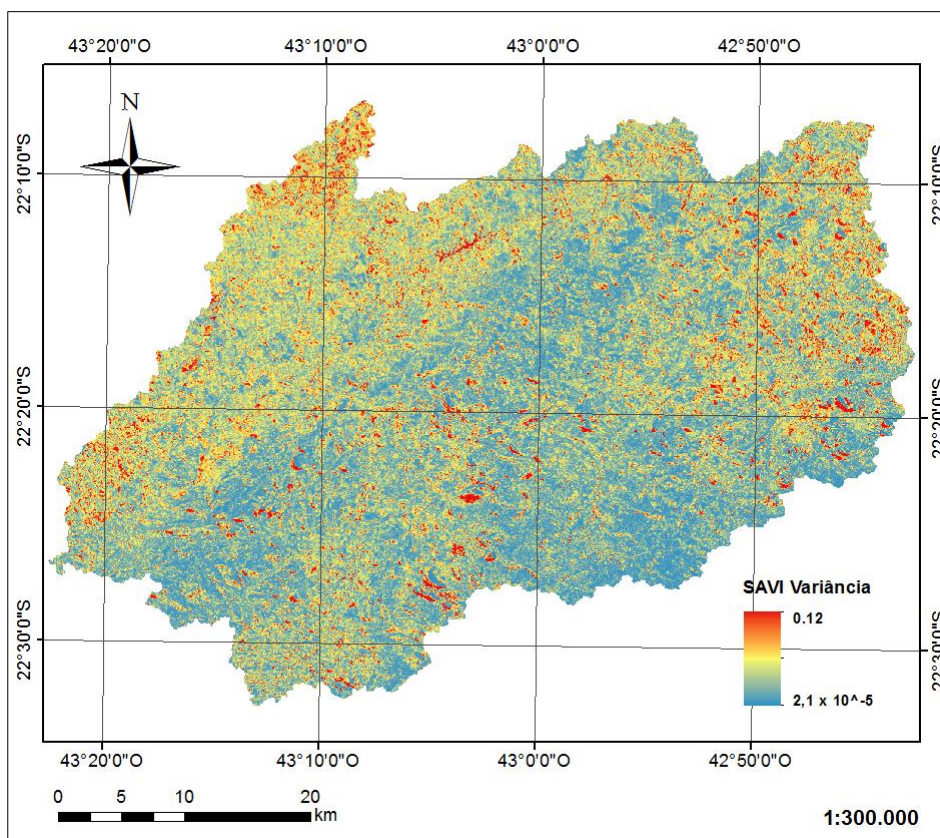


Figura 5.25. Variância entre as estimativas de NDVI nas imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

Observa-se que os valores médios do SAVI variam entre -1 e 0,6. A variância entre as estimativas nos instantes analisados vai de $2,1 \times 10^{-5}$ a 0,12. Foi quantificado que, em 75% dos píxeis, a variância calculada é inferior a 0,006, com menor magnitude em relação ao NDVI.

Essa observação complementa o que foi inferido a partir do gráfico contido na Figura 5.23, inserindo na análise, informação espacializada da dispersão dos valores estimados para cada píxel nos oito momentos analisados em relação ao valor médio do SAVI.

Agrupando as imagens avaliadas em dois blocos temporais, observa-se o SAVI médio nos instantes inicial e final na Figura 5.26 e na Figura 5.27, respectivamente.

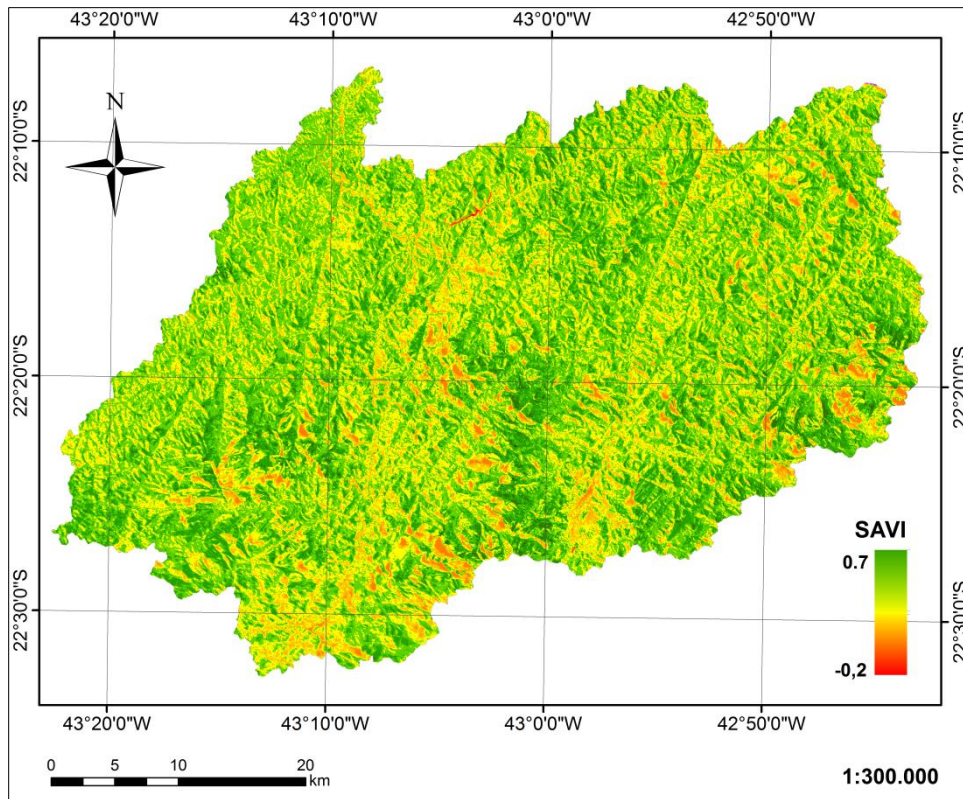


Figura 5.26. Mapa da média do SAVI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.

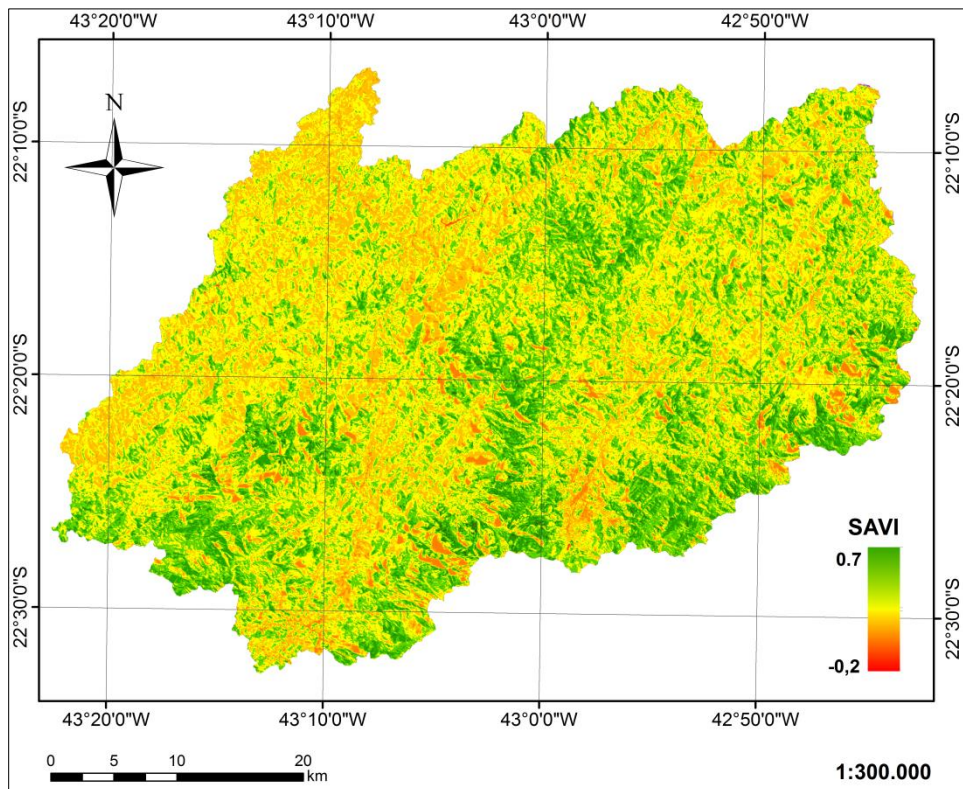


Figura 5.27. Mapa da média do SAVI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.

Nos mapas, fica destacada a redução dos valores de SAVI. Com esse indicador, é possível representar a cobertura vegetal em regiões com vegetação esparsa, ao passo

que introduz um fator de ajuste do solo. No gráfico da Figura 5.28, há um deslocamento da curva representativa dos instantes finais para a esquerda, indicando a ocorrência de valores de SAVI inferiores aos dos instantes iniciais.

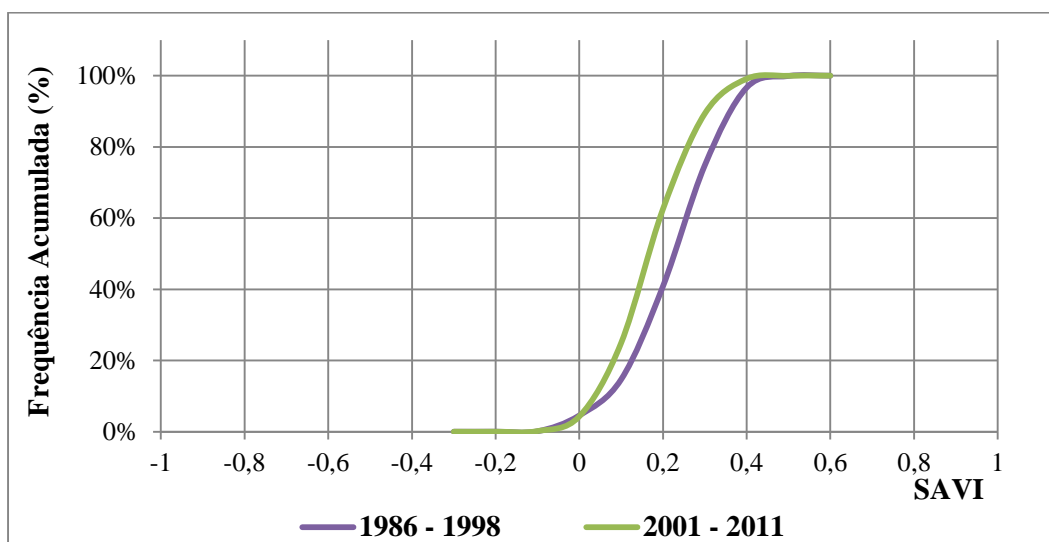


Figura 5.28. Distribuição de frequência acumuladas médias dos valores do SAVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Na Tabela 5.3, encontram-se os valores mínimo, máximo e a média da série de dados de SAVI para os períodos de 1986-1998 e 2001-2011. Observa-se que, apesar de no período inicial o valor mínimo de SAVI ser inferior, no segundo momento, a média do índice de vegetação da bacia apresenta-se menor, indicando redução geral do índice na bacia. A variabilidade em torno da média é igual em ambos os períodos.

Tabela 5.3. Estatísticas dos dados referentes às médias de SAVI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Período	Estatística			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1986 - 1998	-0,13	0,64	0,32	0,09
2001-2011	-0,11	0,64	0,26	0,09

Com base nos resultados do SAVI, descritos acima, foi obtido o parâmetro físico correspondente ao LAI, cujos resultados encontram-se espacializados da Figura 5.29 à Figura 5.36.

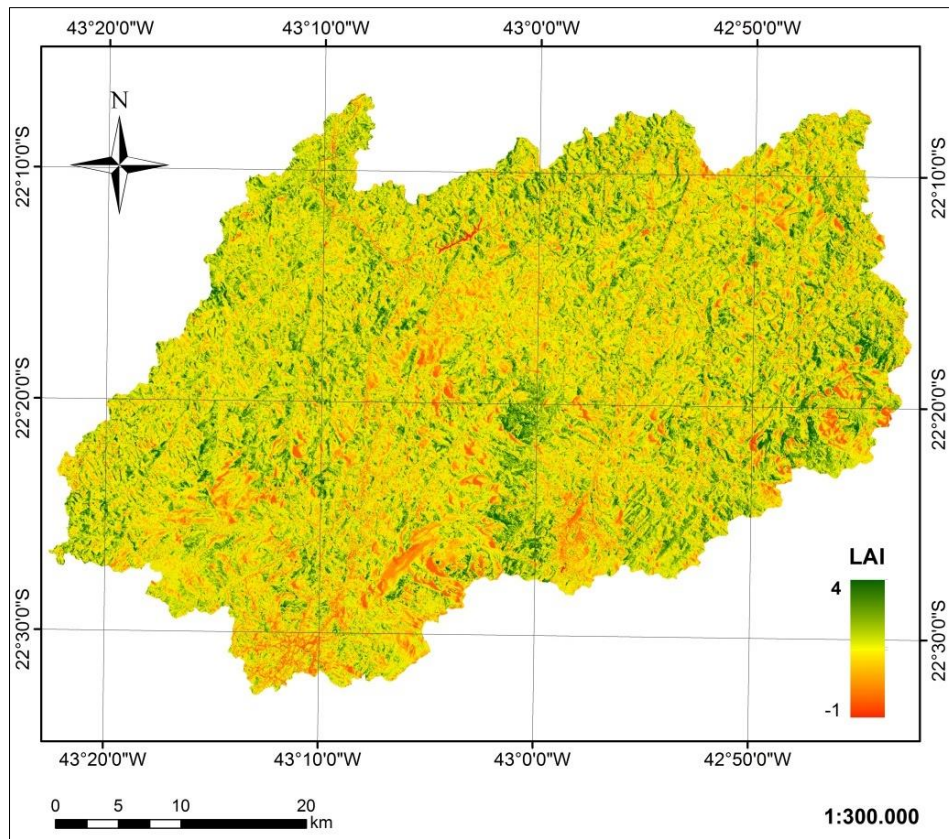


Figura 5.29. Mapa do LAI para 19/03/1986.

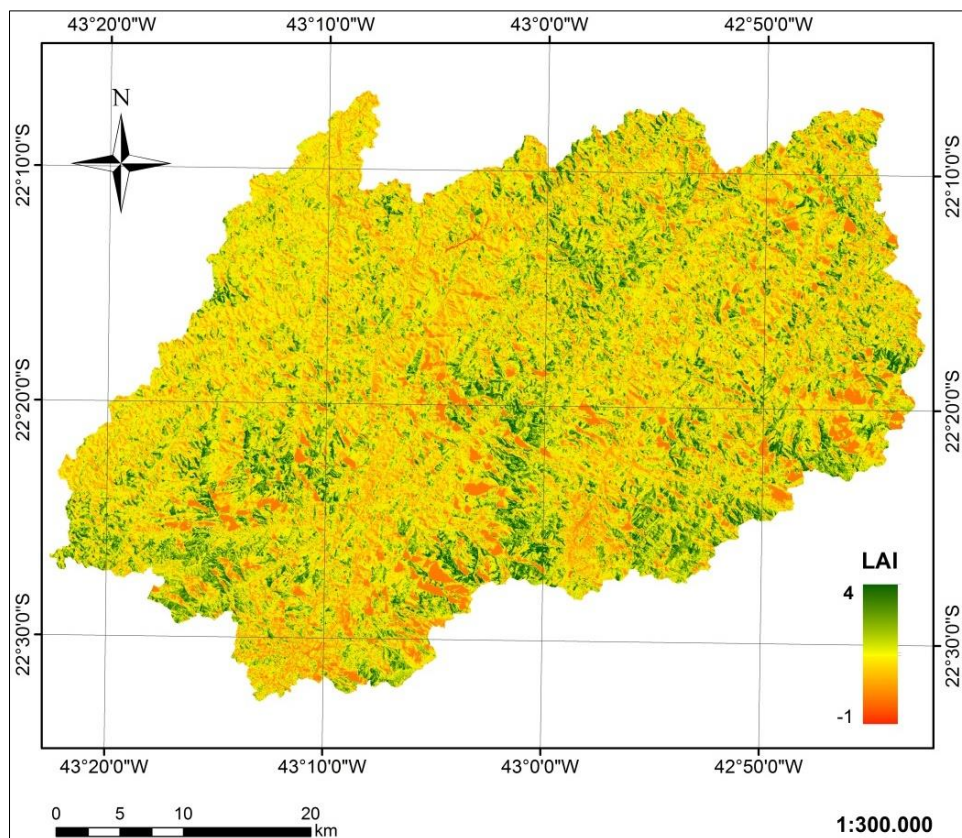


Figura 5.30. Mapa do LAI para 28/03/1990.

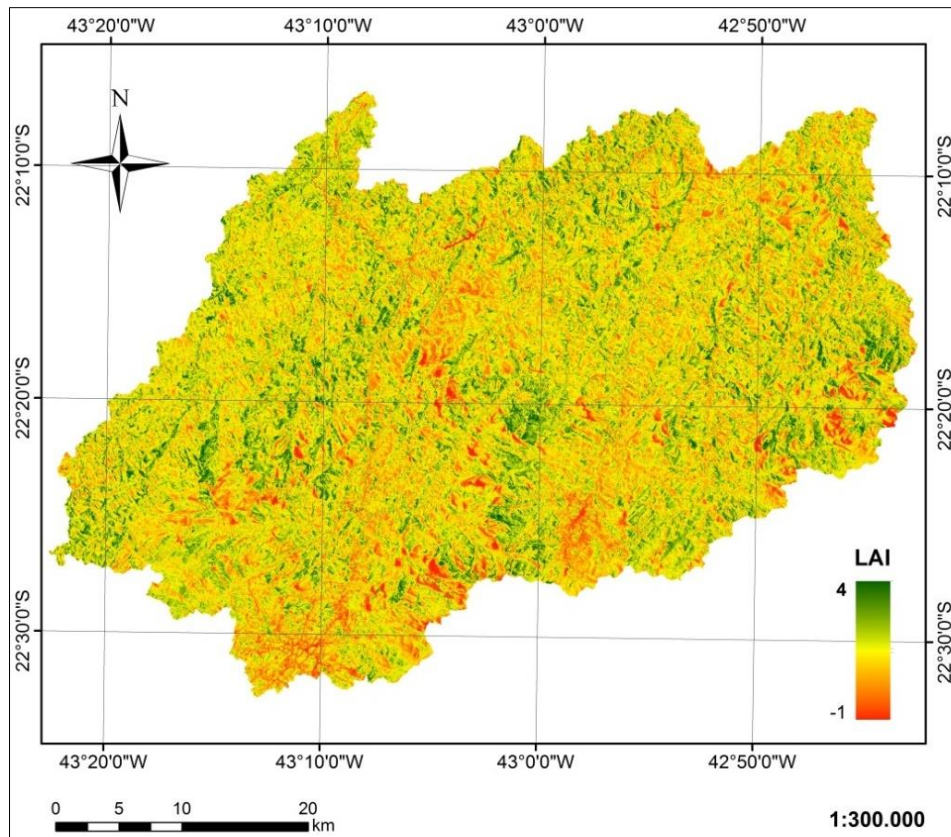


Figura 5.31. Mapa do LAI para 29/07/1994.

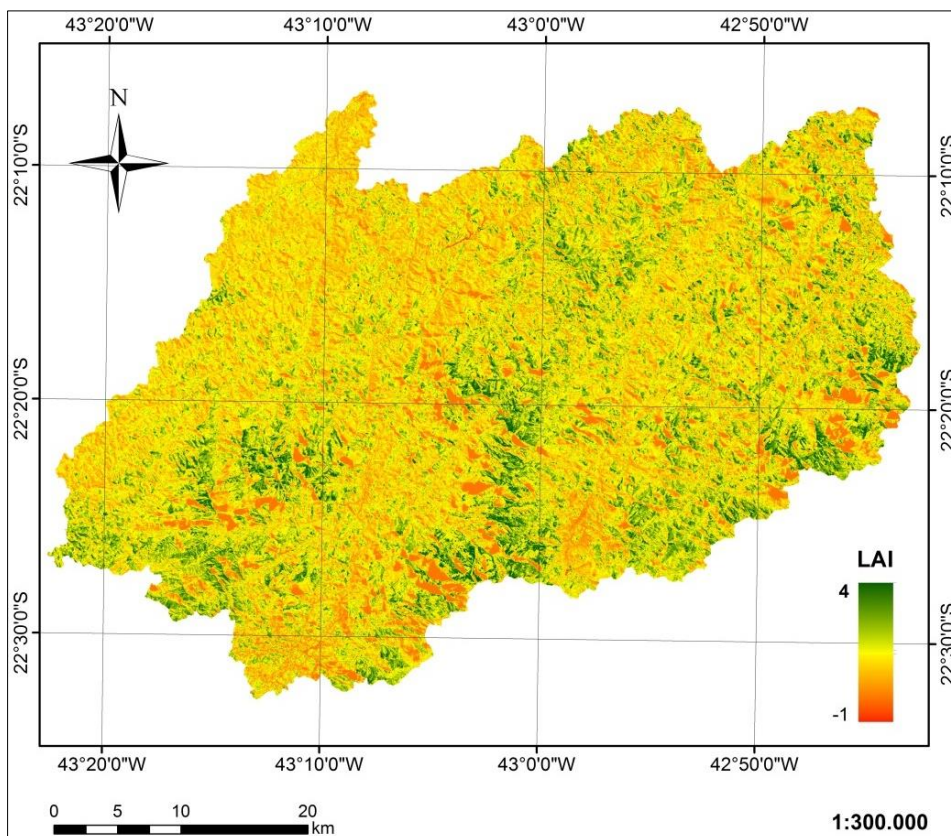


Figura 5.32. Mapa do LAI para 08/07/1998.

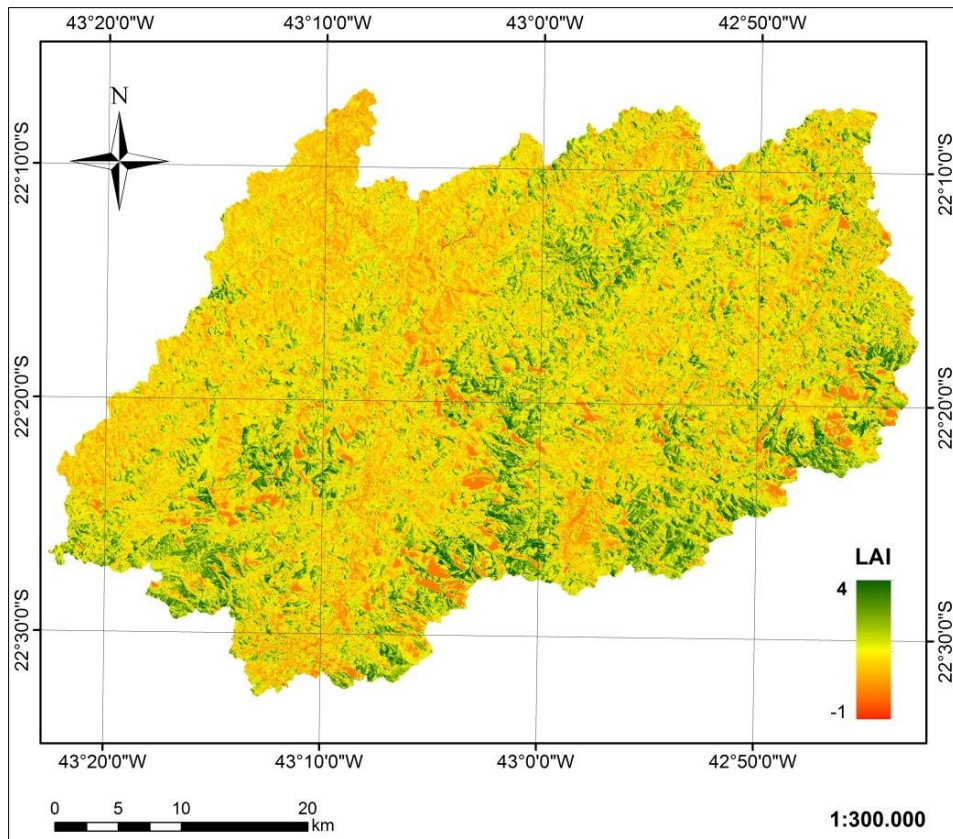


Figura 5.33. Mapa do LAI para 01/08/2001.

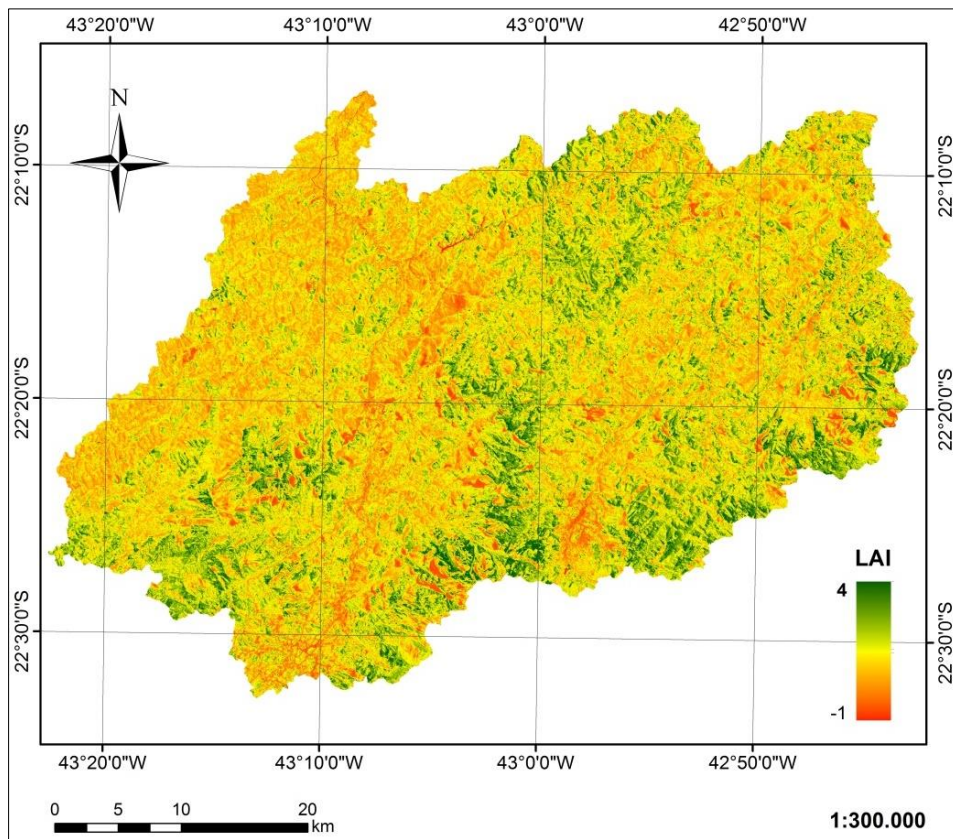


Figura 5.34. Mapa do LAI para 28/08/2005.

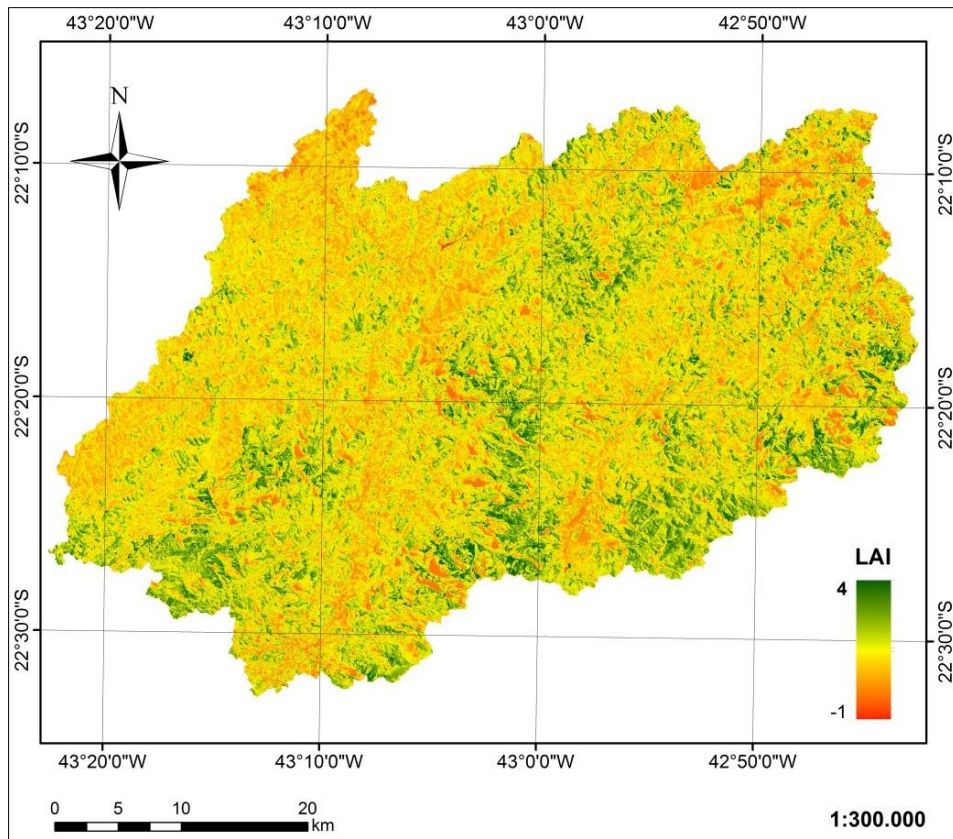


Figura 5.35. Mapa do LAI para 20/08/2008.

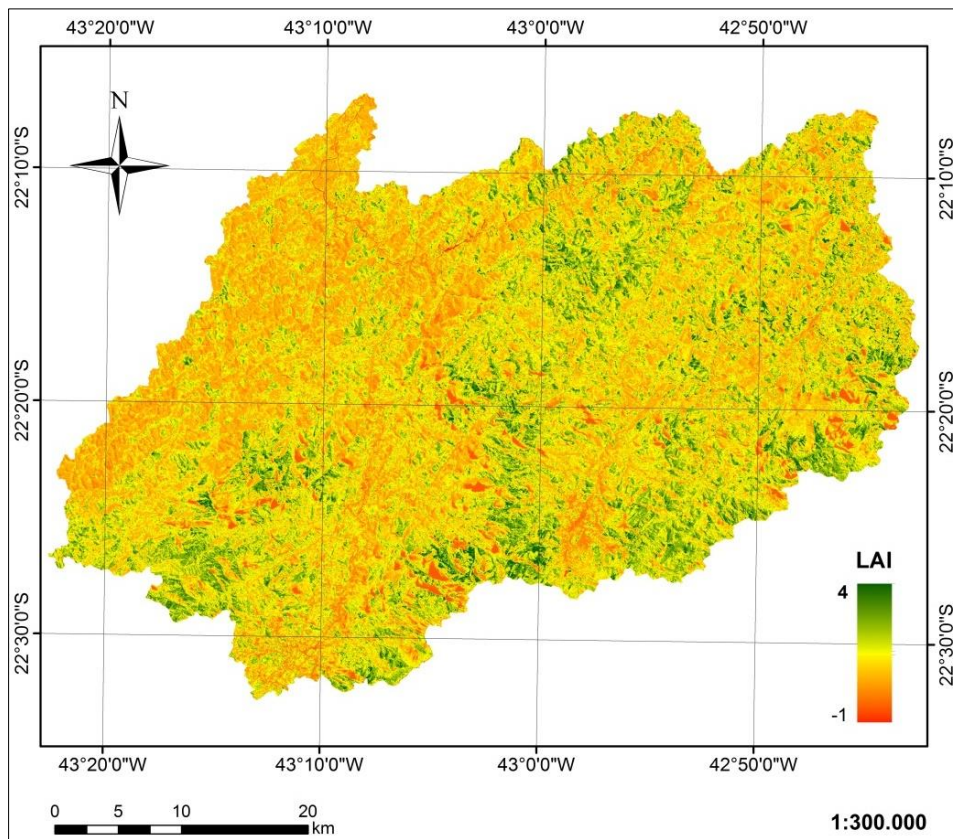


Figura 5.36. Mapa do LAI para 13/08/2011.

Como mostra a Figura 5.37, o LAI apresenta um decréscimo acentuado a partir do momento relativo ao ano de 1994. Observa-se a correspondência entre as distribuições para os instantes a partir de 2001, salvo pequenas variações, sendo possível inferir que não houve uma alteração significativa da biomassa da área estudada.

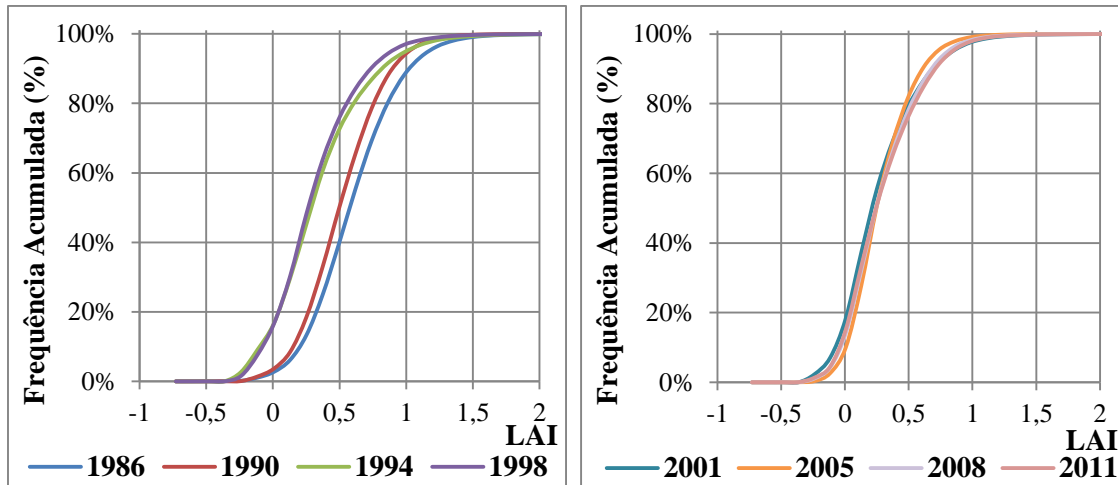


Figura 5.37. Distribuição de frequência dos valores do LAI para 1986, 1990, 1994 e 1998 à esquerda, e para 2001, 2005, 2008 e 2011 à direita.

Os mapas contendo a média e o indicativo da variância de cada píxel nos oito instantes avaliados podem ser observados na Figura 5.38 e na Figura 5.39, respectivamente.

Observa-se que os valores médios do LAI variam entre -0,32 e 2,5. A variância entre as estimativas nos instantes analisados vai de $9,8 \times 10^{-5}$ a 1,4. Foi quantificado que, em 75% dos píxeis, a variância calculada é inferior a 0,075, havendo pouca divergência entre os valores dos píxeis nos oito momentos analisados em relação ao valor médio.

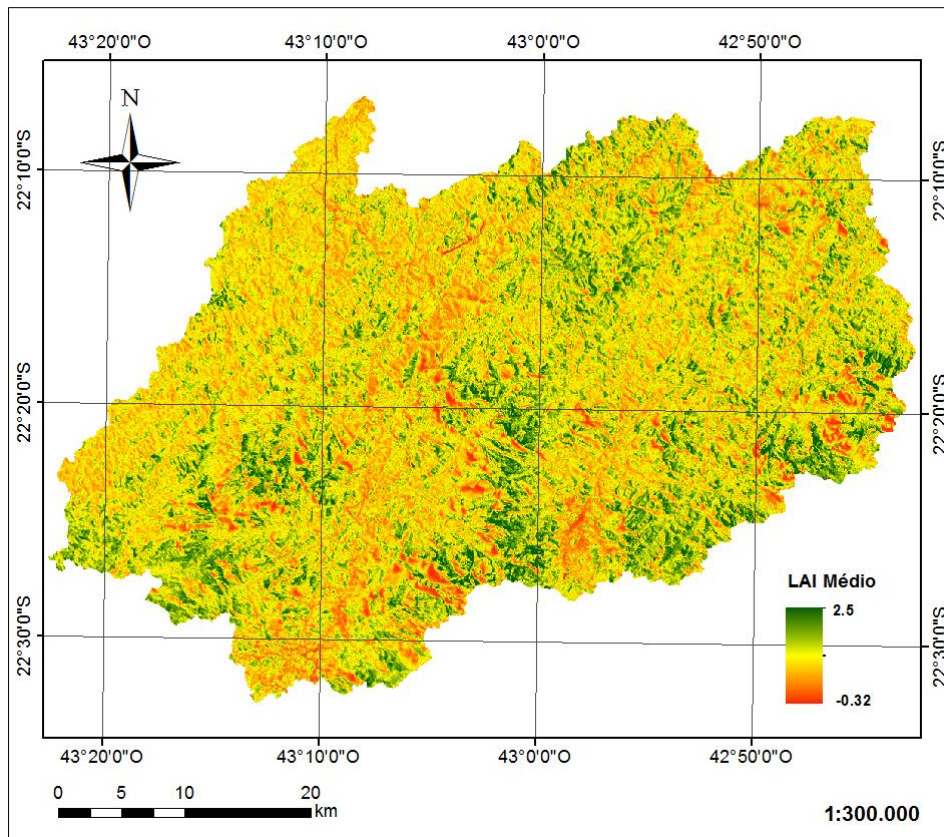


Figura 5.38. Média do LAI das imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

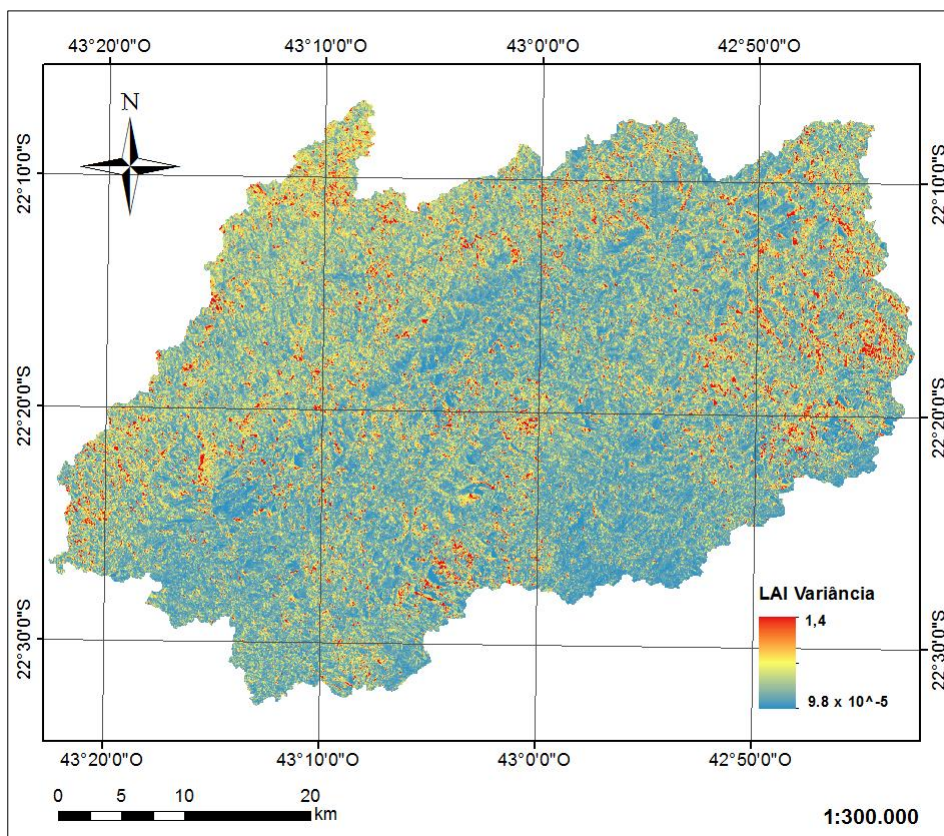


Figura 5.39. Variância entre as estimativas de LAI nas imagens de 1986, 1990, 1994, 1998, 2001, 2005, 2008 e 2011.

A Figura 5.40 e a Figura 5.41 são representativas, respectivamente, das condições iniciais e finais da bacia em análise, no que tange ao LAI.

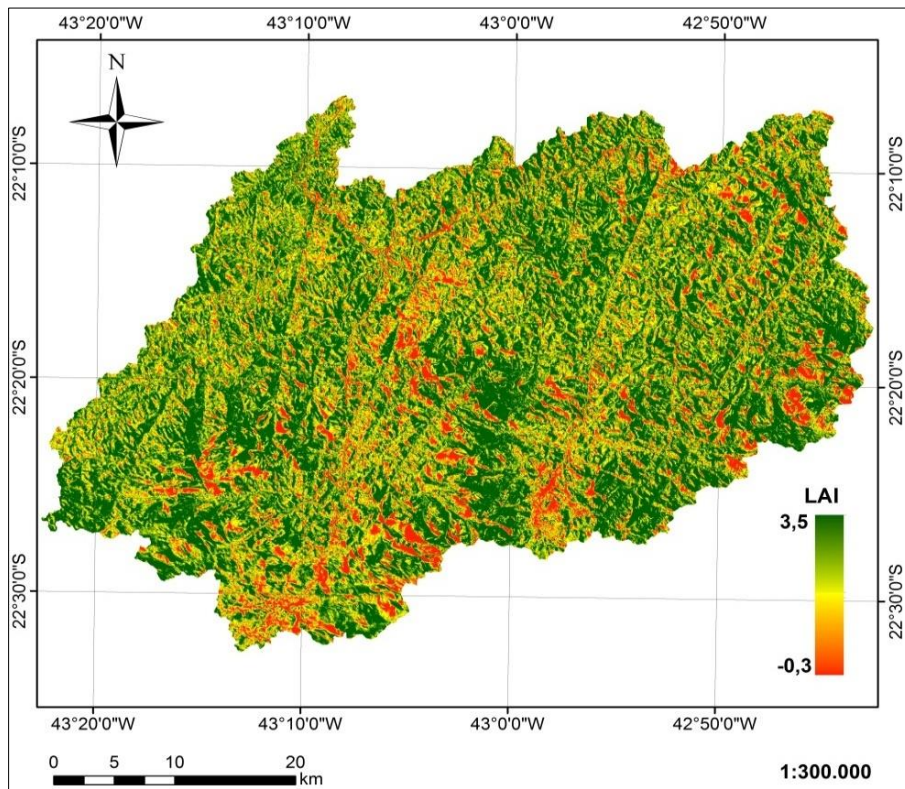


Figura 5.40. Mapa da média do LAI para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.

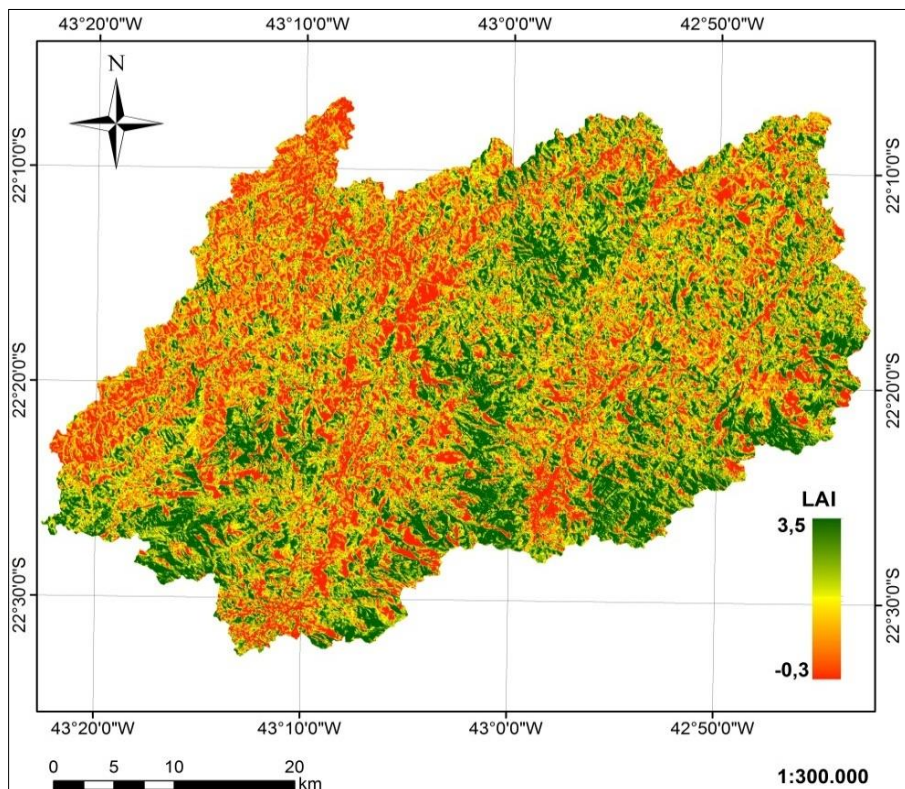


Figura 5.41. Mapa da média do LAI para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.

A distribuição dos valores de LAI para os cenários dos instantes iniciais (1986 - 1998) e finais (2005 - 2011) da bacia encontra-se exposta na Figura 5.42.

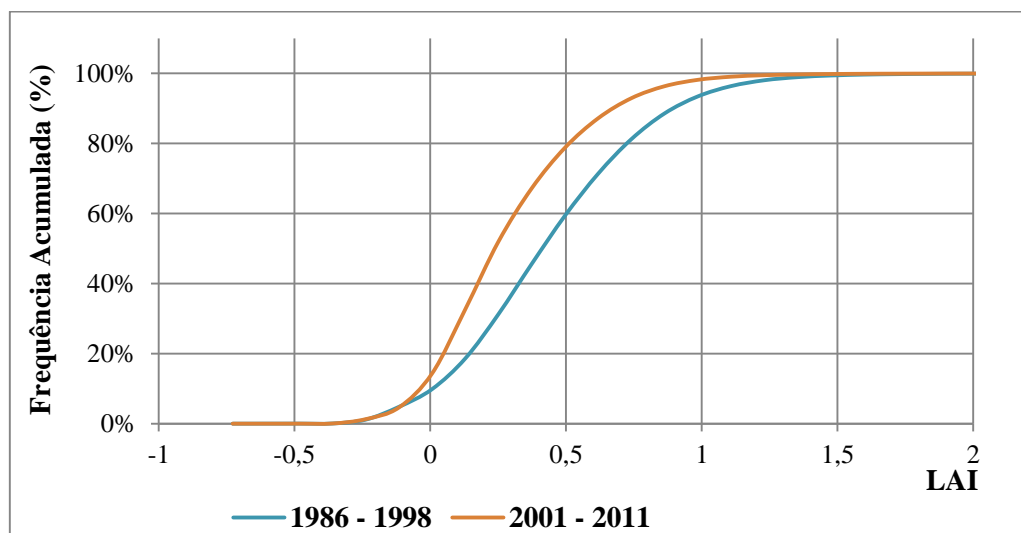


Figura 5.42. Distribuição de frequência acumulada das médias dos valores do LAI nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

A redução no LAI da bacia, expressa pelo deslocamento da curva de distribuição para a esquerda em relação à curva representativa das condições iniciais, está atrelada à mudança em sua cobertura vegetal entre os instantes avaliados.

Modificações no LAI, principalmente tratando-se de ecossistemas florestais, influem diretamente na evapotranspiração e, conseqüentemente, no balanço hídrico da região.

A avaliação integrada dos índices de vegetação considerados é importante na obtenção de informações sobre a redução da cobertura vegetal da bacia do rio Piabanha ao longo do período estudado. Adicionalmente, a partir desse mapeamento, será possível estabelecer relações entre o índice de vegetação e a TSC da região, a fim de estimar o IUS e detectar mudanças.

5.2.2 Temperatura Superficial Continental (TSC)

A obtenção da temperatura superficial continental (TSC) foi realizada conforme metodologia descrita: o primeiro modelo considera a correção da emissividade, enquanto que o segundo prevê também a correção dos efeitos atmosféricos, e o terceiro acrescenta a correção dos efeitos da topografia.

Todas as estimativas referem-se ao momento de obtenção da imagem avaliada. A seguir, estão expostos os resultados obtidos.

5.2.2.1 *Temperatura com correção da Emissividade (T_{s1})*

As estimativas da TSC com correção da emissividade da superfície podem ser observadas da Figura 5.43 à Figura 5.50.

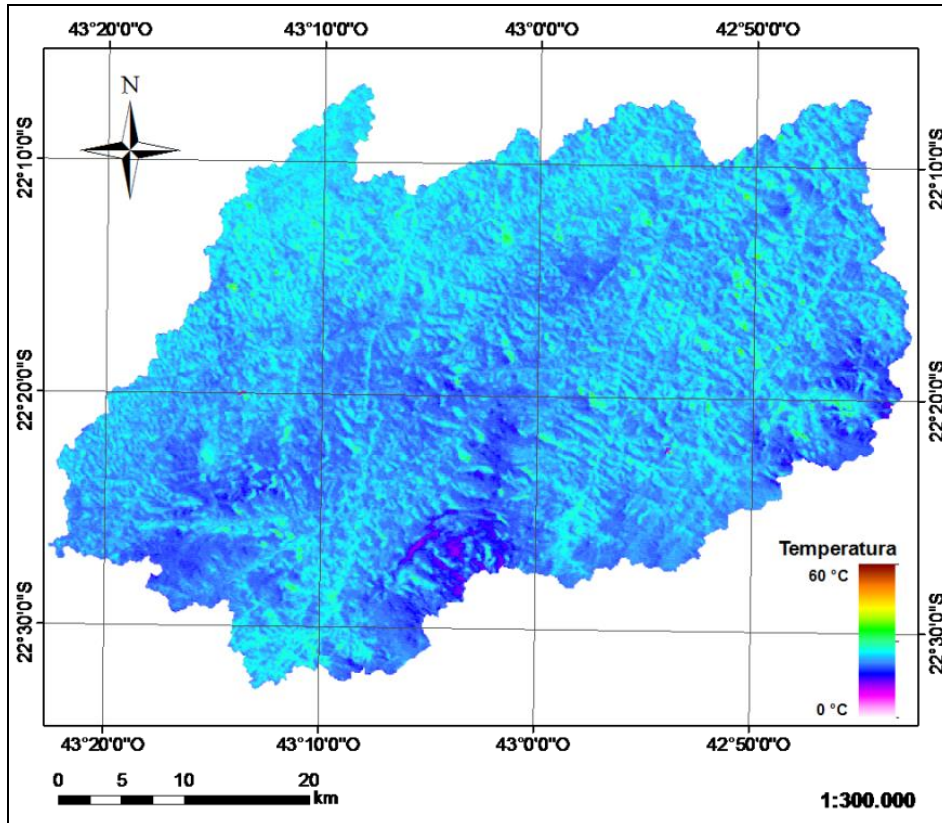


Figura 5.43. TSC com correção da emissividade para 19/03/1986.

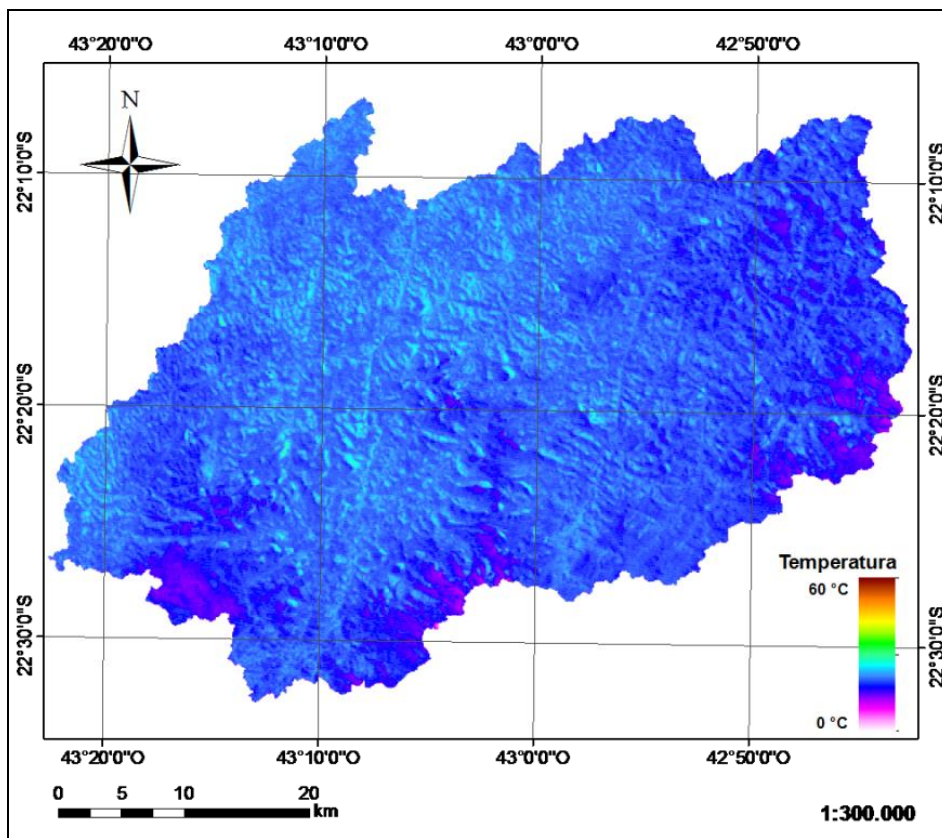


Figura 5.44. TSC com correção da emissividade para 28/03/1990.

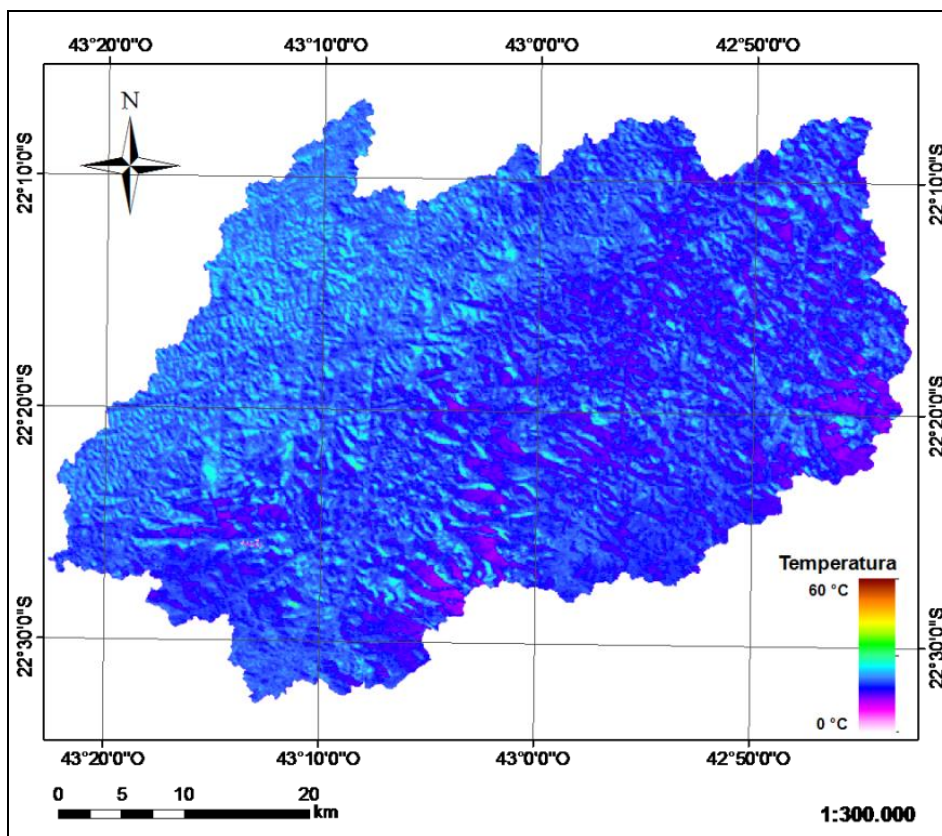


Figura 5.45. TSC com correção da emissividade para 29/07/1994.

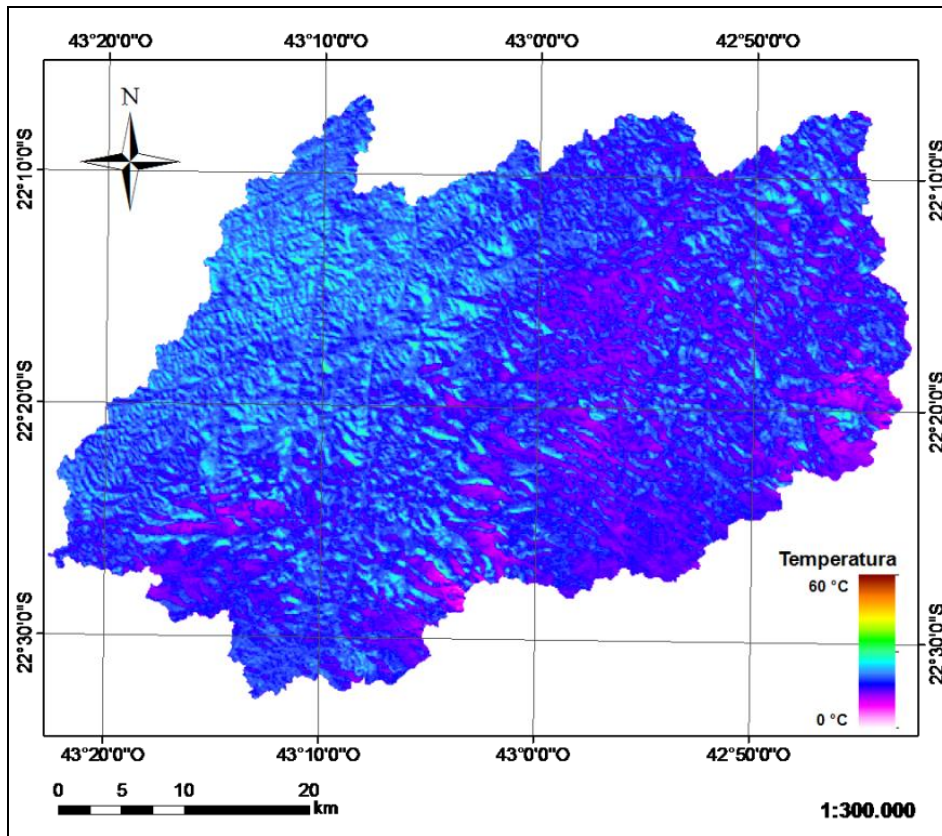


Figura 5.46. TSC com correção da emissividade para 08/07/1998.

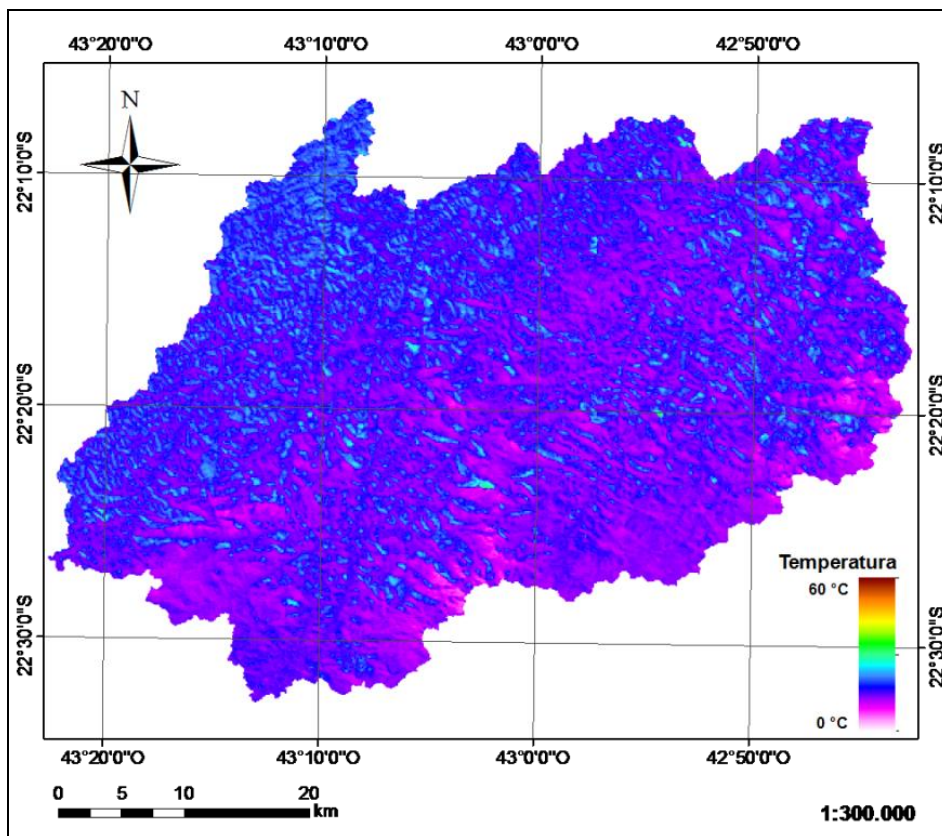


Figura 5.47. TSC com correção da emissividade para 01/08/2001.

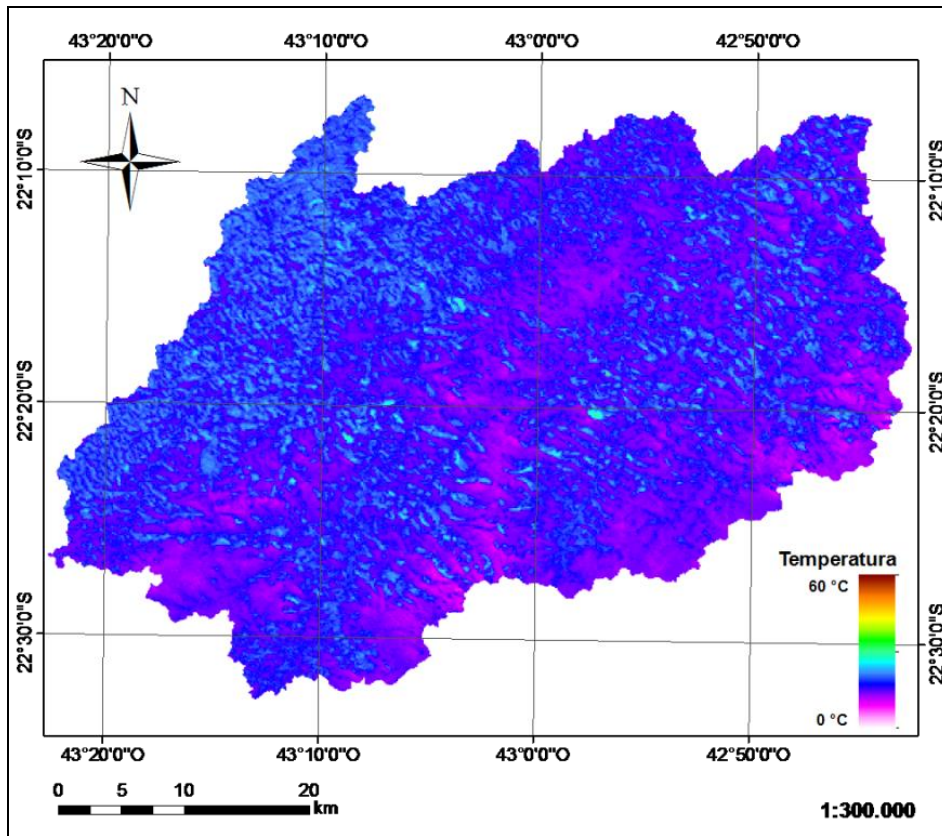


Figura 5.48. TSC com correção da emissividade para 28/08/2005.

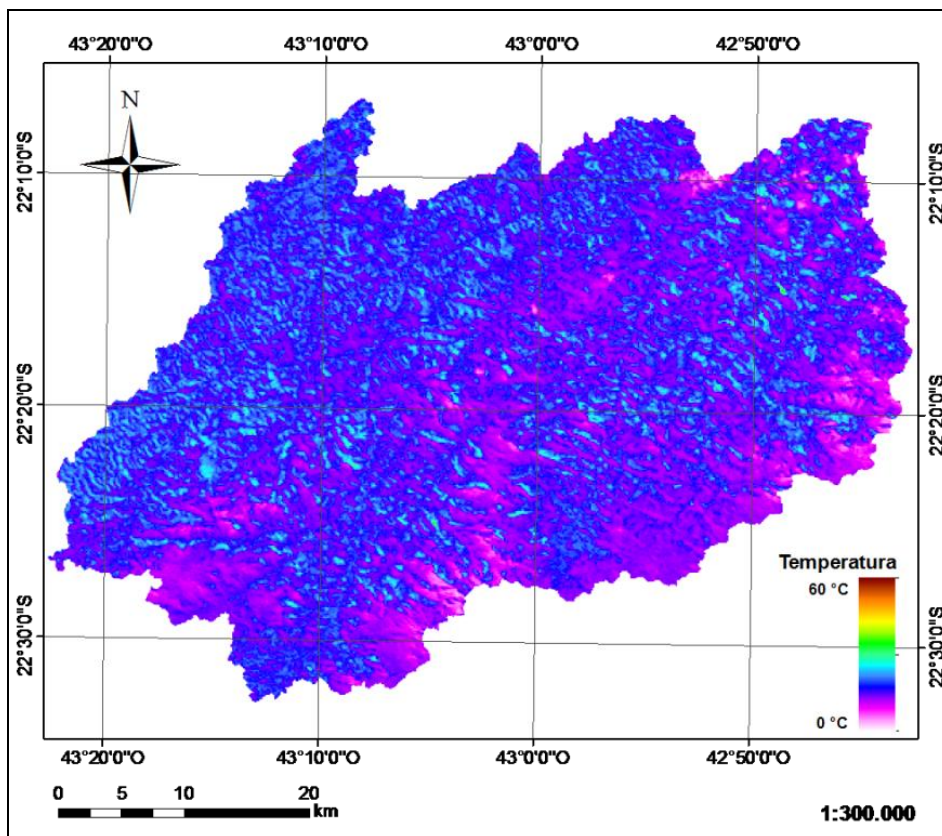


Figura 5.49. TSC com correção da emissividade para 20/08/2008.

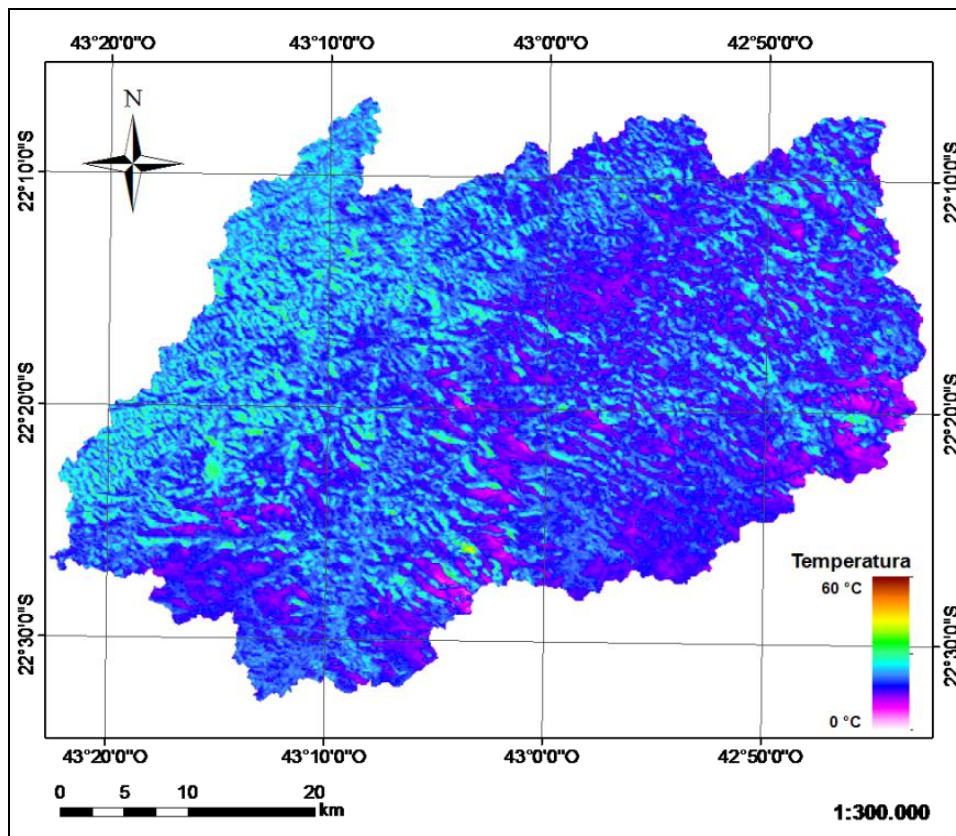


Figura 5.50. TSC com correção da emissividade para 13/08/2011.

Observa-se que a distribuição espacial da TSC na bacia segue um padrão, com temperaturas menores nas regiões centro-sul e leste, e temperaturas mais elevadas em regiões de associada urbanização. Todavia a exceção do primeiro instante avaliado (1986) com temperaturas claramente superiores aos demais, a simples observação dos mapas não é suficiente para que sejam detectadas mudanças significativas nos valores de temperatura ao longo do tempo.

Dessa forma, na Figura 5.51, é mostrada a distribuição da temperatura nos instantes avaliados. Destaca-se que, para o primeiro bloco avaliado (1986 – 1998), ocorre uma redução gradativa das temperaturas na bacia.

Nesse caso, as influências de outros fatores climáticos sobre a temperatura são mais significativas do que a vegetação, cujos índices tendem a diminuir ao longo do tempo. Já no segundo período avaliado (2001 - 2011), observa-se uma relação direta entre a tendência de redução dos índices de vegetação NDVI e SAVI com o aumento das temperaturas superficiais.

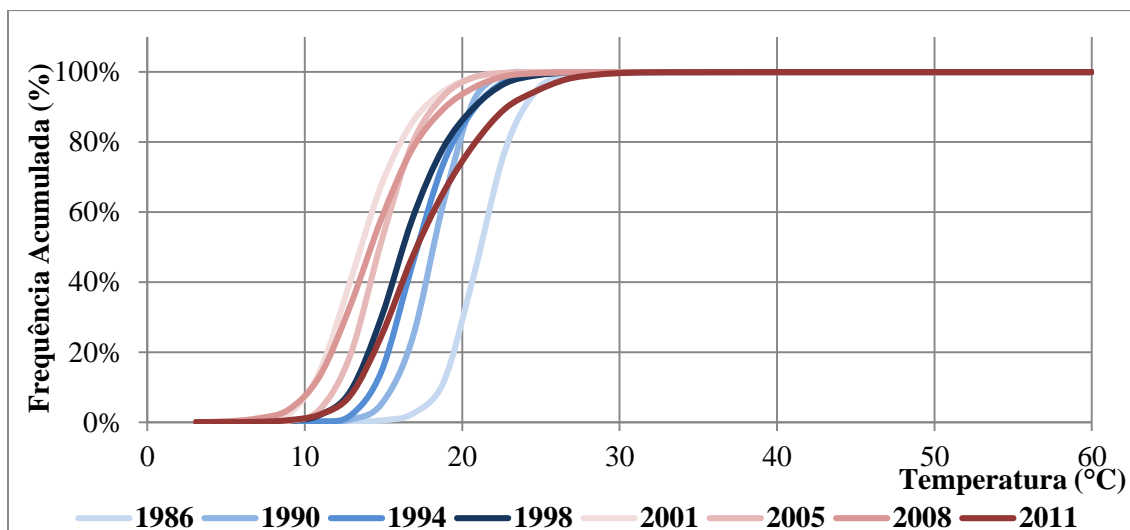


Figura 5.51. Distribuição de frequência acumulada da TSC com correção da emissividade.

5.2.2.2 TSC com Correção Atmosférica (T_{s2})

Complementarmente, foram desenvolvidas estimativas da TSC com correção dos efeitos atmosféricos, além da correção da emissividade, expostas da Figura 5.52 à Figura 5.59.

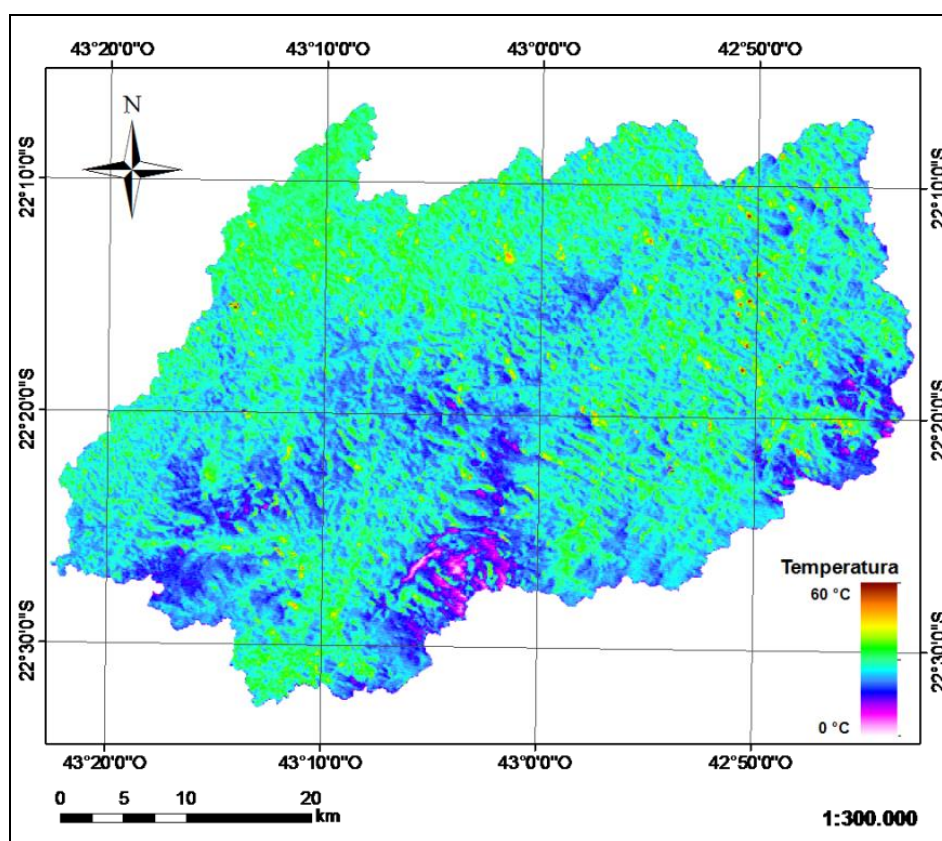


Figura 5.52. TSC com correção atmosférica para 19/03/1986.

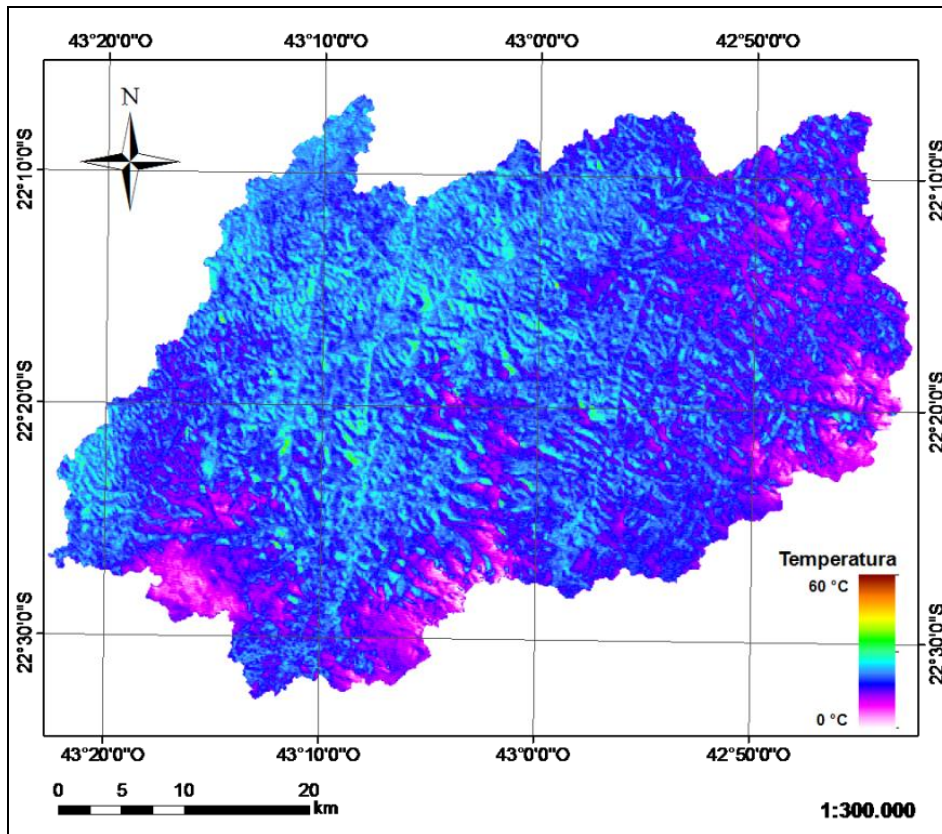


Figura 5.53. TSC com correção atmosférica para 28/03/1990.

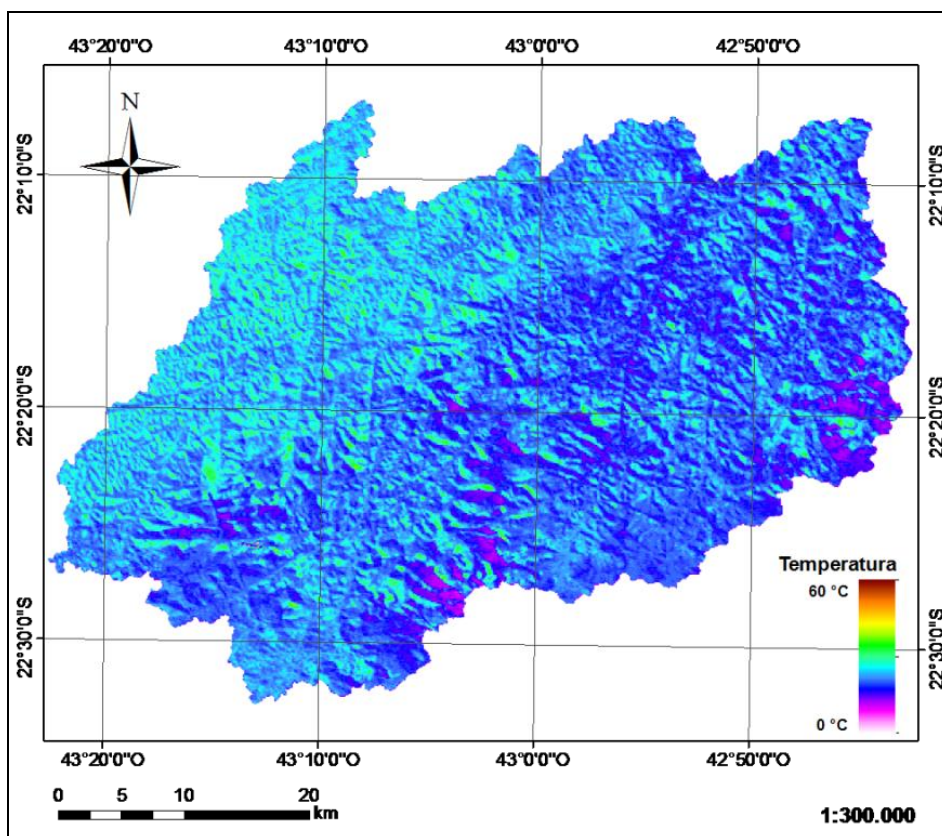


Figura 5.54. TSC com correção atmosférica para 29/07/1994.

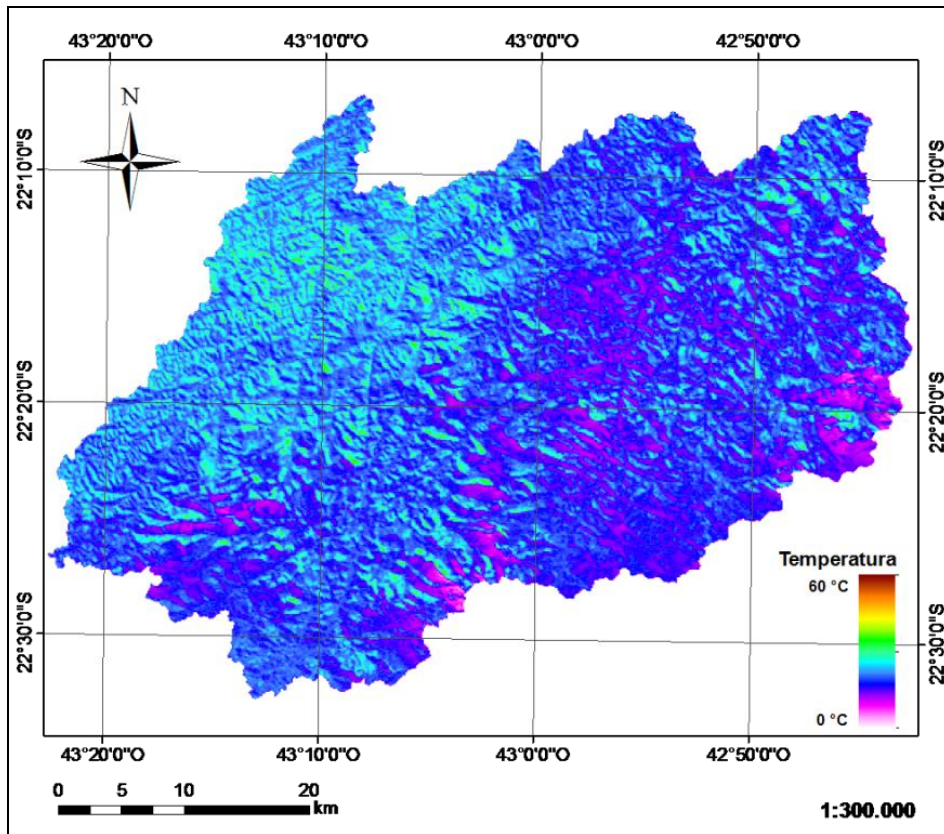


Figura 5.55. TSC com correção atmosférica para 08/07/1998.

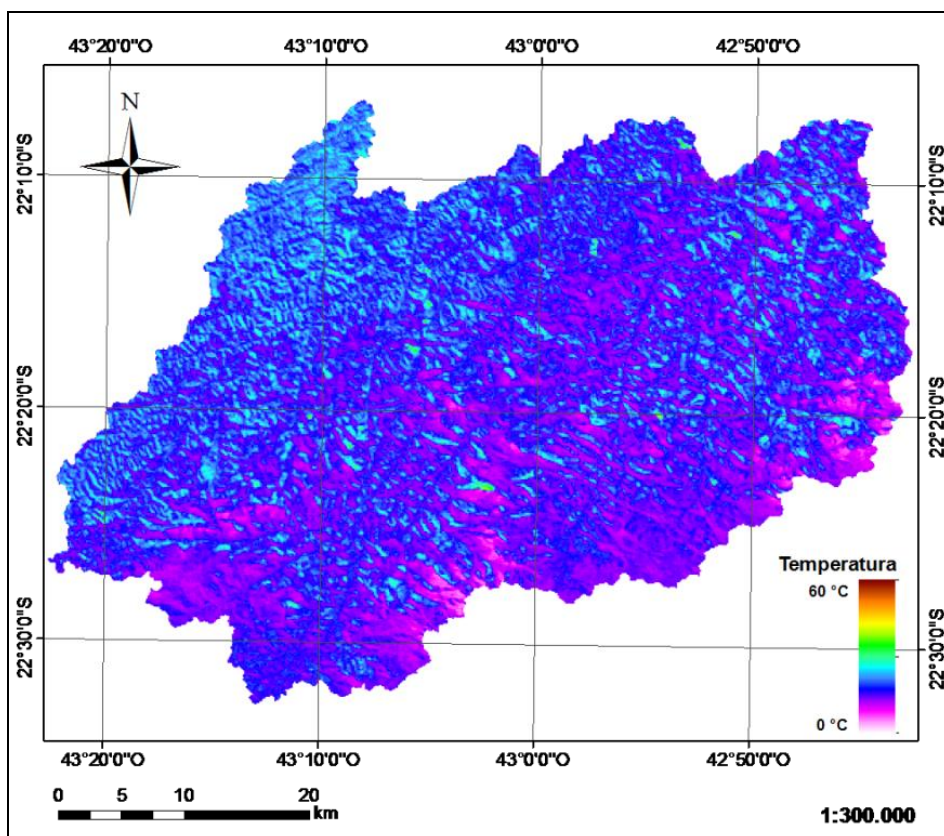


Figura 5.56. TSC com correção atmosférica para 01/08/2001.

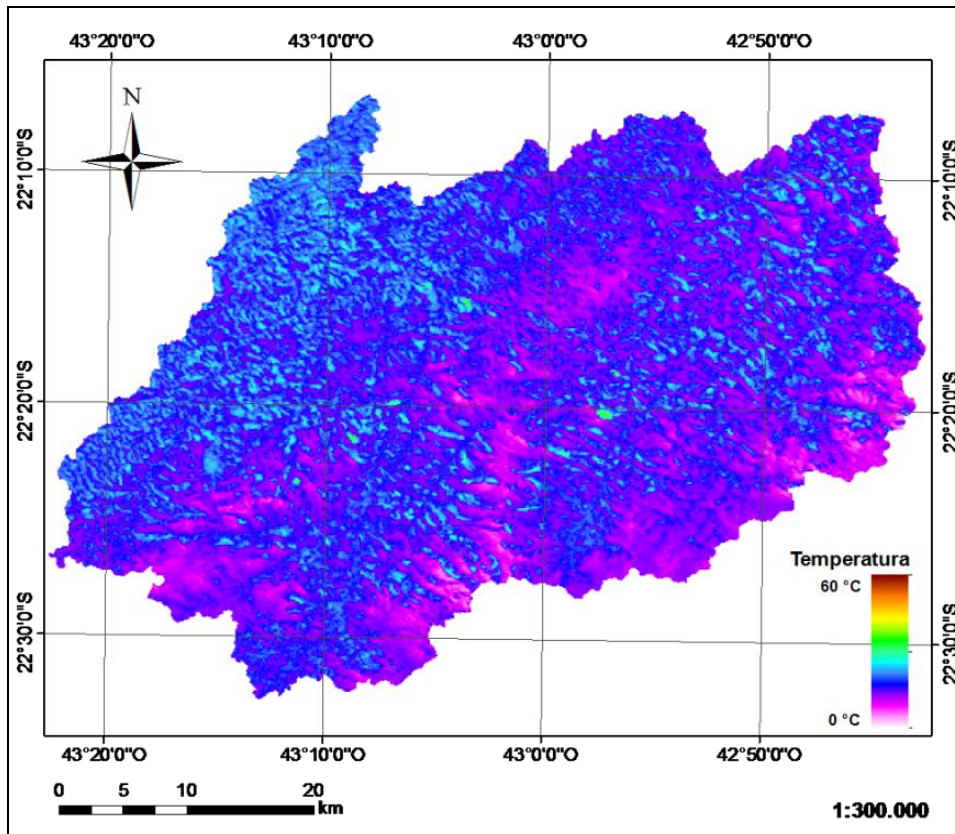


Figura 5.57. TSC com correção atmosférica para 28/08/2005.

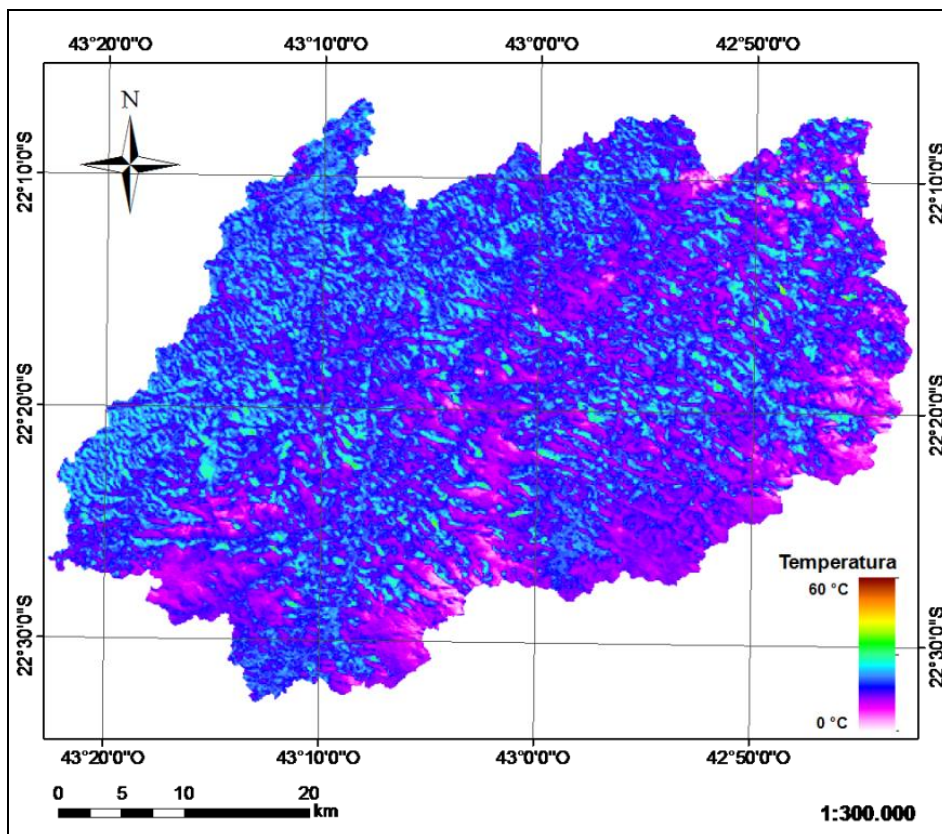


Figura 5.58. TSC com correção atmosférica para 20/08/2008.

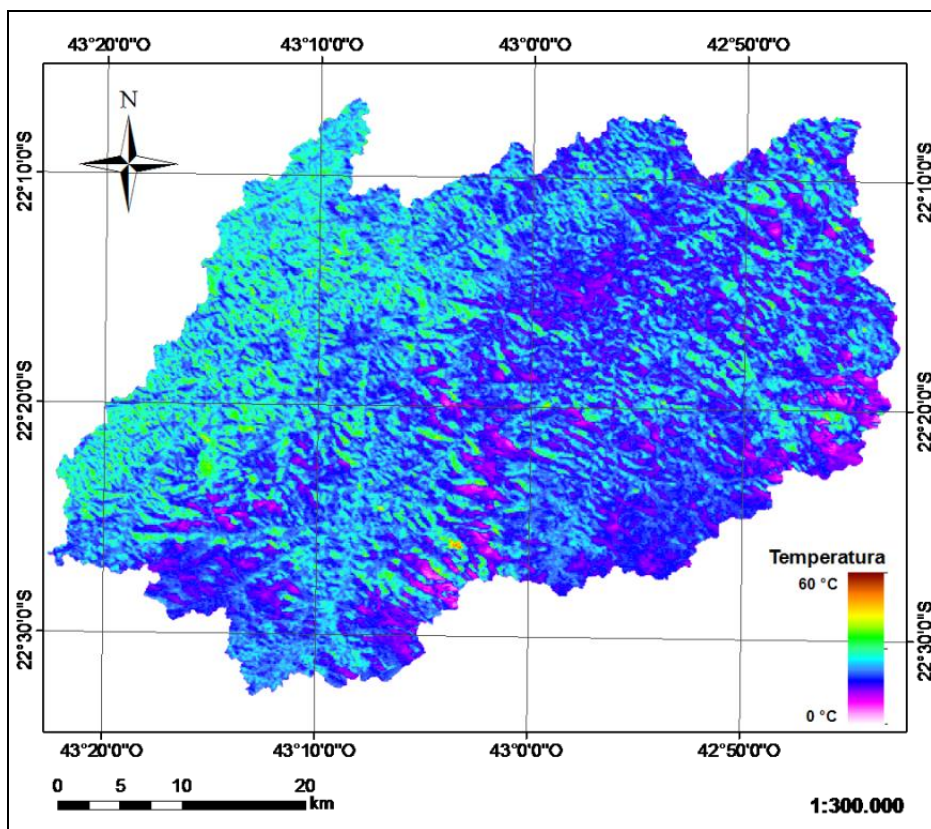


Figura 5.59, TSC com correção atmosférica para 13/08/2011.

A distribuição da temperatura permanece com o mesmo padrão de distribuição espacial. A correção dos efeitos atmosféricos acarreta em algumas modificações: para todas as imagens, houve uma maior distribuição das temperaturas atingidas, representado pelo maior espalhamento da curva. O ano no qual os efeitos atmosféricos apresentaram maior influência na estimativa a TSC foi o de 1990, claramente observado na alteração na curva de distribuição acumulada das temperaturas na Figura 5.60.

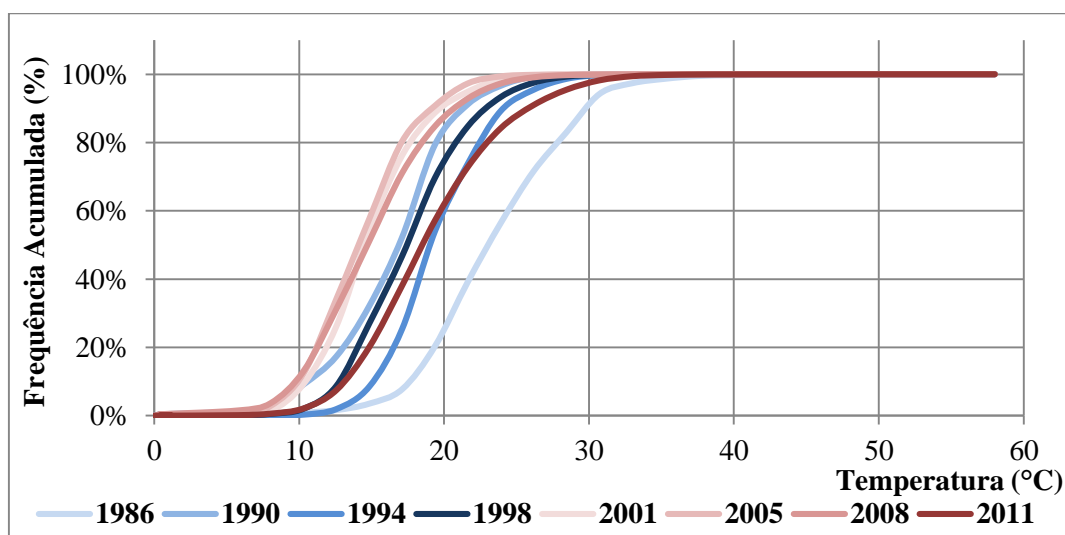


Figura 5.60. Distribuição de frequência acumulada da TSC, com correção atmosférica.

Agrupando as imagens avaliadas em dois blocos temporais, observam-se, na Figura 5.61 e na Figura 5.62, respectivamente, os instantes iniciais (1986, 1990, 1994, 1998) e finais (2000, 2005, 2008 e 2011) em termos da TSC na bacia.

Nos mapas a seguir, assim como observado anteriormente na Figura 5.60, é possível verificar que, de uma forma geral, ocorre a redução da TSC no período final em relação ao período inicial.

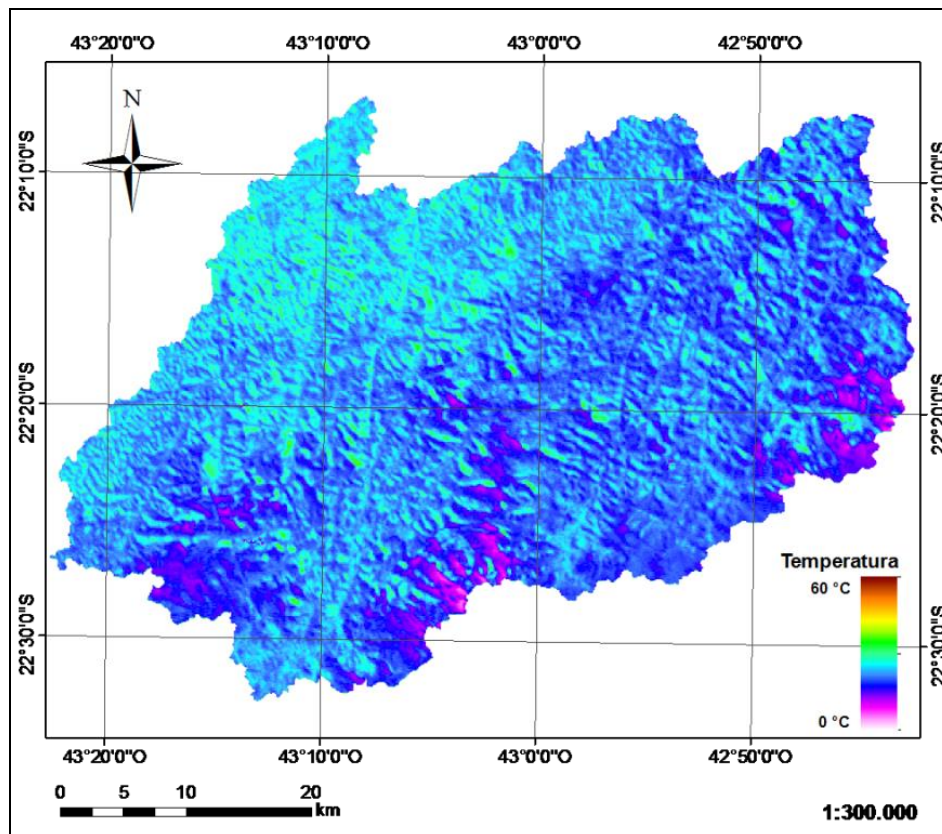


Figura 5.61. Mapa da média da TSC para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.

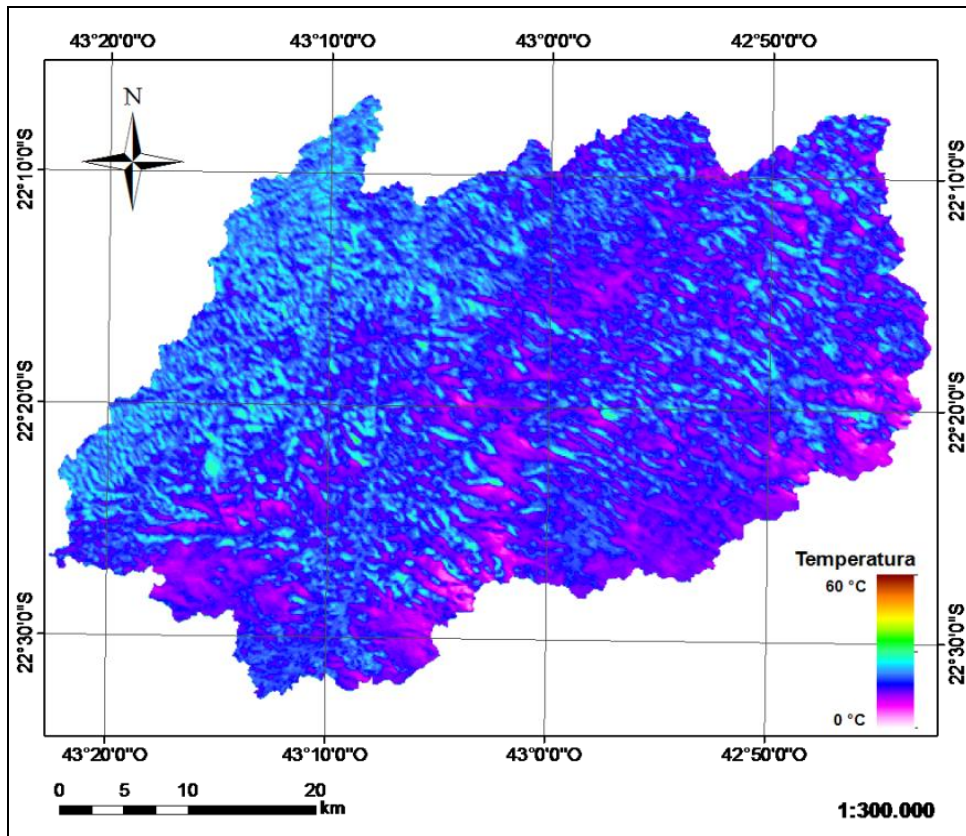


Figura 5.62. Mapa da média da TSC para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.

No gráfico exposto na Figura 5.63, há um deslocamento da curva representativa dos anos 2001-2011 para a esquerda, sendo possível, num diagnóstico pontual entre os momentos avaliados, observar menores temperaturas em relação ao período 1986-1998.

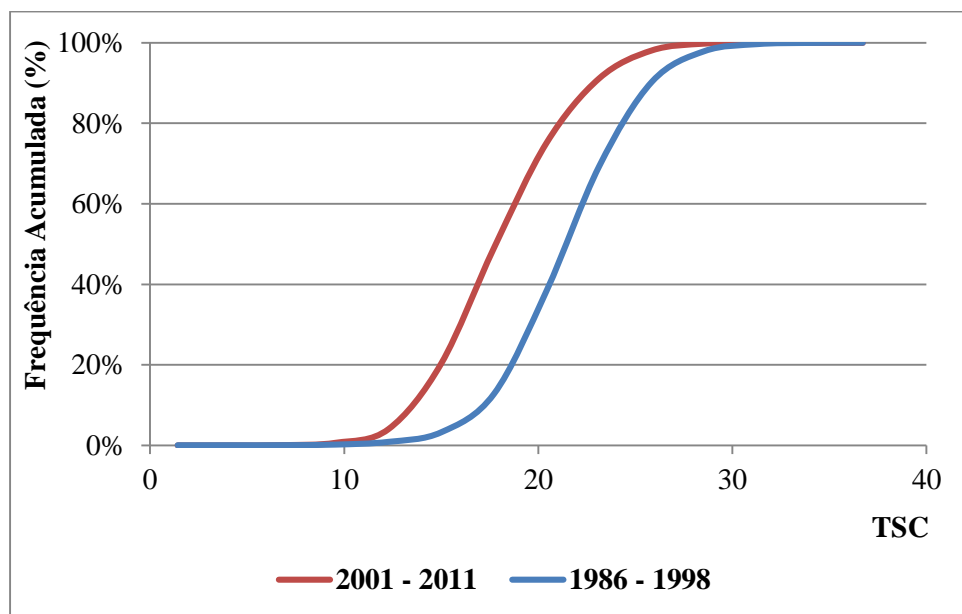


Figura 5.63. Distribuição de frequência acumuladas das TSC médias nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Na Tabela 5.4, encontram-se os valores mínimo, máximo e a da TSC média para os períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Tabela 5.4. Estatísticas da TSC média nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Período	Estatística (°C)			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1986 - 1998	0	37,12	21,58	3,50
2001-2011	4,29	33,58	18,02	3,60

5.2.2.3 Temperatura com correção em função do relevo

A altitude e o relevo representam fatores climáticos importantes, que influem diretamente em elementos como a temperatura e umidade. Dessa forma, foi desenvolvida, de forma complementar, a estimativa da TSC potencial, que estima a magnitude das temperaturas ao nível do mar.

A camada do fator de correção resultante, que deve ser multiplicada pela estimativa de temperatura que se pretende corrigir, pode ser observada na Figura 5.64.

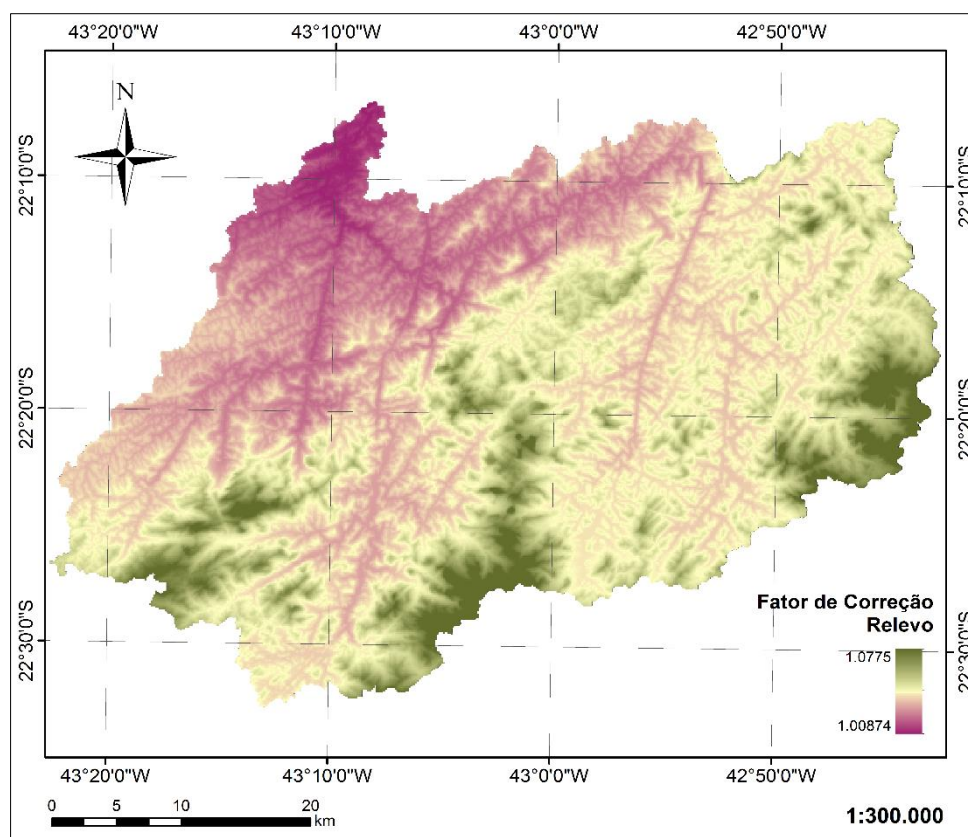


Figura 5.64. Camada de correção da temperatura em função do relevo.

Como a região apresenta altitudes relativamente superiores ao nível do mar, todas as temperaturas devem ser aumentadas em fatores que variam entre 0,87% e 7,75% de seu valor estimado, a depender da altitude relacionada ao píxel.

No presente trabalho, optou-se pela aplicação do fator de ajuste ao relevo às temperaturas estimadas com correção dos efeitos atmosféricos. A espacialização das temperaturas obtidas está apresentada da Figura 5.65 à Figura 5.72.

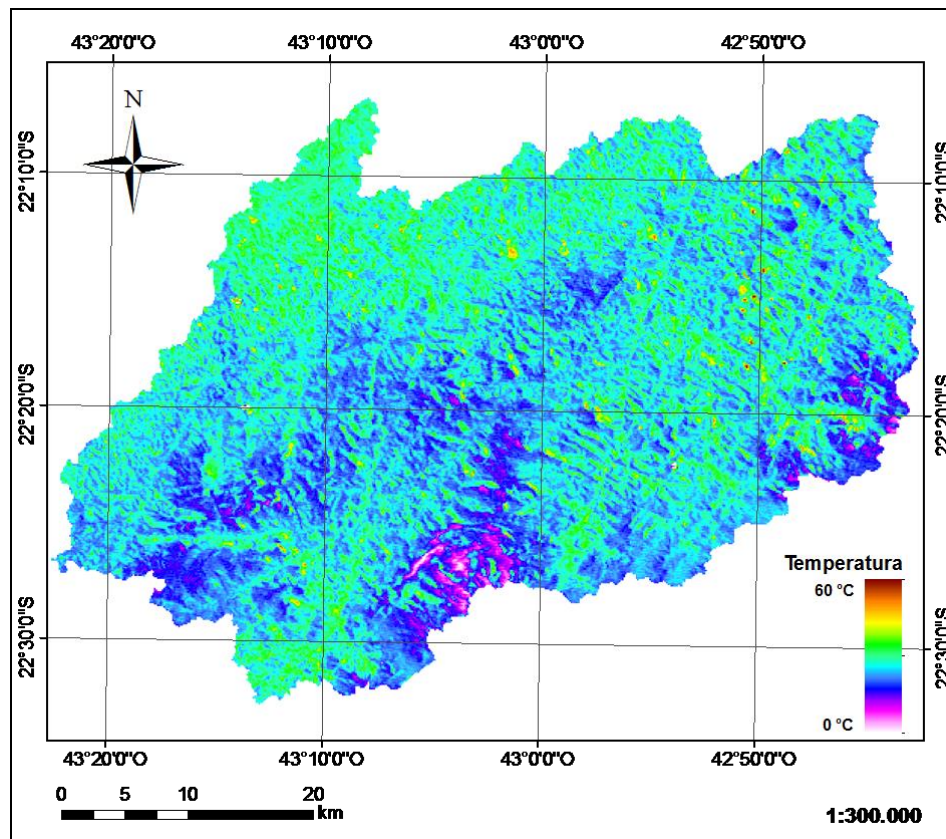


Figura 5.65. TSC potencial para 19/03/1986.

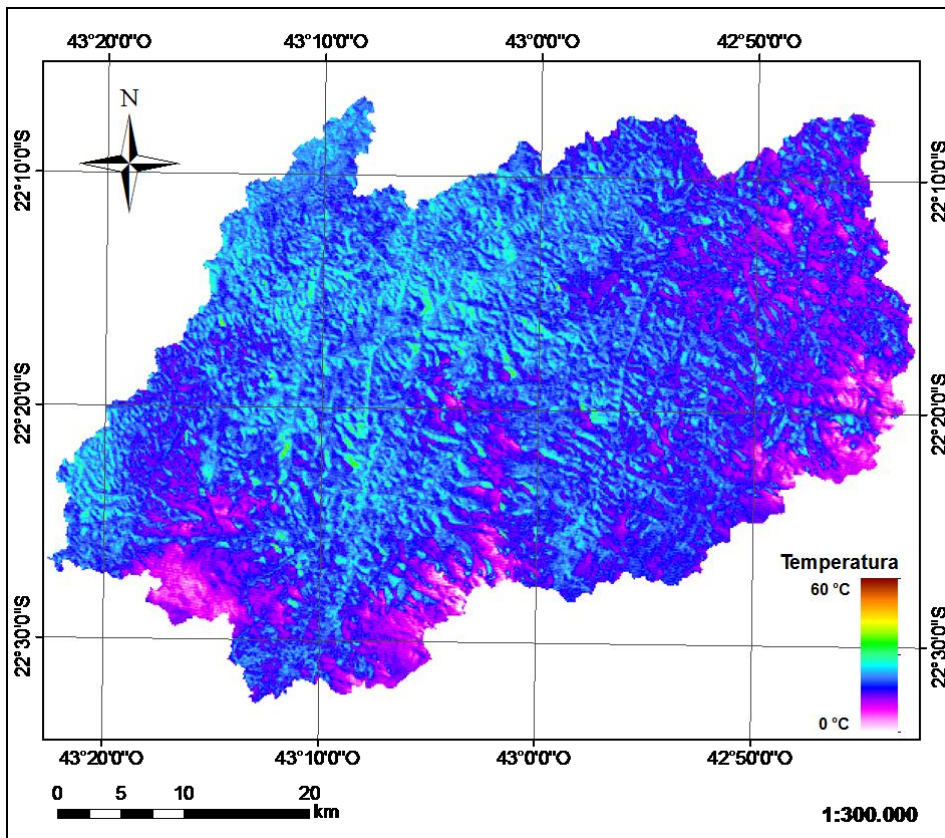


Figura 5.66. TSC potencial para 28/03/1990.

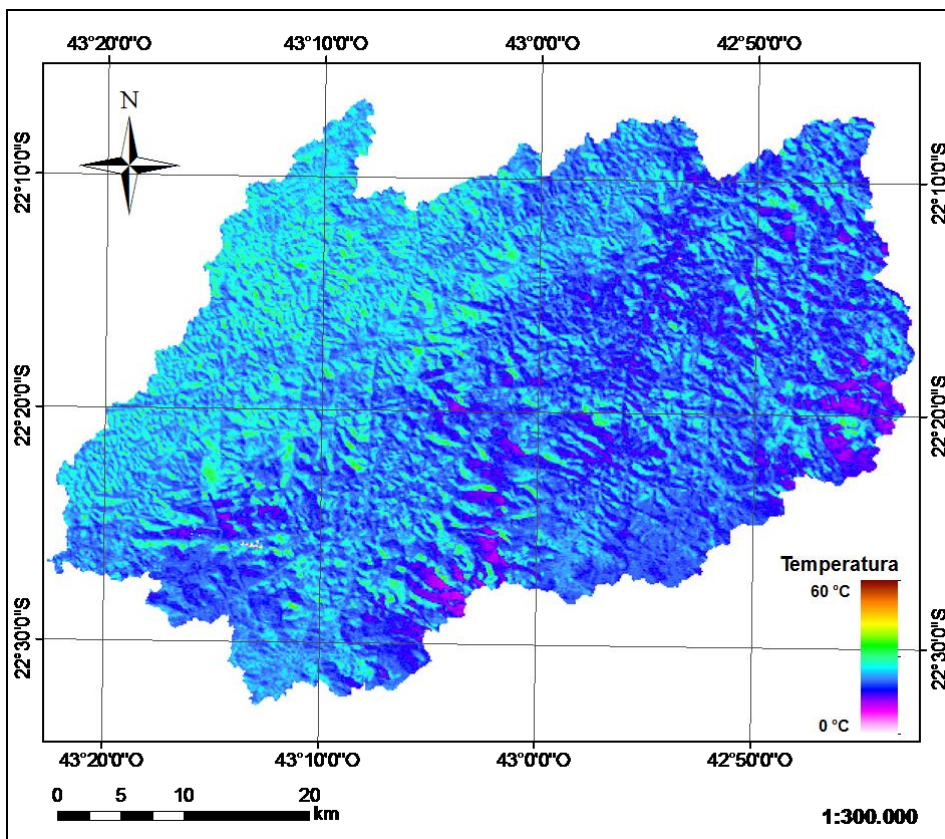


Figura 5.67. TSC potencial para 29/07/1994.

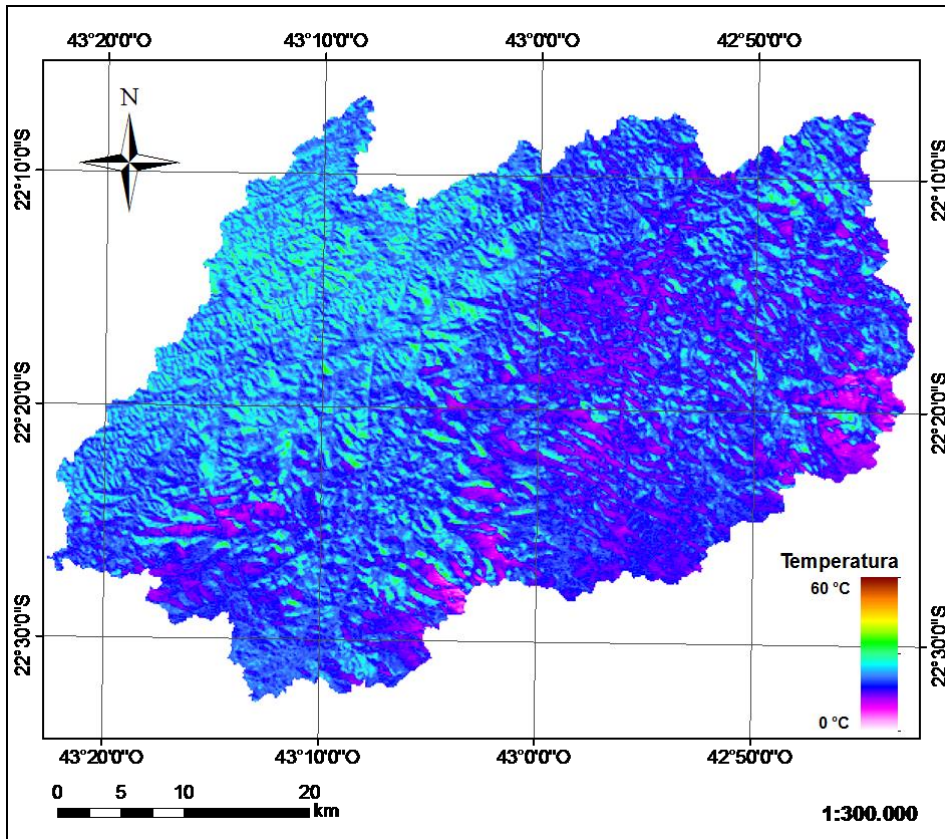


Figura 5.68. TSC potencial para 08/07/1998.

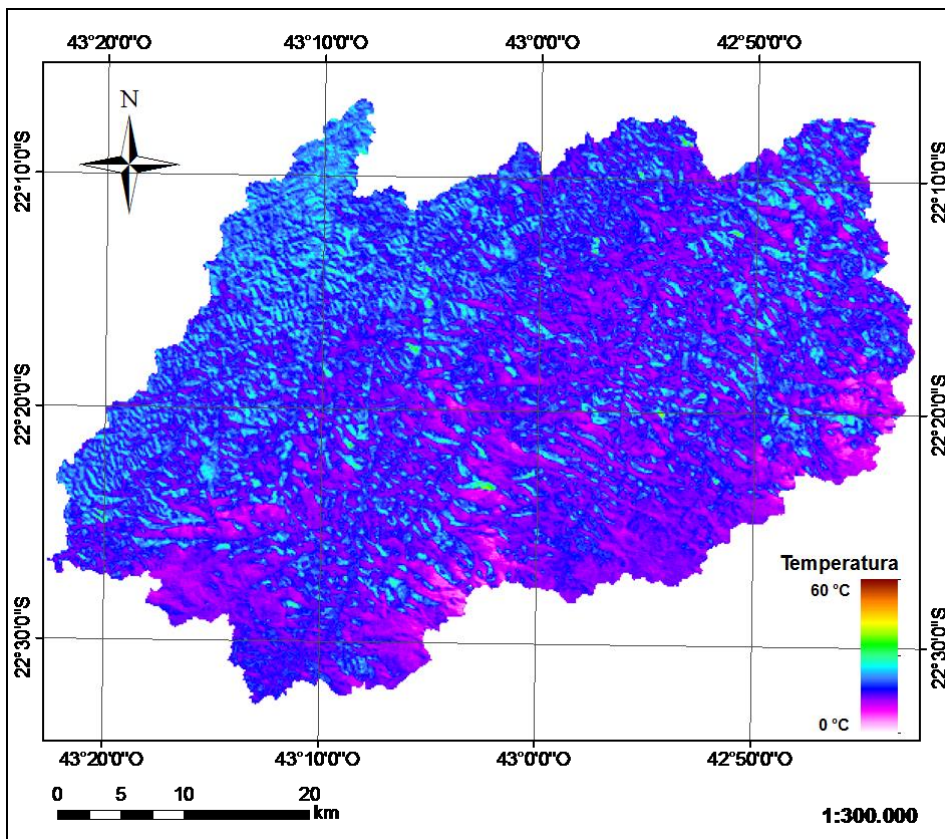


Figura 5.69. TSC potencial para 01/08/2001.

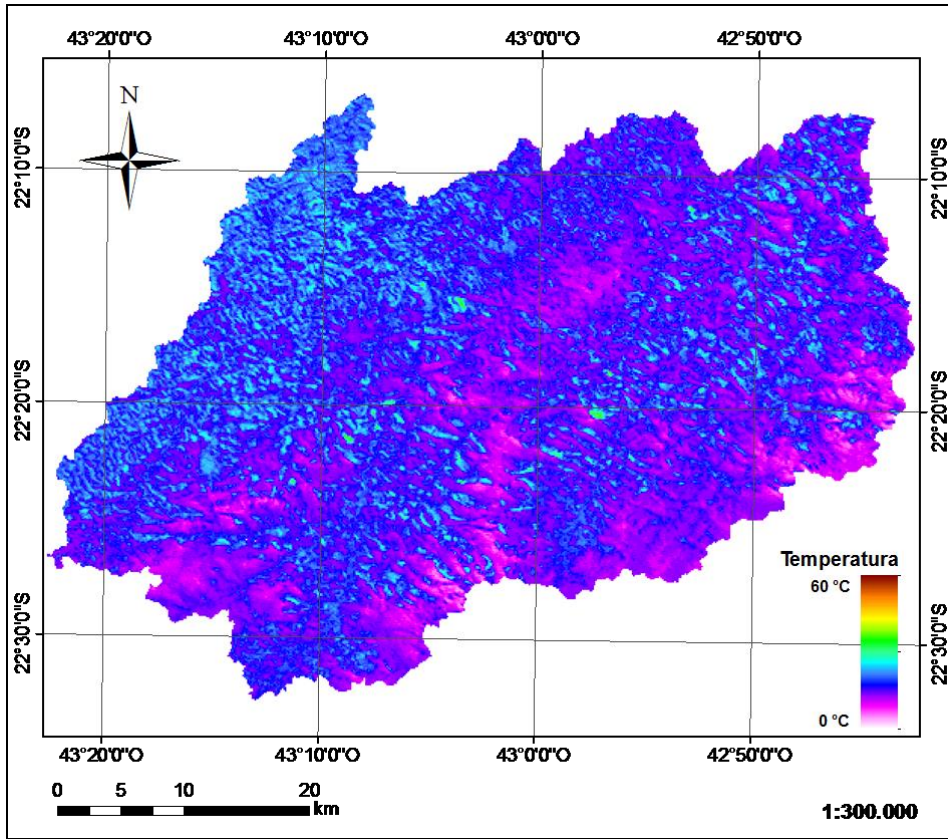


Figura 5.70. TSC potencial para 28/08/2005.

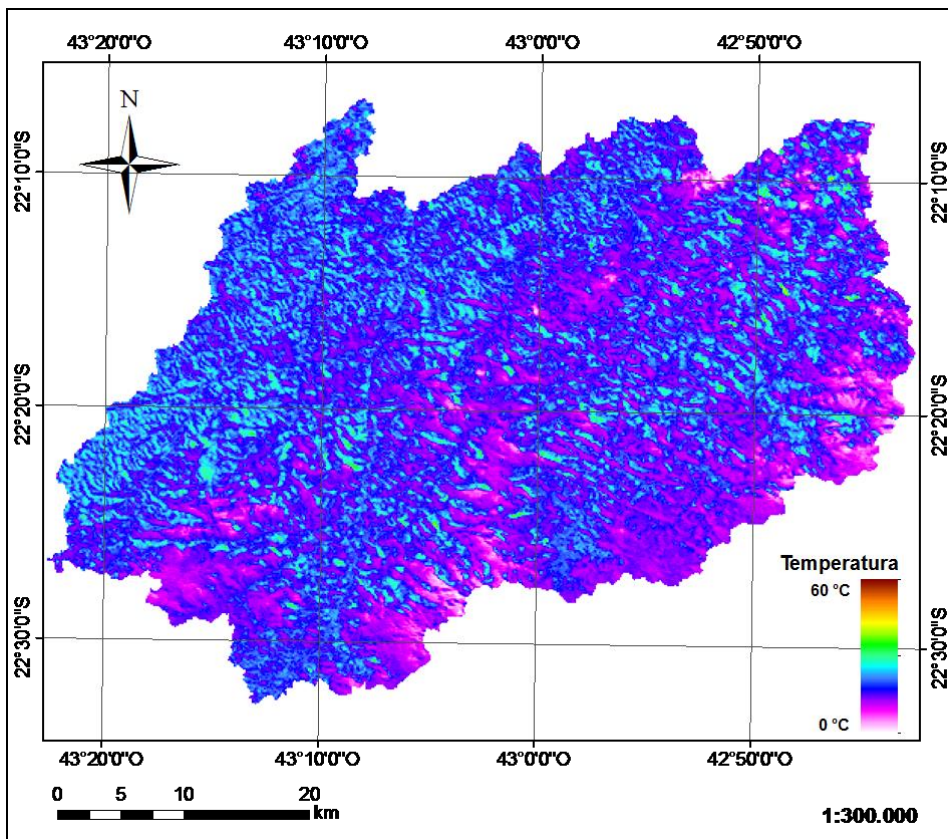


Figura 5.71. TSC potencial para 20/08/2008.

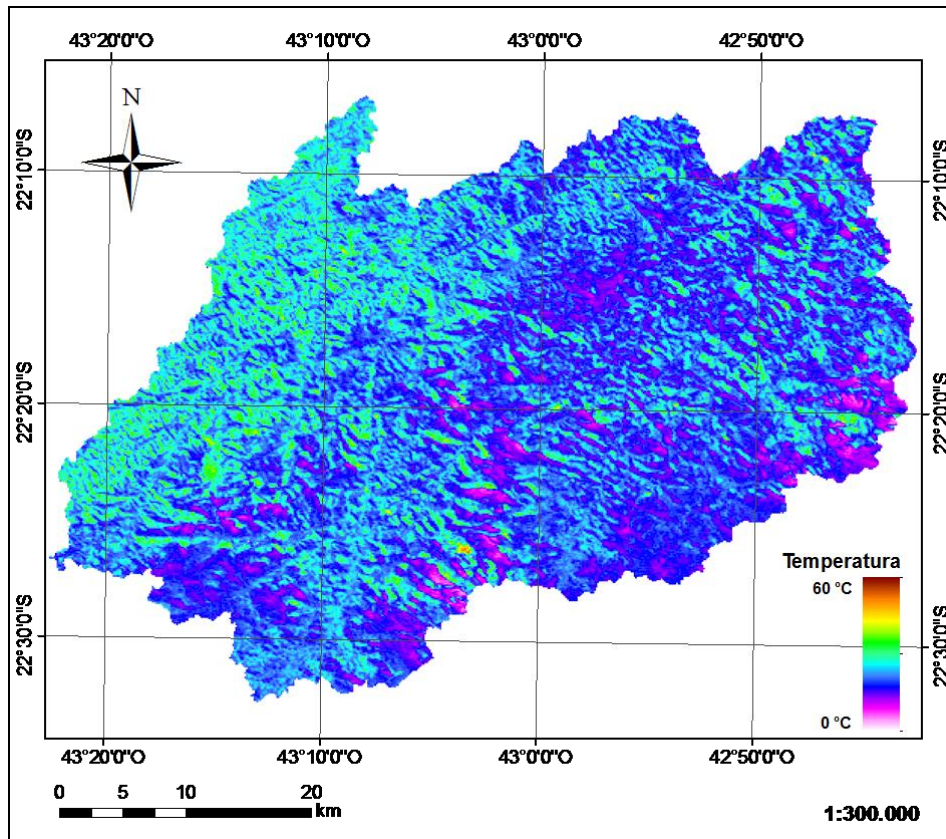


Figura 5.72. TSC potencial para 13/08/2011.

Como é possível observar na Figura 5.73, a correção dos efeitos do relevo tem efeito de aumentar as temperaturas de uma forma geral, fato este observado no deslocamento da curva de temperaturas para a direita. O padrão de distribuição dessas curvas, todavia, não apresenta alterações significativas.

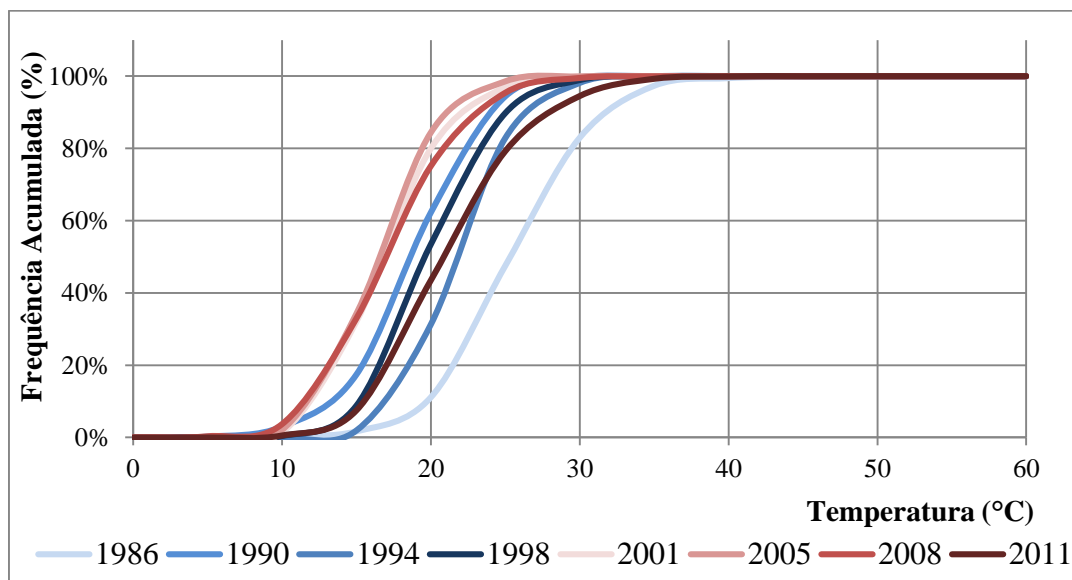


Figura 5.73. Distribuição de frequência acumulada da TSC com correção do relevo.

Na Figura 5.74, observam-se as condições médias dos instantes entre o período 1986 a 1998 em termos da TSC potencial, e na Figura 5.75, para os instantes entre o período de 2001 e 2011. Apesar de ser mantido o padrão de distribuição, o fator de correção, conforme comentado anteriormente, contribui para o aumento das temperaturas.

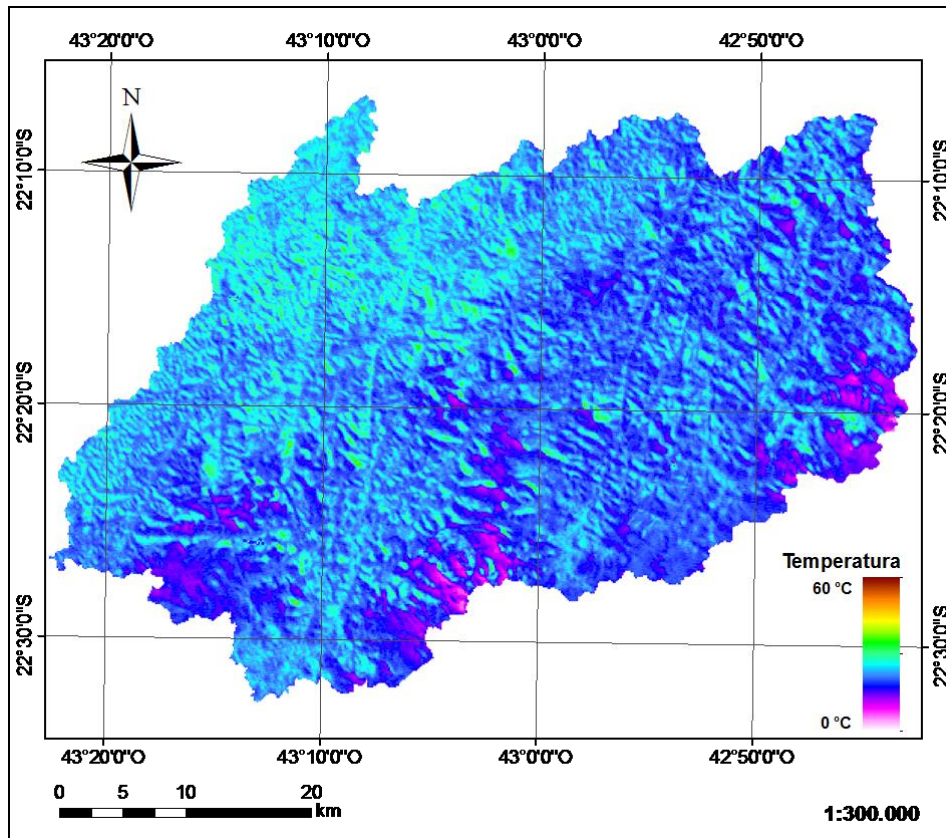


Figura 5.74. Mapa da média da TSC para os anos de 1986, 1990, 1994 e 1998.

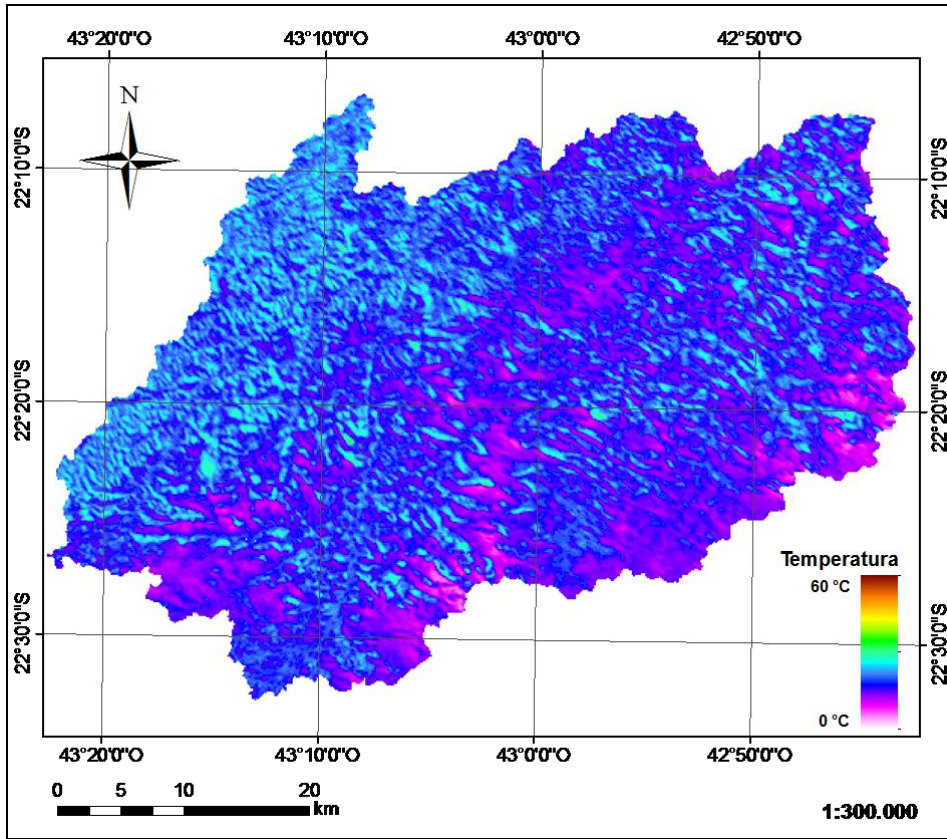


Figura 5.75. Mapa da média da TSC para os anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.

No Figura 5.76, há um deslocamento da curva representativa dos instantes dos anos 2001-2011 para a esquerda, indicando um resfriamento em relação aos momentos do período inicial.

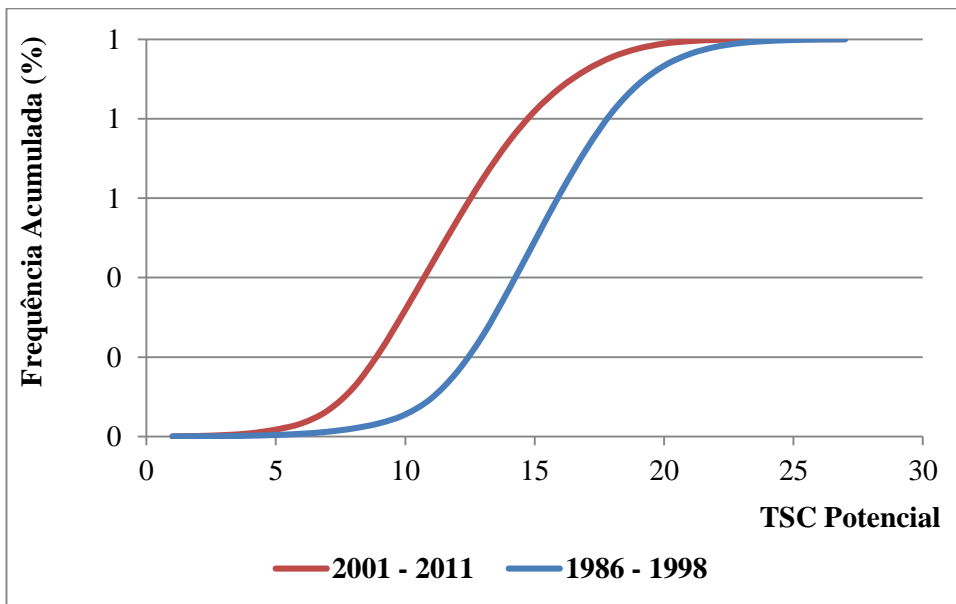


Figura 5.76. Distribuição de frequência acumulada das TSC potenciais médias nos períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Na Tabela 5.5, encontram-se estatísticas referentes à TSC potencial média para os períodos de 1986-1998 e 2001-2011.

Tabela 5.5. Estatísticas da TSC potencial média dos instantes avaliados nos períodos de 1986-1998 e de 2001-2011.

Período	Estatística (°C)			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1986 - 1998	5,71	36,99	21,39	3,46
2001-2011	4,34	33,58	17,97	3,59

A estimativa da TSC apresentada neste item foi selecionada para as aplicações relativas à determinação do índice de umidade superficial e de detecção de mudança pelo indicador de Lambin.

Para o procedimento de avaliação da TSC por diferentes métodos estimativos, também optou-se pela utilização da camada de temperatura com correção dos efeitos atmosféricos e do relevo, por se entender que essas condições mais se aproximam da realidade da superfície, considerando-se sua compatibilização com a estimativa de temperatura a partir das propriedades dos materiais, na qual não são simuladas alterações na temperatura em função do relevo.

5.2.2.4 Avaliação em função da Precipitação

A fim de desenvolver um diagnóstico preliminar sobre a influência da precipitação na TSC observada, foram utilizados dados do satélite TRMM, com informações da precipitação para os 15 dias antecedentes às imagens que basearam a estimativa da TSC nos anos de 2000, 2001, 2005 e 2011. Na Figura 5.77, observa-se a precipitação acumulada.

A análise da TSC permite observar temperaturas decrescentes nos anos de 2011, 2008, 2001 e 2005, nesta ordem, indicados pelo descolamento da curva de frequência acumulada das temperaturas para a esquerda.

Quando contrastadas às informações de precipitação, observa-se a influência de dois fatores na TSC: a ocorrência de picos de precipitação nos dias imediatamente antecedentes e a precipitação acumulada nos 15 dias antecedentes.

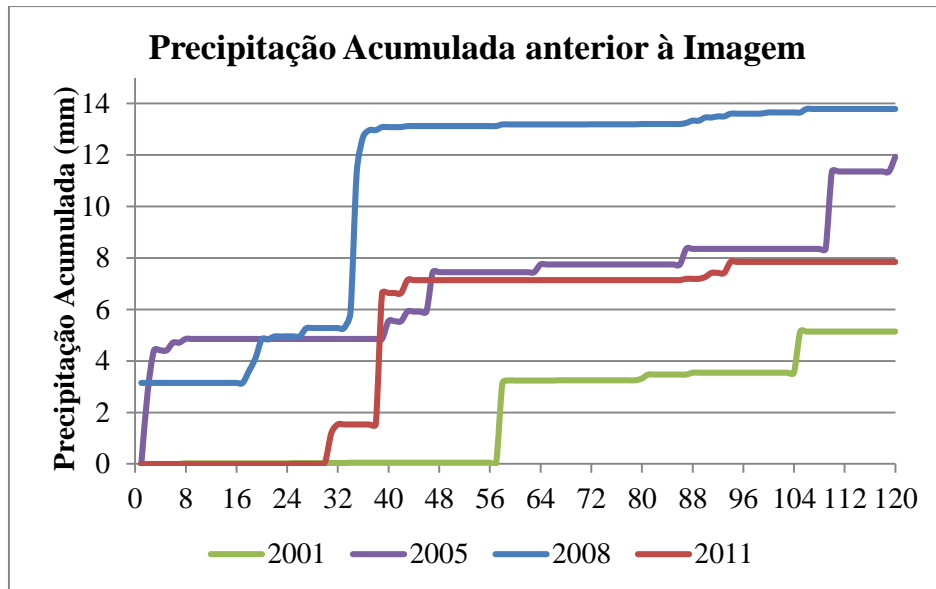


Figura 5.77. Precipitação acumulada nos 15 dias antecedentes às estimativas de TSC das imagens referente aos anos de 2001, 2005, 2008 e 2011.

Nos anos de 2001 e 2005, que apresentaram as menores temperaturas, ocorreram picos de precipitação no 13º e 14º dia. Particularmente em 2005, a precipitação acumulada nos 15 dias antecedentes foi superior ao ano de 2001.

Nos anos de 2008 e 2011, os maiores aumentos na precipitação acumulada ocorrem entre o 4º e o 5º dia, o que revela a não ocorrência de eventos de grande magnitude nos dias imediatamente antecedentes ao das imagens que basearam a estimativa da TSC. O ano de 2008, todavia, foi o que apresentou maior precipitação acumulada, o que influencia na redução da temperatura quando comparada ao ano de 2011.

5.2.3 Índice de Umidade da Superfície (IUS)

O IUS foi obtido conforme o exposto na metodologia, com base nos valores do índice de vegetação por diferença normalizada e da temperatura superficial continental com correções relativas aos efeitos atmosféricos e do relevo. Foi obtido, dessa forma, o gráfico de dispersão NDVI versus TSC referente a cada ano, a partir dos quais obteve-se o ajuste das retas relativas aos limites seco e úmido, expostos da Figura 5.78 à Figura 5.85.

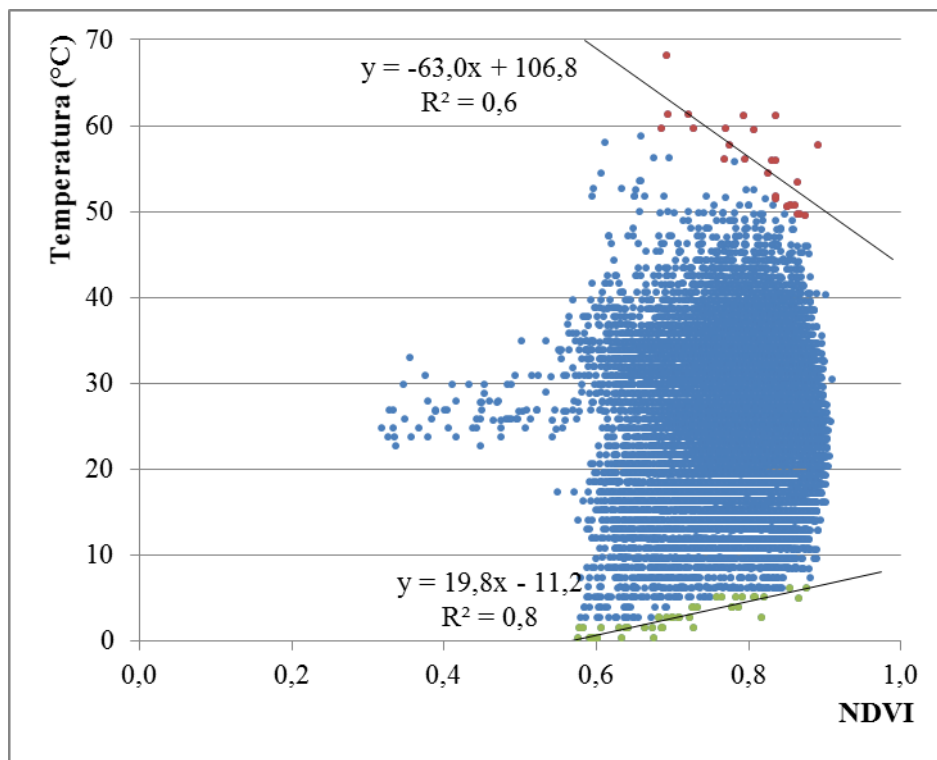


Figura 5.78. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1986 e ajustes dos limites seco e úmido.

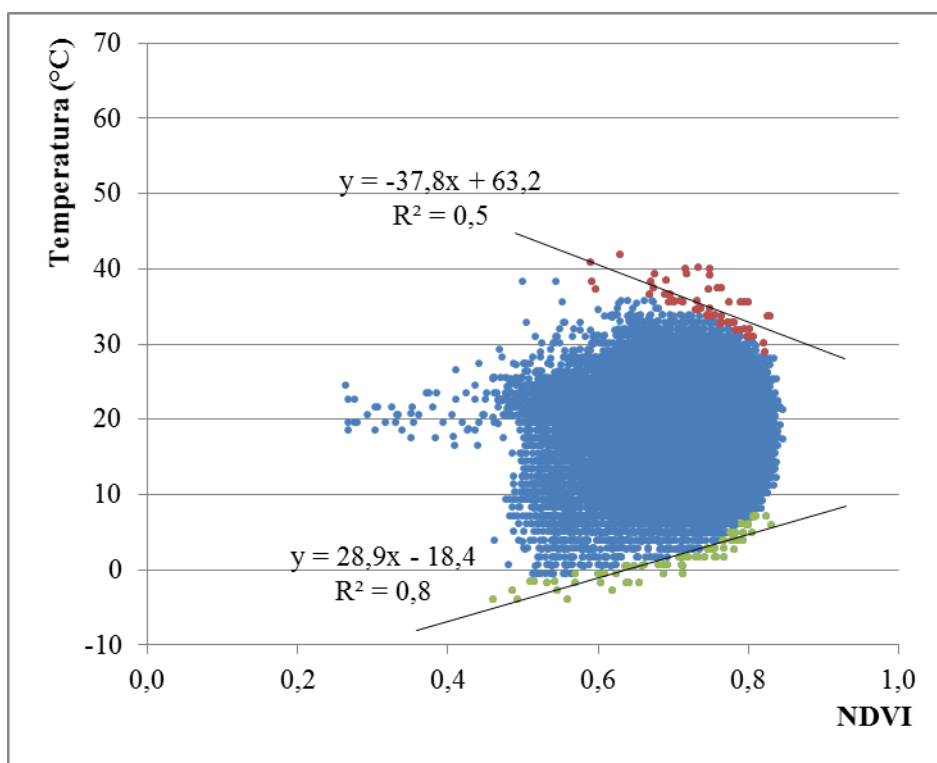


Figura 5.79. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1990 e ajustes dos limites seco e úmido.

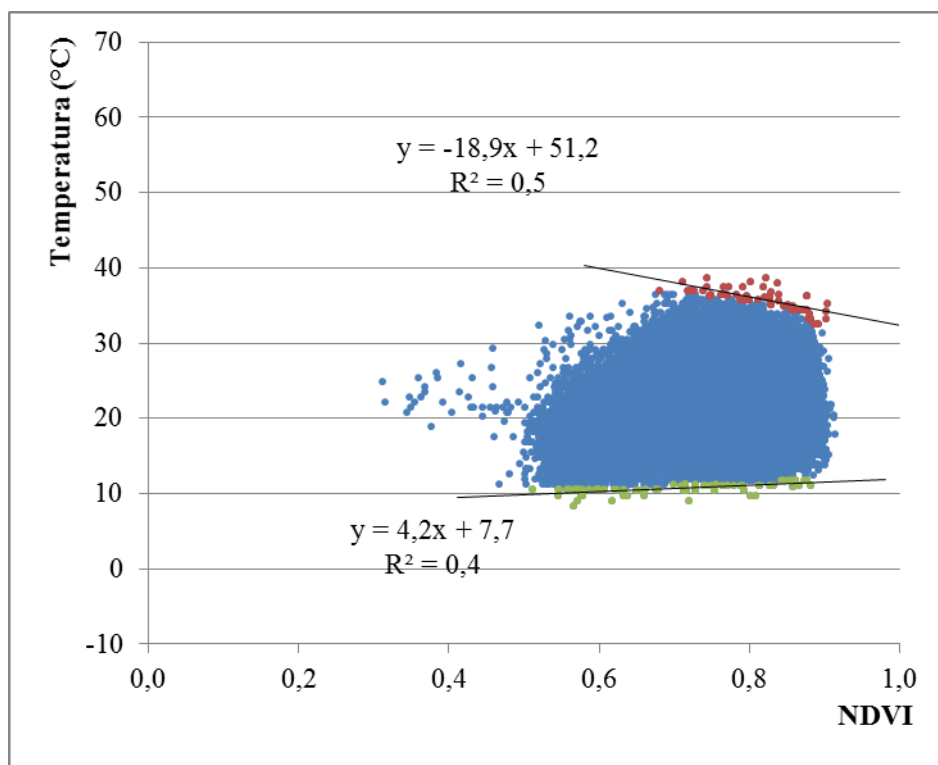


Figura 5.80. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1994 e ajustes dos limites seco e úmido.

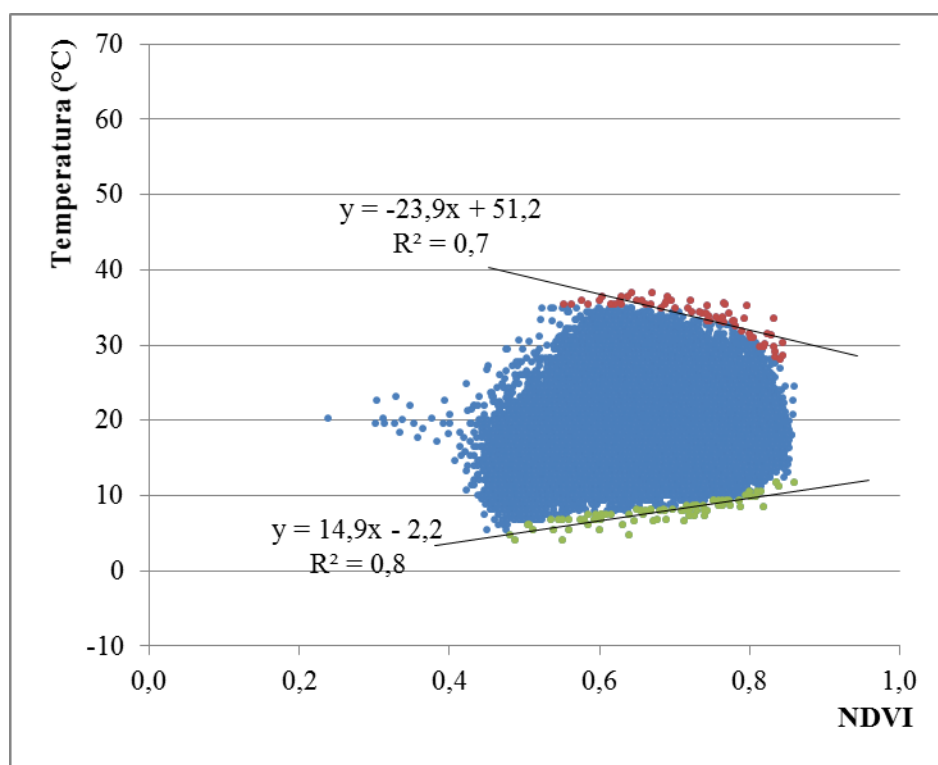


Figura 5.81. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 1998 e ajustes dos limites seco e úmido.

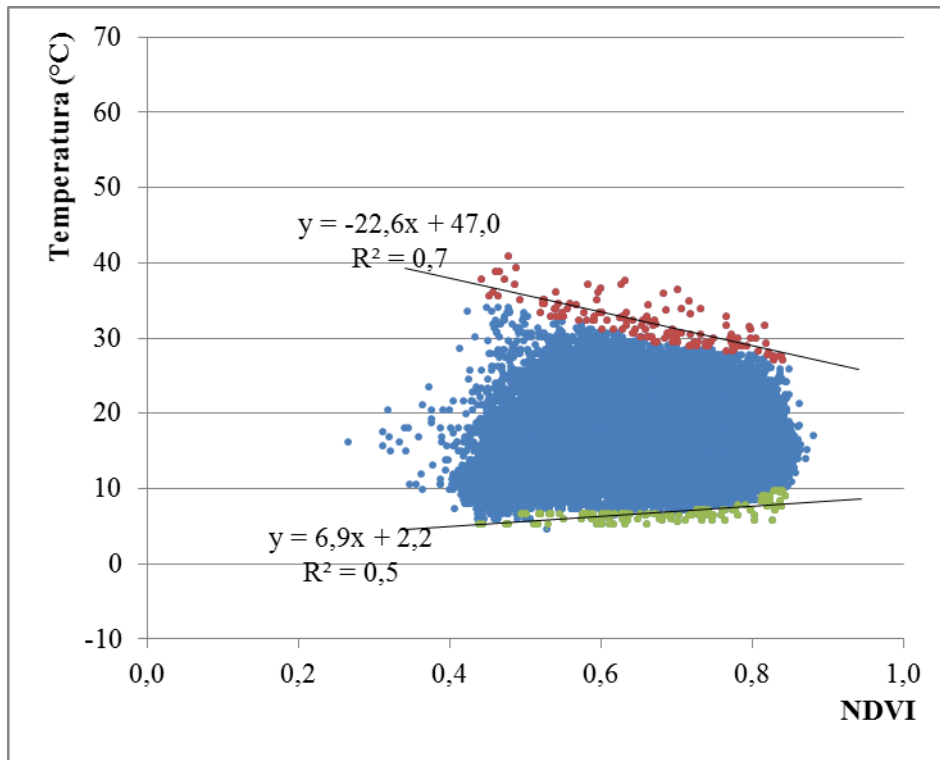


Figura 5.82. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2001 e ajustes dos limites seco e úmido.

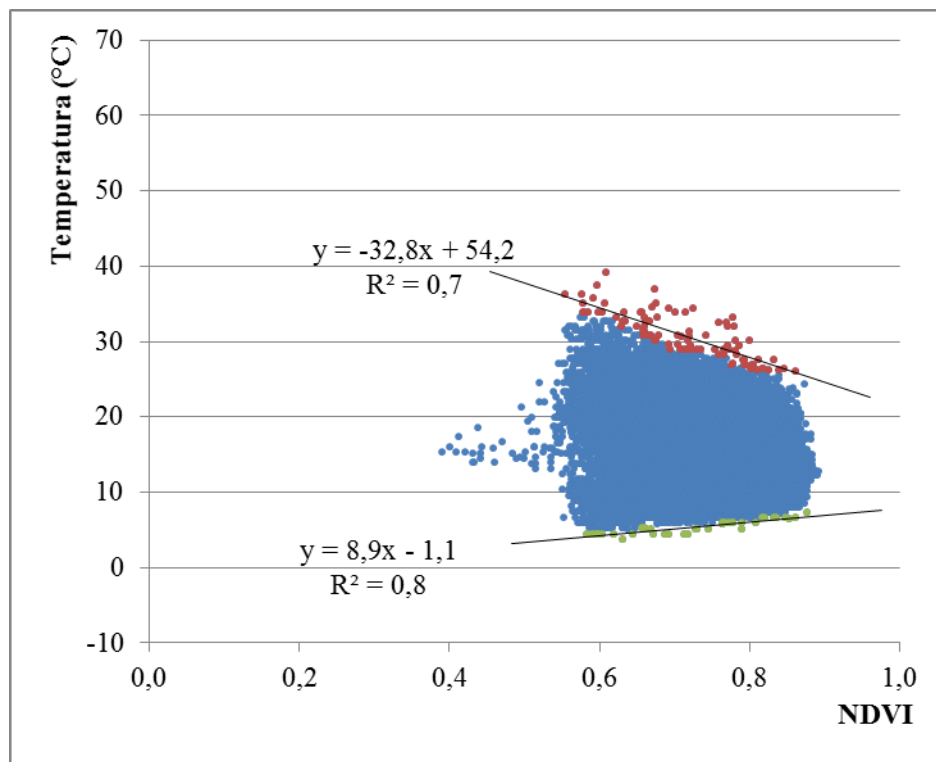


Figura 5.83. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2005 e ajustes dos limites seco e úmido.

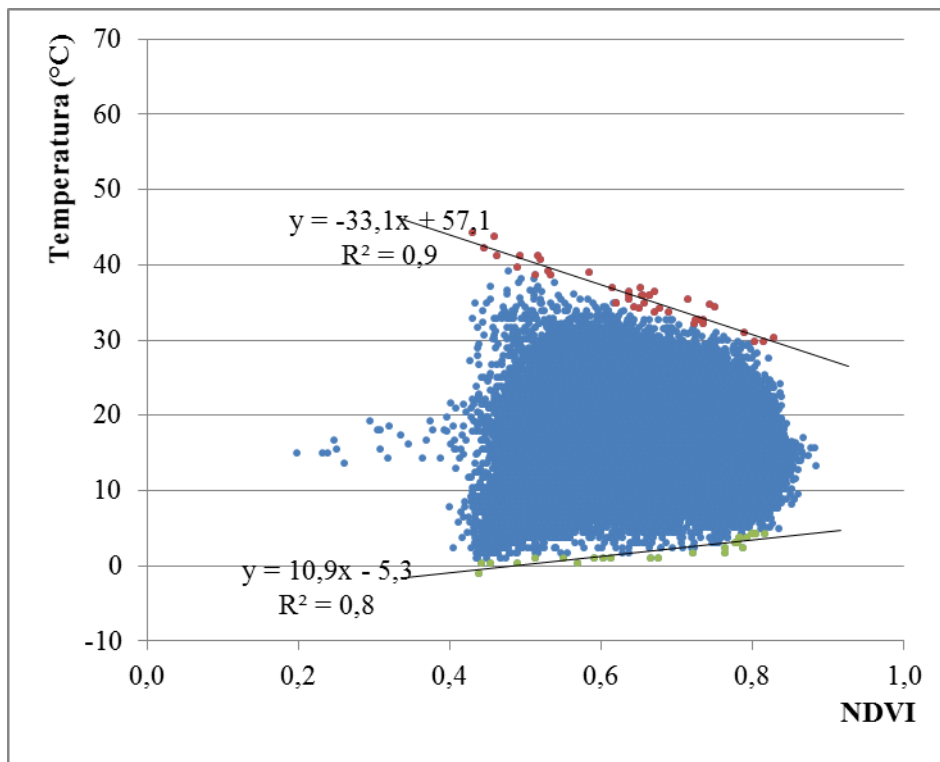


Figura 5.84. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2008 e ajustes dos limites seco e úmido.

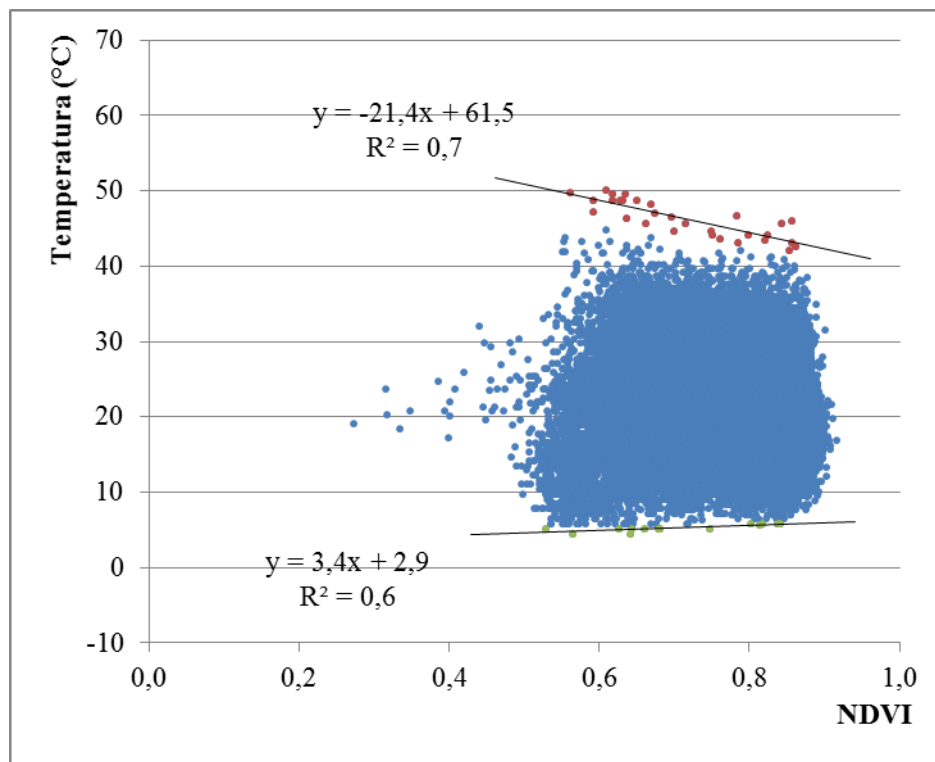


Figura 5.85. Diagrama de dispersão NDVI versus TSC na bacia do Rio Piabanha para o ano de 2011 e ajustes dos limites seco e úmido.

As retas relativas aos limites seco e úmido são representadas, respectivamente, pelos limites superior e inferior. Os coeficientes angular (ai e as) e linear (bi e bs) das retas encontram-se apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Coeficientes das retas dos limites seco e úmido para cada imagem.

Ano	Limite Úmido		Limite Seco	
	ai	bi	as	bs
1986	19,8	-11,2	-63	106,8
1990	28,9	-18,4	-37,8	63,2
1994	4,2	7,7	-18,9	51,2
1998	14,9	-2,2	-23,9	51,2
2001	6,9	2,2	-22,6	47
2005	8,9	-1,1	-32,8	54,2
2008	10,9	-5,3	-33,1	57,1
2011	3,4	2,9	-21,4	61,5

De posse dos coeficientes das retas dos limites seco e úmido, foi possível obter, conforme descrito anteriormente pela Equação 3.26 (página 42), a equação que descreve o IUS para cada uma das imagens analisadas. As equações obtidas encontram-se expostas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Equações do IUS para cada imagem avaliada.

Ano	Equações do Índice de Umidade do Solo
1986	$IUS_{1986} = \frac{-63,0 \times NDVI_{1986} + 106,8 - TSC_{1986}}{-82,8 \times NDVI_{1986} + 118,0}$
1990	$IUS_{1990} = \frac{-37,8 \times NDVI_{1990} + 63,2 - TSC_{1990}}{-66,7 \times NDVI_{1990} + 81,6}$
1994	$IUS_{1994} = \frac{-18,9 \times NDVI_{1994} + 51,2 - TSC_{1994}}{-23,1 \times NDVI_{1994} + 43,5}$
1998	$IUS_{1998} = \frac{-23,9 \times NDVI_{1998} + 51,2 - TSC_{1998}}{-38,8 \times NDVI_{1998} + 53,4}$
2001	$IUS_{2001} = \frac{-22,6 \times NDVI_{2001} + 47,0 - TSC_{2001}}{-29,5 \times NDVI_{2001} + 44,8}$
2005	$IUS_{2005} = \frac{-32,8 \times NDVI_{2005} + 54,2 - TSC_{2005}}{-41,7 \times NDVI_{2005} + 55,3}$
2008	$IUS_{2008} = \frac{-33,1 \times NDVI_{2008} + 57,1 - TSC_{2008}}{-44,0 \times NDVI_{2008} + 62,4}$
2011	$IUS_{2011} = \frac{-21,4 \times NDVI_{2011} + 61,5 - TSC_{2011}}{-24,8 \times NDVI_{2011} + 58,6}$

A partir das equações expostas, foram gerados mapas de IUS, apresentados da Figura 5.86 à Figura 5.93.

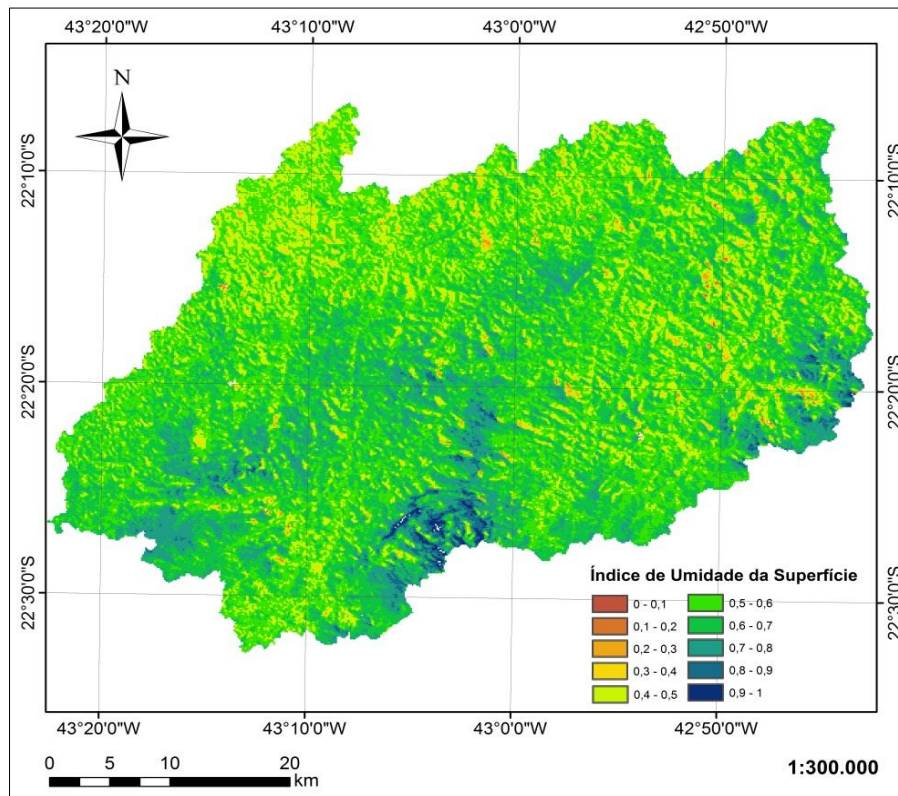


Figura 5.86. Mapa do IUS para 19/03/1986.

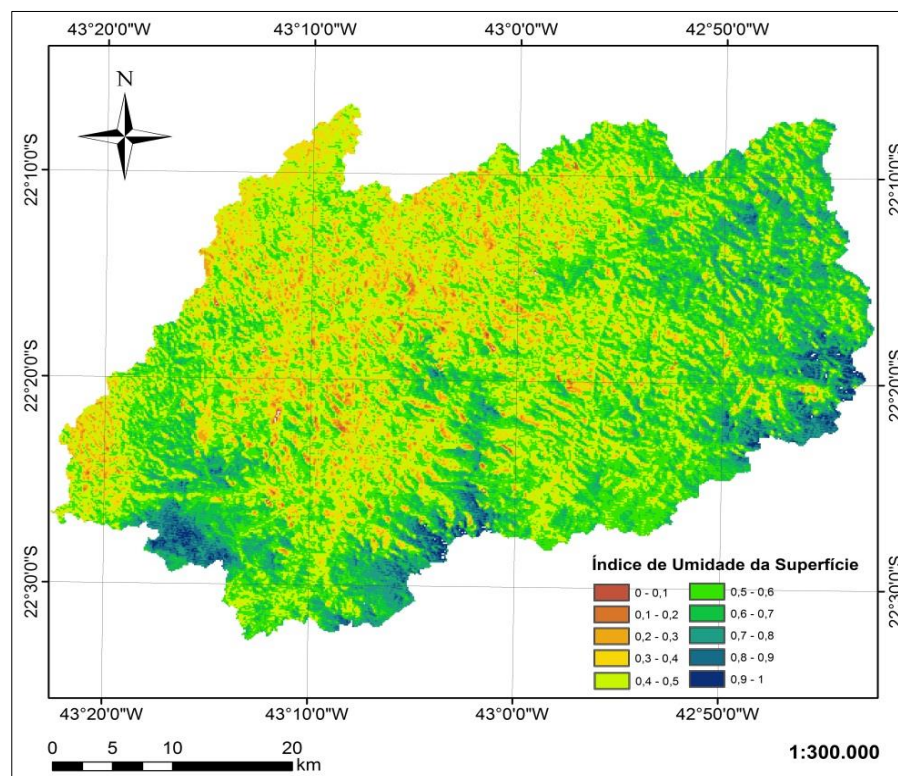


Figura 5.87. Mapa do IUS para 28/03/1990.

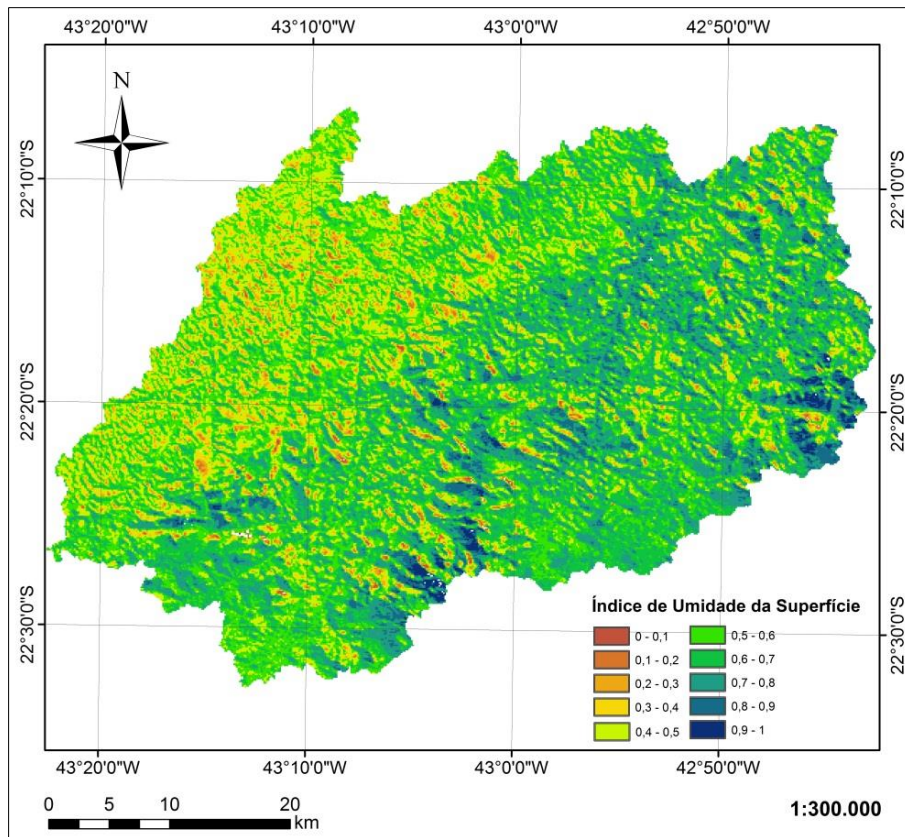


Figura 5.88. Mapa do IUS para 29/07/1994.

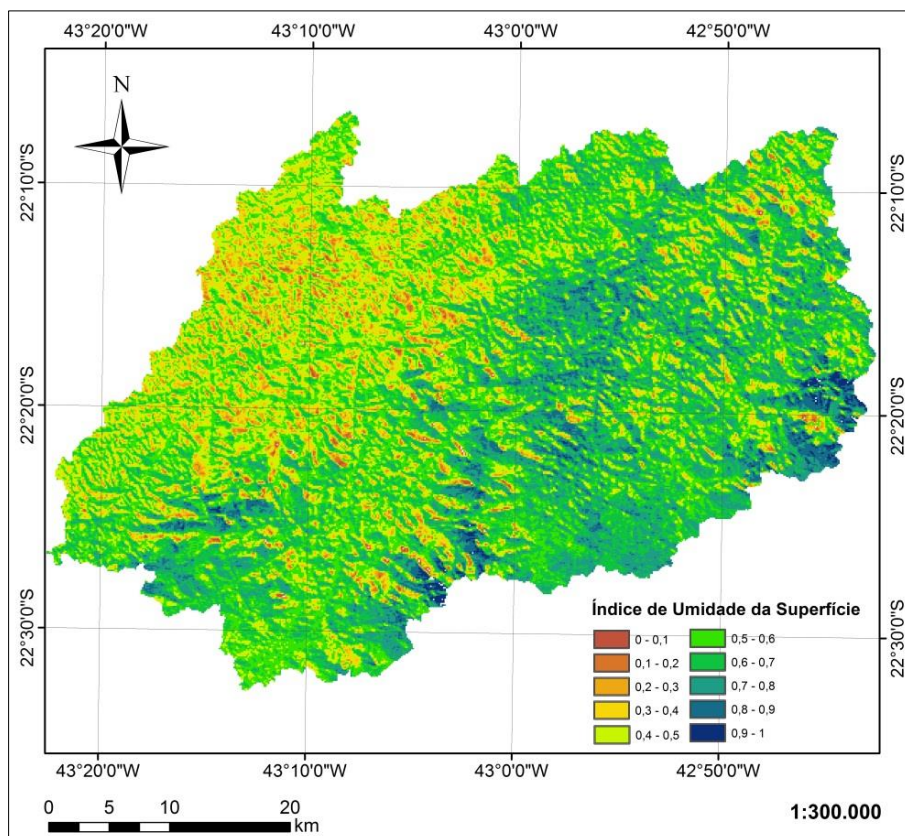


Figura 5.89. Mapa do IUS para 08/07/1998.

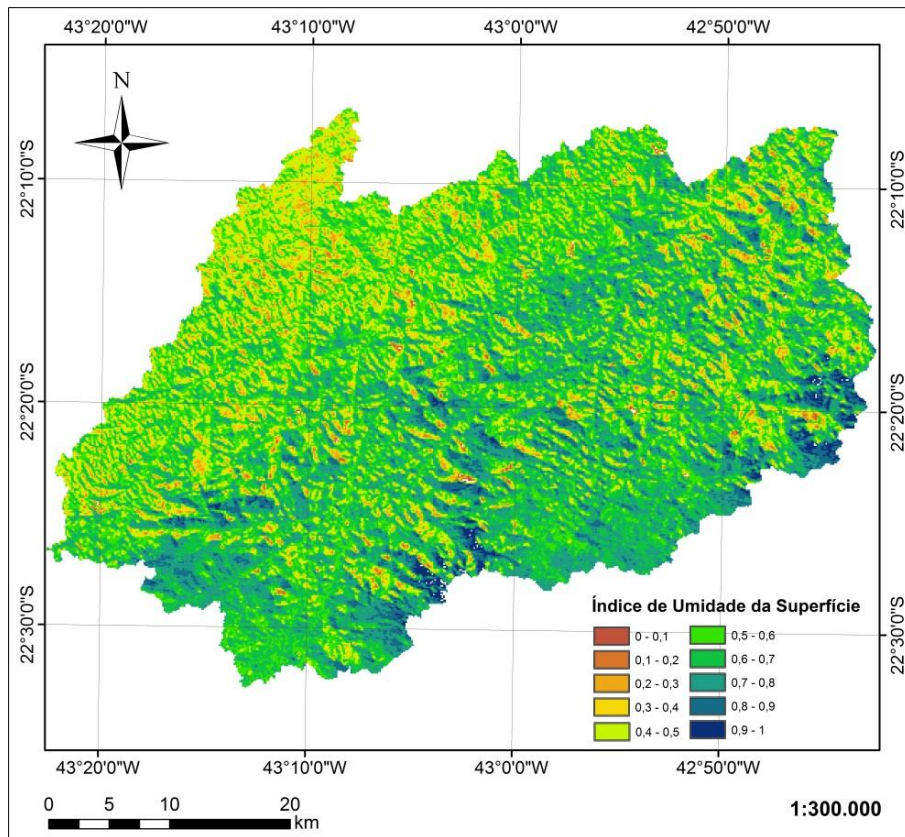


Figura 5.90. Mapa do IUS para 01/08/2001.

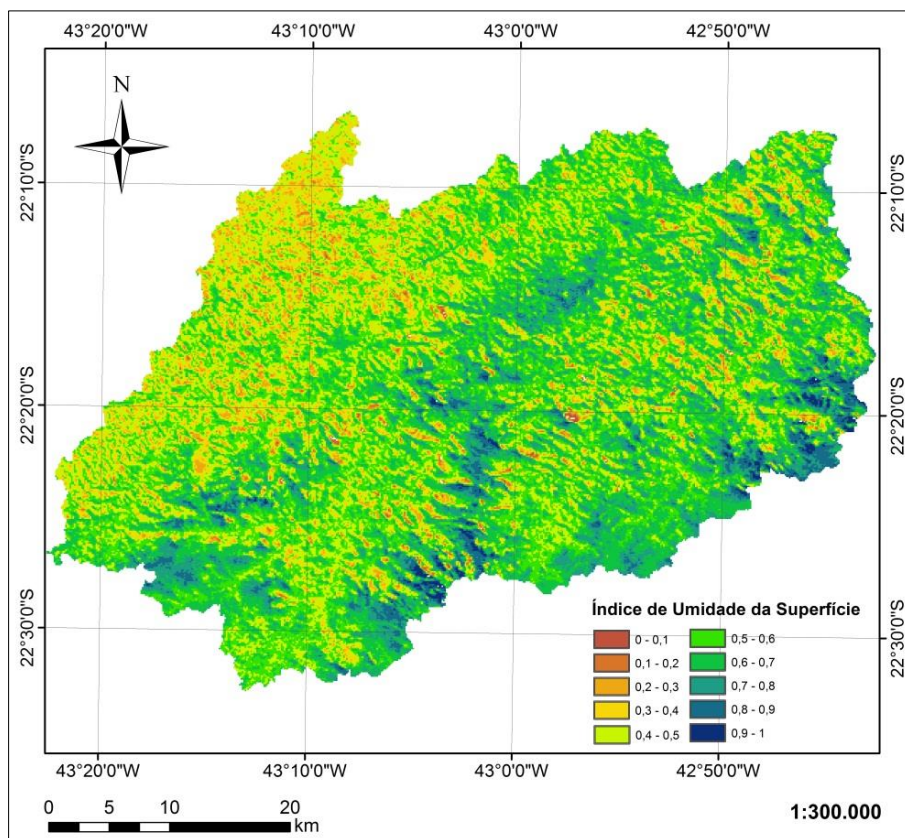


Figura 5.91. Mapa do IUS para 28/08/2005.

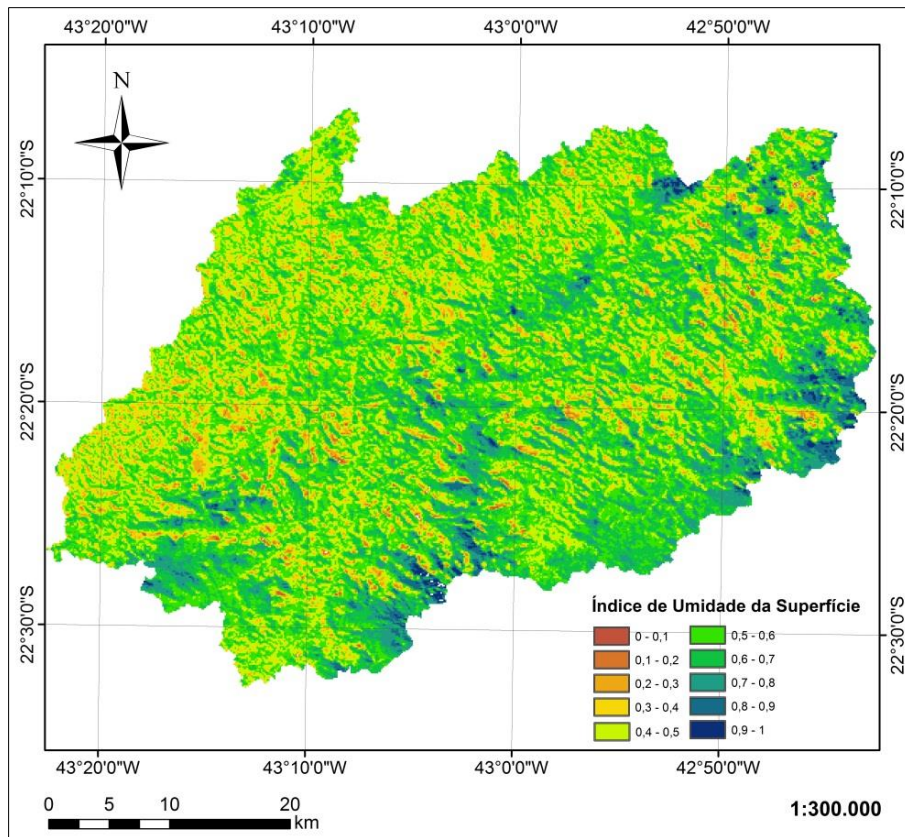


Figura 5.92. Mapa do IUS para 20/08/2008.

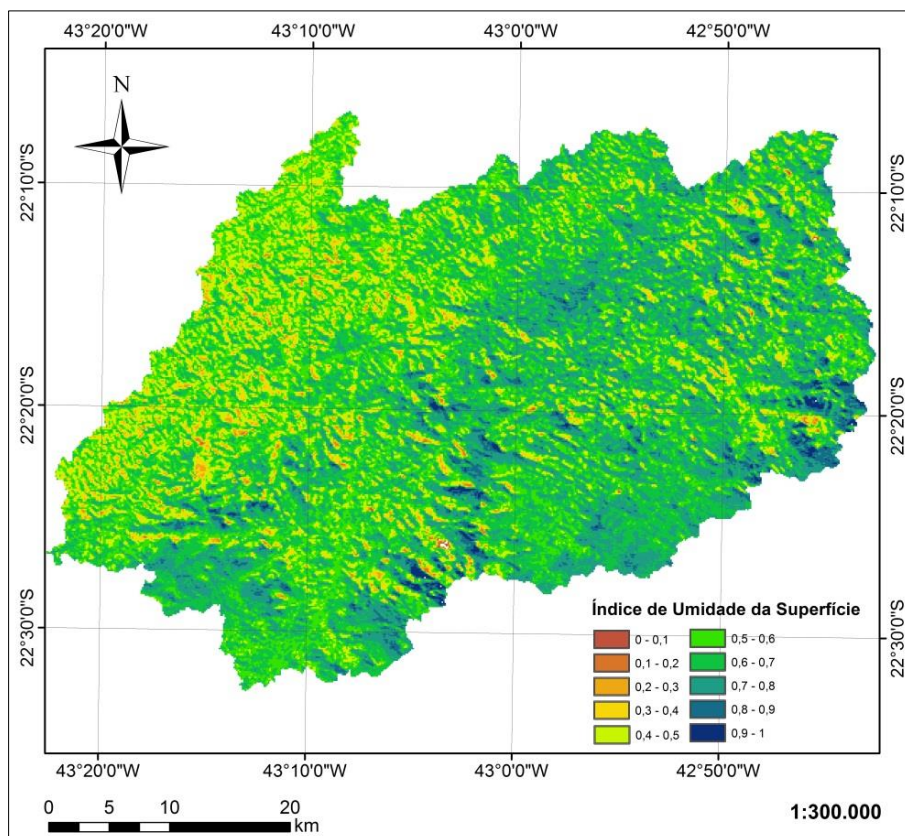


Figura 5.93. Mapa do IUS para 13/08/2011.

5.2.4 Detecção de Mudança

Inicialmente, foi realizada a detecção de mudanças na bacia experimental do rio Piabanha a partir da imagem-diferença baseado no índice de vegetação por diferença normalizada, conforme metodologia descrita no Capítulo 3.

Foram geradas sete imagens-diferença, que relacionam os anos de 1990-1986, 1994-1990, 1998-1994, 2001-1998, 2005-2001, 2008-2005 e 2011-2008, gerando uma informação de mudança do tipo “de-para”.

Observou-se que não ocorreram, em quaisquer dos períodos, mudanças, positivas ou negativas, superiores a 50%. Dessa forma, a classificação inicial das imagens-diferença contou com intervalos de 5%, com limite do caudal superior igual a 50% de mudança positiva, e limite inferior de -50% de mudança negativa no valor do NDVI no píxel, totalizando 21 classes de mudanças.

Para melhorar a capacidade de interpretação visual dos mapas e facilitar a classificação na fase qualitativa, foi aplicado o tratamento de majoridade. Na Figura 5.94, é apresentado, a fim de ilustrar os resultados desse tratamento, o detalhe da imagem diferença de 2011-2008, onde é possível observar, à esquerda, a classificação original e, à direita, a classificação tratada.

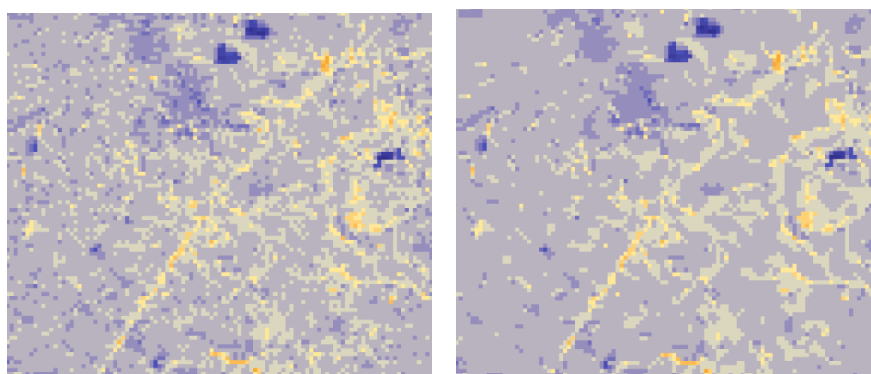


Figura 5.94. Tratamento da classificação da imagem-diferença de 2011-2008.

Após o tratamento das imagens-diferenças, os mapas representativos das mudanças foram reclassificados de acordo com as classes sintéticas: foi adotado o índice -2 para alterações de magnitude inferior a -20%, caracterizadas como “alta diminuição”; -1 para mudanças de magnitude entre -20 e -10%, definidas como “diminuição”; 0 para mudanças pouco significativas entre -10 e 10%, consideradas como “sem mudanças”; 1 para alterações de magnitude entre 10 e 20%, definidas como

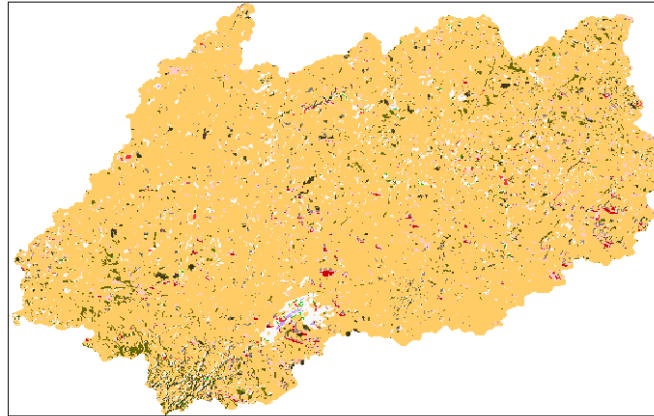
“crescimento”; e, por fim, 2 para mudanças superiores a 20%, caracterizadas como “alto crescimento”. De posse dos mapas temáticos de mudança, foi possível, de acordo com o procedimento descrito na metodologia, obter os mapas temáticos de tendência de mudança.

Os mapas resultantes podem ser observados da Figura 5.95 à Figura 5.97, onde é possível detectar as mudanças ocorridas não apenas espacialmente, mas também qualitativamente. Esse mapeamento permite a distinção clara dos processos de mudança predominantes na bacia em cada período avaliado.

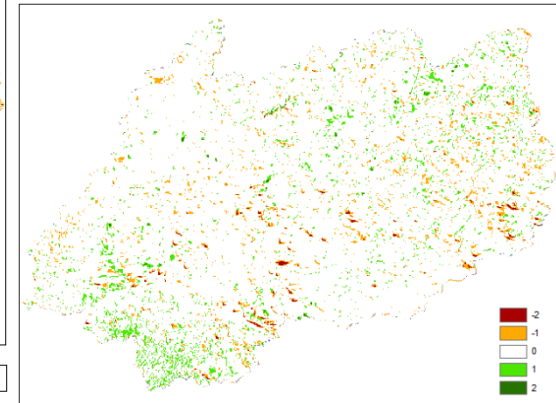
As imagens à direita e à esquerda representam os mapas temáticos de mudança, enquanto que as imagens ao centro ilustram os mapas temáticos de tendência de mudanças entre os períodos avaliados, onde cada um dos números listados, representados por cores distintas, indica uma classe de tendência de mudança, conforme mostrado na Tabela 3.4.

Esse diagnóstico é importante para a compreensão do comportamento da biomassa fotossintetizante ao longo do tempo em escala regional bem como na inferência da intensidade dos processos físicos, de origem natural ou antrópica, aos quais se encontra submetida a bacia.

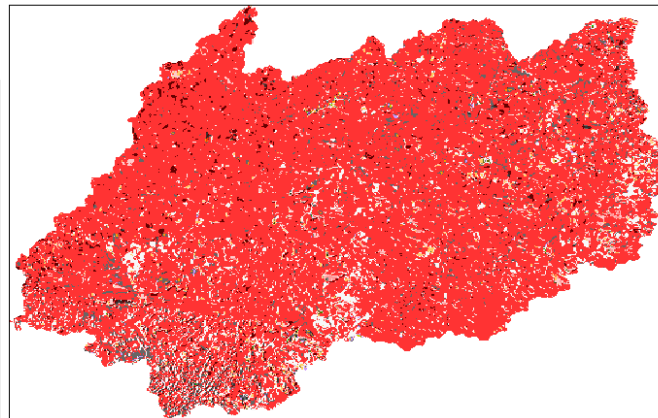
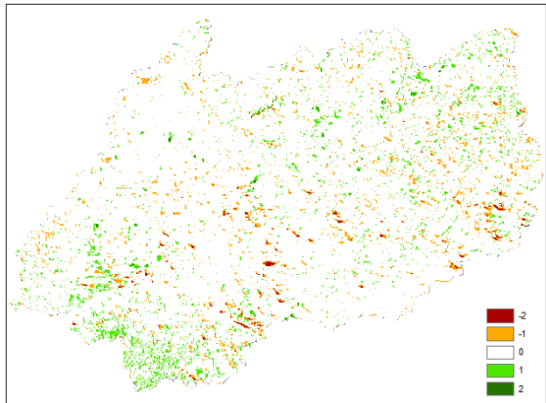
1990-1986



1994-1990



1994-1990



1998-1994

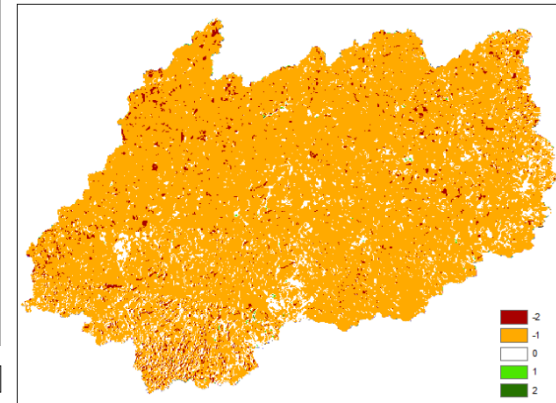


Figura 5.95. Mapas de mudança no NDVI (1990-1986, 1994-1990 e 1998-1994), à direita e à esquerda, e mapa de tendência entre as mudanças indicadas, ao centro.

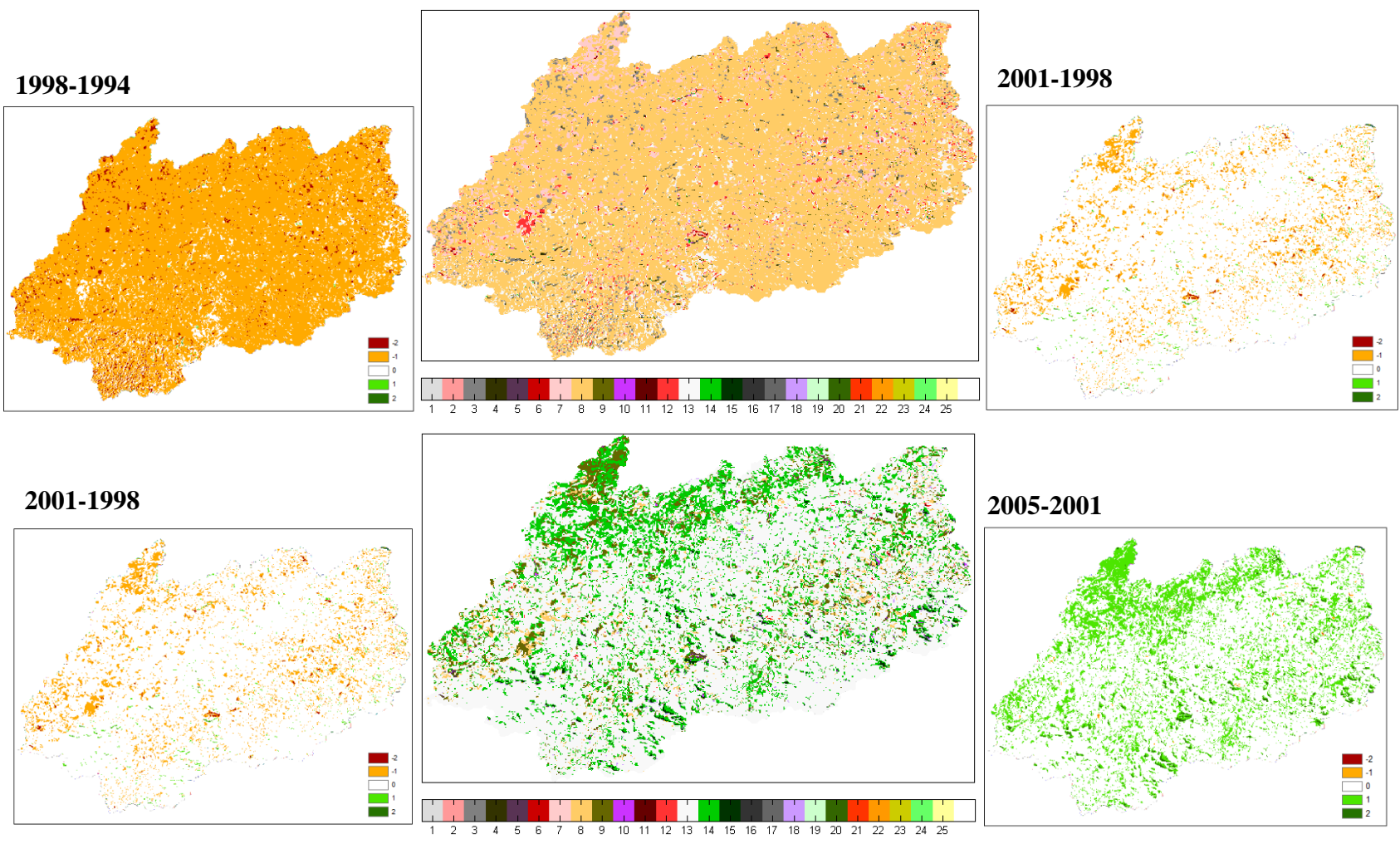


Figura 5.96. Mapas de mudança no NDVI (1998-1994, 2001-1998 e 2005-2001), à direita e à esquerda, e mapa de tendência entre as mudanças indicadas, ao centro.

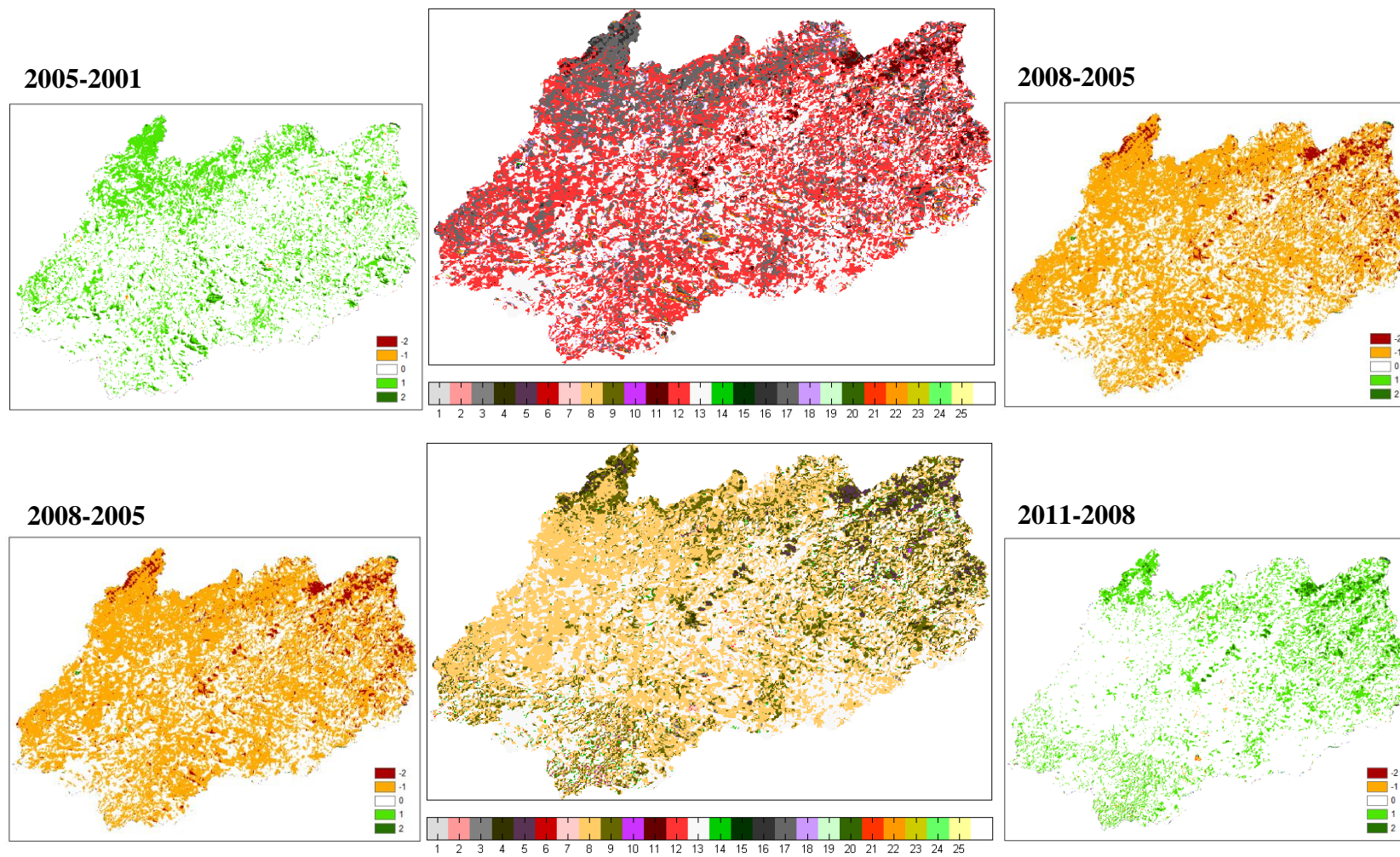


Figura 5.97. Mapas de mudança no NDVI (2005-2001, 2008-2005 e 2011-2008), à direita e à esquerda, e mapa de tendência entre as mudanças indicadas, ao centro.

Os índices apresentados nas imagens correspondem às classes sintéticas de mudanças, apresentadas na Tabela 3.3, e das classes sintéticas de tendência de mudanças, apresentadas na Tabela 3.4.

Observa-se que a classe de mudança predominante entre os anos de 1986 e 1990 é a “diminuição” do índice de vegetação. No período entre 1990 e 1994, observam-se pequenas manchas de “crescimento”, todavia a classe predominante é a de “sem mudanças”. A tendência de mudança predominante entre os períodos avaliados é de cobertura “decomposta”.

Para o período entre os anos de 1994 e 1998, observa-se novamente uma predominância de alterações no sentido da “diminuição” do vigor vegetativo. A tendência de mudanças quando comparada ao período 1994-1990 é, dessa forma, avaliado como “diminuição” predominante.

No período entre os anos de 1998 e 2001, a predominância em termos de mudança situa a bacia na classe “sem mudança”. Sendo assim, a tendência de mudança em relação ao período anterior é novamente de superfície já “decomposta”.

Entre os anos de 2001 e 2005, a bacia passa por um período onde há predominância de “crescimento”, associado a áreas “sem mudança” significativa. A tendência em relação ao período imediatamente anterior passa a ser, respectivamente, de “crescimento” e de uma condição “estável” de mudança.

No intervalo entre os anos de 2005 e 2008, todavia, observa-se uma “diminuição” generalizada do índice de vegetação. Quando contrastada com o período anterior, é possível destacar duas linhas na tendência de mudanças: uma delas associa-se a “desvegetação” da bacia e outra na “diminuição” de seu vigor vegetativo.

Entre 2008 e 2011, as mudanças observadas foram semelhantes a do período 2005-2001: predominam o “crescimento” associado a áreas “sem mudança”. Dessa forma, em comparação com o período anterior, as tendências de mudança predominantes foram de “revegetação” e de manutenção de superfície “decomposta”.

O estudo de detecção de mudanças baseado no indicador temperatura-índice de vegetação foi desenvolvido conforme descrito na metodologia. Para a classificação preliminar das imagens-diferença, foram observados os histogramas na Figura 5.98.

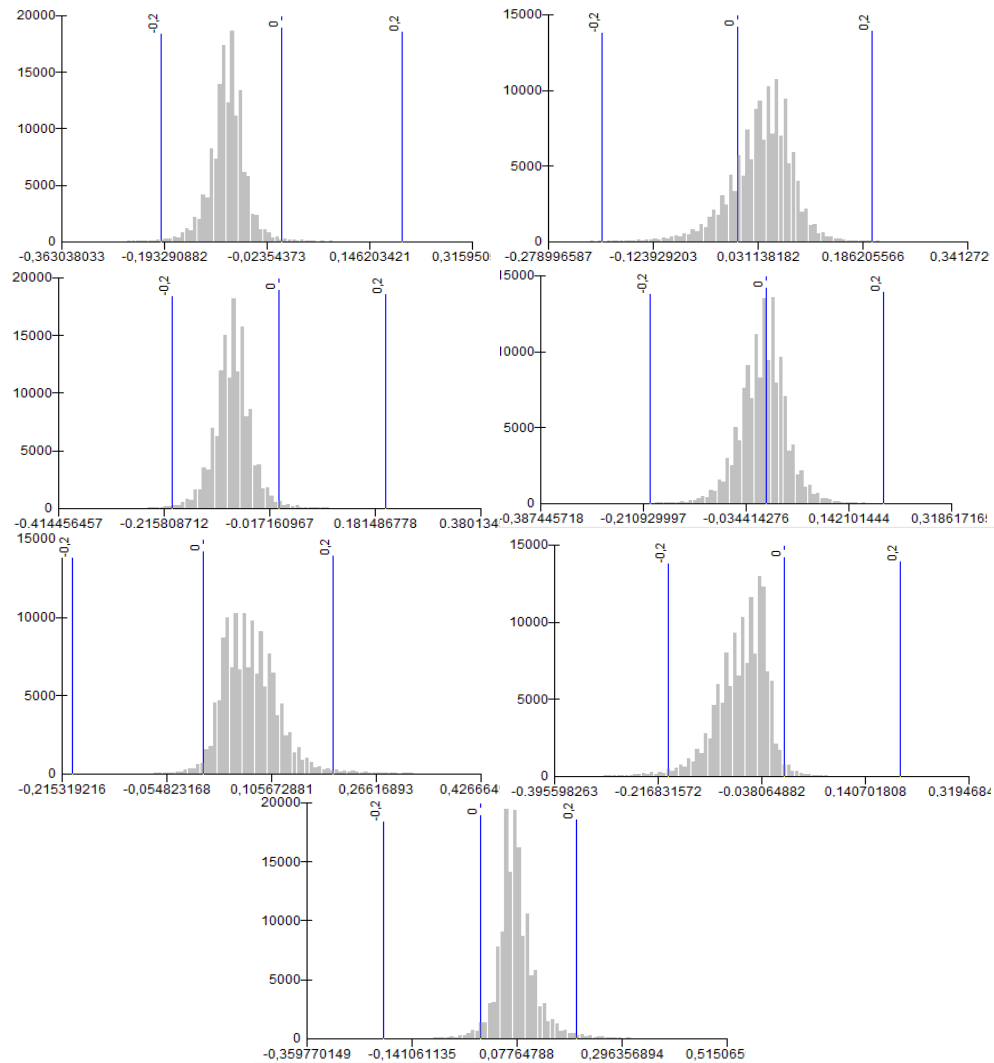


Figura 5.98. Histograma das imagens-diferença baseadas no indicador temperatura-índice de vegetação nos períodos 1990-1986, 1994-1990, 1998-1994 e 2001-1998.

Não houve mudanças positivas ou negativas superiores a 60%. Fica clara predominância de mudanças positivas e negativas de magnitudes até 20%. Dessa forma, foram criadas as duas classes extremas -60% a -20% e 20% a 60%. Os demais valores foram agrupados em classes a cada 1% de mudança, totalizando 42 classes. Após a análise de maioria, realizada de forma análoga à anteriormente descrita para a avaliação do NDVI, as mudanças detectadas a partir do indicador temperatura-índice de vegetação foram agrupadas em cinco classes sintéticas, representativas das condições de estresse da região. A espacialização desse indicador de mudança encontra-se exposto na Figura 5.99.

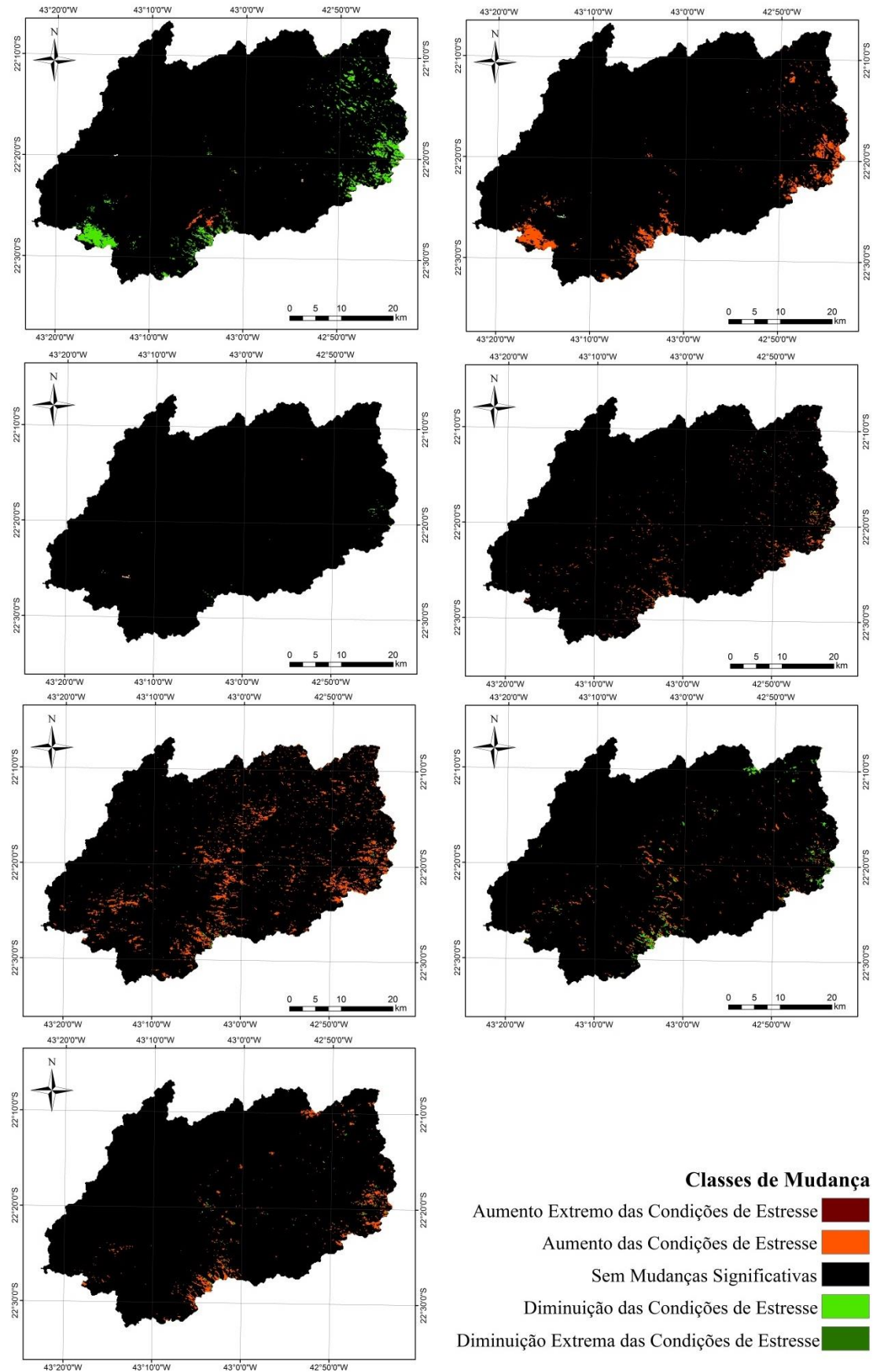


Figura 5.99. Imagens-diferença do indicador temperatura-índice de vegetação, respectivamente entre os anos 1990-1986, 1994-1990, 1998-1994, 2001-1998, 2005-2001, 2008-2005 e 2011-2008.

O primeiro mapa temático mostra as alterações sofridas no período entre 1986 e 1990, onde a análise simultânea das condições de temperatura e vigor vegetativo permitiu detectar uma diminuição das condições de estresse, com destaque ao limite leste da bacia e pequena parcela da região noroeste e do limite sul. Sobrepondo-se essa informação ao mapa de uso e ocupação de solo, observa-se que essas mudanças ocorrem predominantemente nas áreas de floresta.

O segundo mapa, representativo das mudanças entre os anos de 1994 e 1990, mantém a distribuição espacial de mudanças do ano anterior, todavia a tendência passa a ser negativa, ocorrendo um aumento das condições de estresse. As mudanças entre os anos de 1998 e 1994 não se mostram significativas, conforme indicado no terceiro mapa apresentado. O quarto mapa representa as mudanças entre os anos de 2001 e 1998, no qual é possível observar uma maior distribuição espacial no aumento das condições de estresse. Entre os anos de 2005 e 2001, no quinto mapa, observam-se mudanças mais intensas e espacialmente distribuídas, também na tendência de intensificação das condições de estresse.

No sexto mapa, representativo das mudanças entre os anos de 2008 e 2005, ocorrem tanto a redução quanto o aumento das condições de estresse, sendo esse mais presente em maior escala que aquele. Há também o processo de redução da intensidade dessas alterações.

O último mapa, que indica as mudanças entre os anos de 2008 e 2011, mantém a forma como as mudanças estão distribuídas espacialmente, todavia há uma predominância no aumento das condições de estresse.

Em suma, a bacia não apresenta mudanças significativas, com destaque para as áreas de urbanização consolidada, visto que a composição dessas regiões conta com materiais que não apresentam retenção de umidade quando comparada a regiões vegetadas, havendo ainda uma constância no índice de vegetação. Destaca-se ainda que as mudanças ao longo do tempo são predominantemente negativas, havendo um aumento nas condições de estresse.

5.3 Avaliação da Temperatura na Bacia do Rio Quitandinha a partir das Propriedades dos Materiais Urbanos

Neste item, é desenvolvida uma avaliação da estimativa da TSC obtida por dados de sensoriamento, a partir da abordagem que leva em consideração as propriedades físicas dos materiais.

Considerando as limitações inerentes da diferença entre as escalas espaciais de informações, foram feitos ajustes de forma a permitir a comparação entre elas.

5.3.1 Estimativa da TSC a partir das Propriedades dos Materiais

Inicialmente, foi realizada a classificação da imagem do satélite Quickbird da região da sub-bacia do rio Quitandinha, de forma a possibilitar a espacialização dos valores de temperatura de cada material constituinte da paisagem.

A classificação da imagem da área de estudo levou em consideração a presença de oito tipos de superfície. Das superfícies classificadas como artificiais, encontram-se: concreto, asfalto, cerâmica e fibrocimento. As superfícies naturais foram consideradas: rocha, solo exposto, gramíneas e florestas.

Não foi realizada distinção entre materiais novos e antigos, devido à grande heterogeneidade da cena e dificuldade de identificação de características dos materiais com o nível de detalhe suficiente para uma classificação acurada. Adicionalmente, foram incluídos, aos píxeis não classificados, todos aqueles referentes à classe água, de forma a evitar sua incorreta inserção em outras classes de materiais.

Foram obtidas amostras para cada uma das classes, a fim de definir sua assinatura espectral. Em seguida, foi utilizado o método da máxima verossimilhança para classificação da imagem. A fração de rejeição adotada foi de 1%, o que indica a quantidade de píxeis com menor possibilidade de enquadramento em alguma das classes que permanecerão não classificados, aumentando a exatidão dos resultados.

O mapa mostrado na Figura 5.100 apresenta a classificação obtida para a sub-bacia do rio Quitandinha.

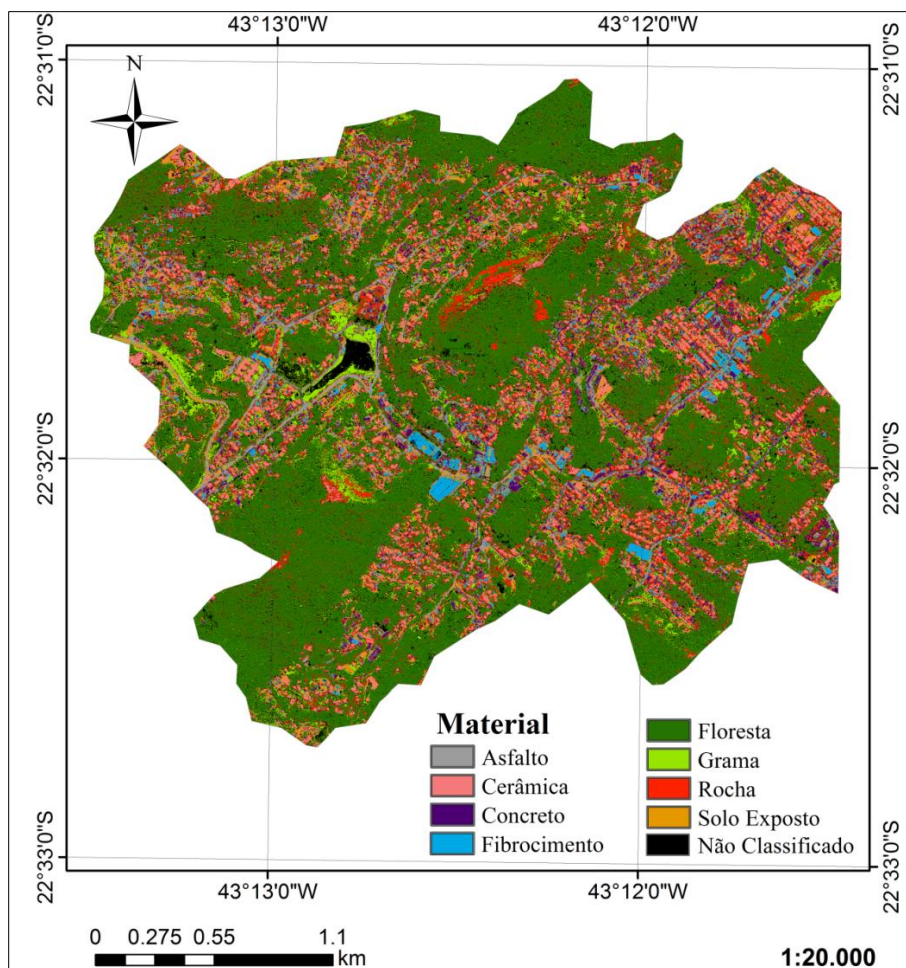


Figura 5.100. Classificação da imagem Quickbird da sub-bacia do rio Quitandinha.

Apesar de se encontrar em uma das regiões com maior urbanização da região, a sub-bacia do rio Quitandinha apresenta cerca de metade de sua superfície coberta por florestas. A distribuição das demais classes pode ser verificada na Tabela 5.8

Tabela 5.8. Classificação da cobertura na sub-bacia do rio Quitandinha.

Classe	Área Total		Área Urbana	
	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)
Concreto	5	0,33	8	0,28
Asfalto	7	0,43	11	0,37
Cerâmica	7	0,44	11	0,35
Fibrocimento	2	0,13	4	0,13
Solo Exposto	5	0,35	9	0,31
Gramma	8	0,53	9	0,29
Floresta	53	3,38	31	1,02
Rocha	13	0,85	17	0,55
TOTAL	100	6,44	100	3,31

Para a estimativa da TSC a partir das propriedades dos materiais artificiais observados na região, foram inseridos, no modelo, os parâmetros de entrada expostos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Parâmetros de entrada do modelo das superfícies artificiais.

Parâmetro	Superfície Artificial			
	Concreto	Asfalto	Cerâmica	Fibrocimento
Calor Específico (cx) 1	0,179	0,220	0,215	0,201
Condutividade Térmica	0,0041	0,0018	0,0031	0,0018
Densidade	2,402	2,27	1,81	1,6
Rugosidade da Superfície	0,01	0,01	0,03	0,03
Rugosidade do Dossel	0	0	0	0
Razão de Bloqueio da Vegetação	0	0	0	0
Razão de Umidade do Solo	0	0	0	0
Razão de Umidade do Solo Saturado	0,003	0,003	0,003	0,003
Razão de Umidade do Solo Média	0,001	0,001	0,001	0,001
Razão de Umidade do Solo no Ponto de Murcha	0	0	0	0
Chave de Condensação (deltac)	1	1	1	1
Razão da Massa de Água Retida na Folhagem pela Área do Solo sob a Folhagem (w_{dew})	0	0	0	0
Valor Máximo de w_{dew}	0	0	0	0
Dependência Sazonal	0	0	0	0
Albedo da Vegetação	0	0	0	0
Albedo da Superfície	0,45	0,1	0,68	0,32

Como é possível observar, os parâmetros relacionados à vegetação foram zerados para as superfícies artificiais, para as quais não foi considerada a retenção de umidade devido à ausência de inclusão de camada vegetal.

As superfícies naturais consideradas na classificação da região analisada foram: afloramento rochoso, solo exposto, gramíneas e floresta. Os parâmetros de entrada do modelo podem ser observados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Parâmetros de entrada do modelo das superfícies naturais.

Parâmetro	Superfície Natural			
	Rocha	Solo Exposto	Gramíneas	Floresta
Calor Específico	0,201	0,25	0,25	0,25
Condutividade Térmica	0,0083	0,004	0,004	0,004
Densidade	2,65	1,4	1,4	1,4
Rugosidade da Superfície	0,05	0,015	0,015	0,015
Rugosidade do Dossel	0	0	0,03	0,9
Razão de Bloqueio da Vegetação	0	0	0,60	1,0
Razão de Umidade do Solo	0	0,2	0,18	0,2
Razão de Umidade do Solo Saturado	0,003	0,3	0,3	0,3
Razão de Umidade do Solo Média	0,001	0,25	0,25	0,25
Razão de Umidade do Solo no Ponto de Murcha	0,0	0,1	0,1	0,1
Chave de Condensação	1,0	1,0	1,0	1,0
Massa de Água Retida na Folhagem /Área do Solo sob a Folhagem (w_{dew})	0	0	0	0
Valor Máximo de w_{dew}	0	0	0,08	0,08
Dependência Sazonal	0	0	0	2,0
Albedo da Vegetação	0	0	0,2	0,2
Albedo da Superfície	0,14	0,45	0,45	0,45

Os parâmetros acima expostos foram baseados nos estudos de Albuquerque (2009) e podem ser adaptados a depender da superfície avaliada. A espacialização dos tipos de superfícies foi realizada conforme classificação exposta na Figura 5.100.

As series de Fourier, ajustadas aos dados de temperatura e umidade do ar à altura de referência, basearam-se em um ciclo de 24 horas e na utilização de dois harmônicos. Os coeficientes e médias obtidos encontram-se expressos na Tabela 5.11:

Tabela 5.11. Coeficientes e médias para ajuste da série de Fourier.

Séries	Média	Coeficientes			
		A_1	B_1	A_2	B_2
Temperatura	-0,7	-10,0	-2,844	1,394	-0,7
Umidade	0,6	34,7	11,495	-0,583	0,6

As curvas de variação da temperatura e umidade médias do ar, hora a hora, da estação meteorológica do projeto EIBEX, bem como as séries de Fourier utilizadas para representar esses dados encontra-se, respectivamente, na Figura 5.101 e na Figura 5.102.

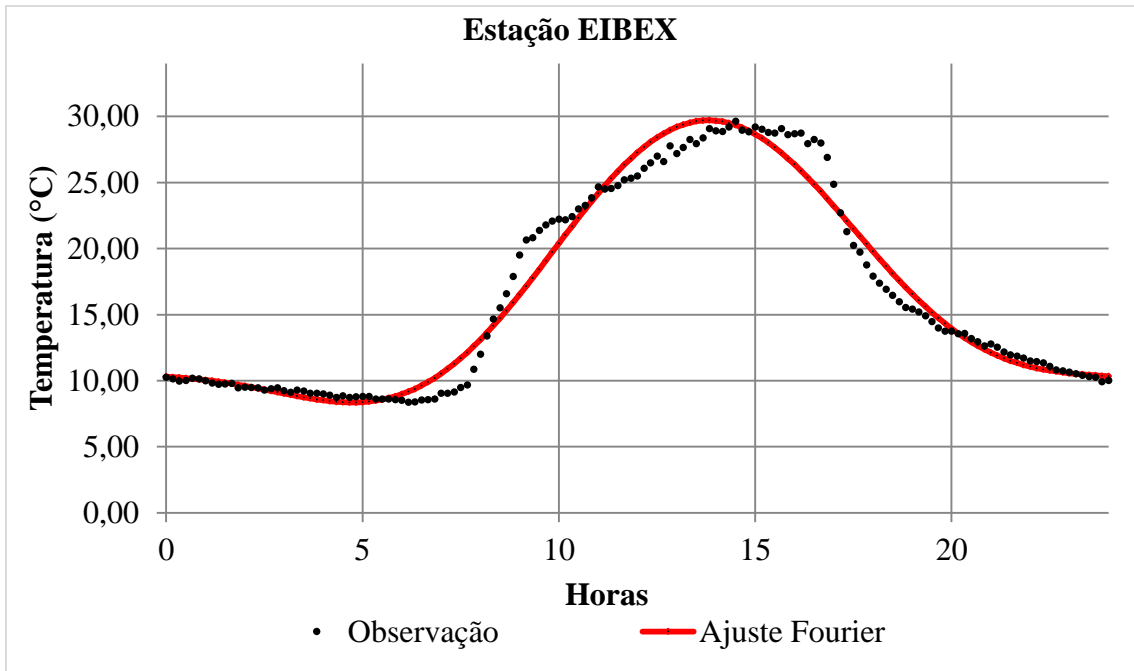


Figura 5.101. Dados de temperatura horária média do ar da estação meteorológica do projeto EIBEX e curva ajustada pela série de Fourier.

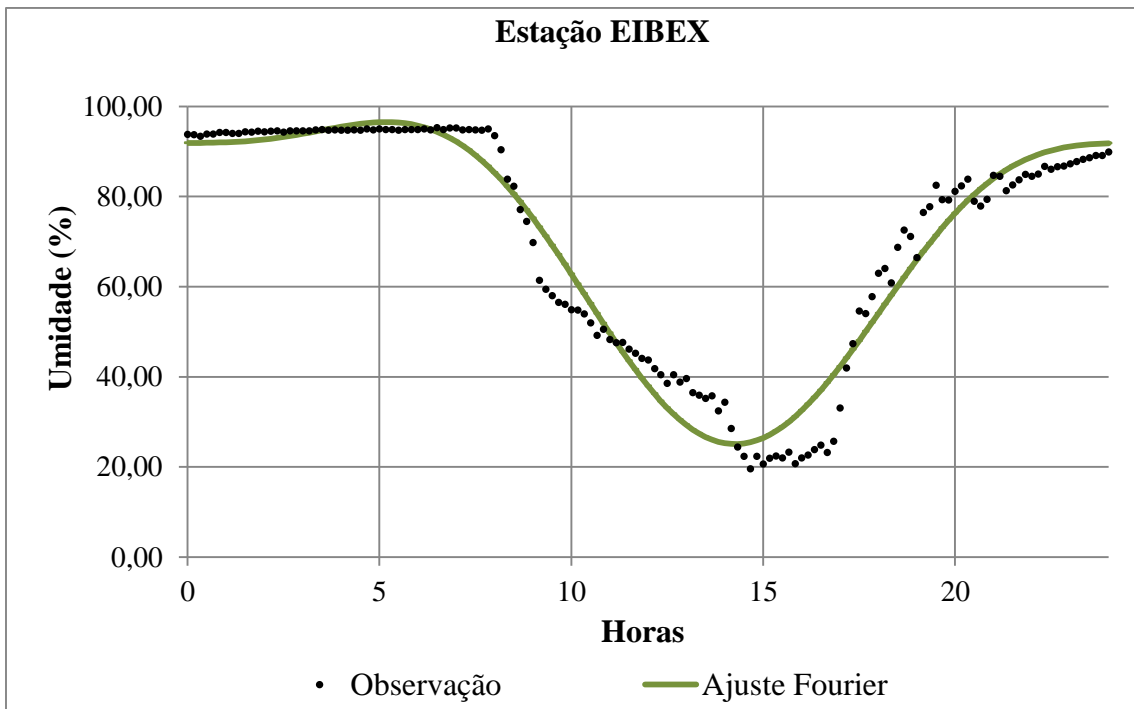


Figura 5.102. Dados de umidade relativa do ar horária média da estação meteorológica do projeto EIBEX e curva ajustada pela série de Fourier.

De posse das séries contínuas representativas da temperatura e umidade relativa do ar, o modelo foi alimentado com os dados expostos, obtendo-se as curvas de variação de temperatura de cada material durante o dia avaliado, expostas na Figura 5.103 e na Figura 5.104.

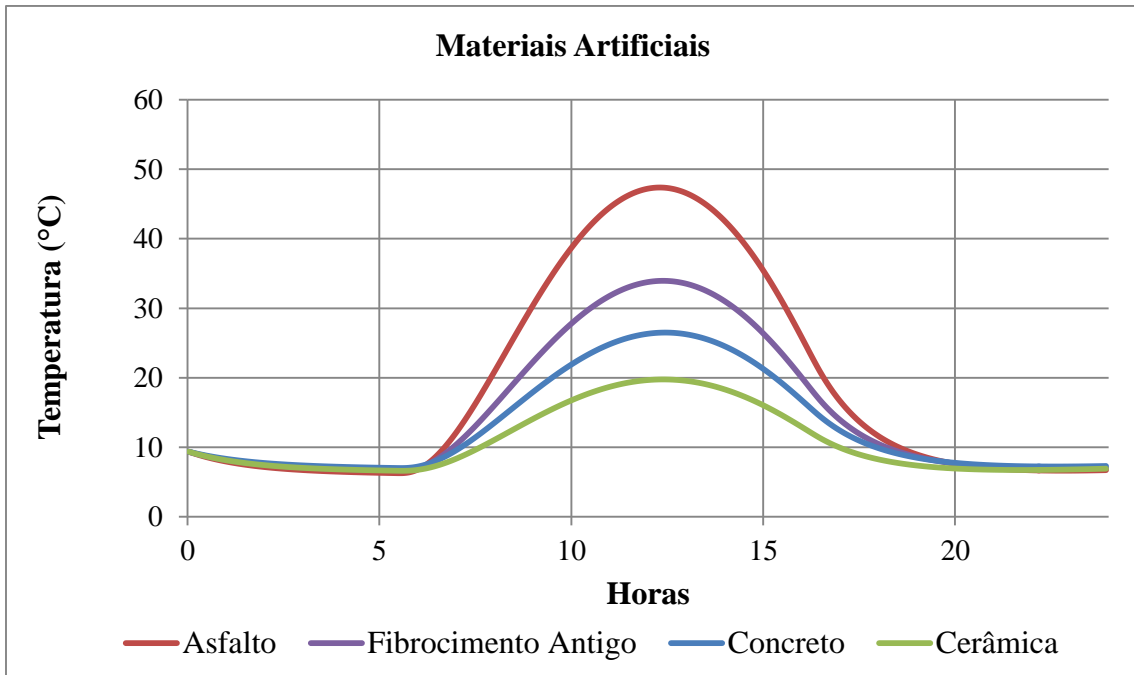


Figura 5.103. Variação diária de temperatura para as superfícies artificiais.

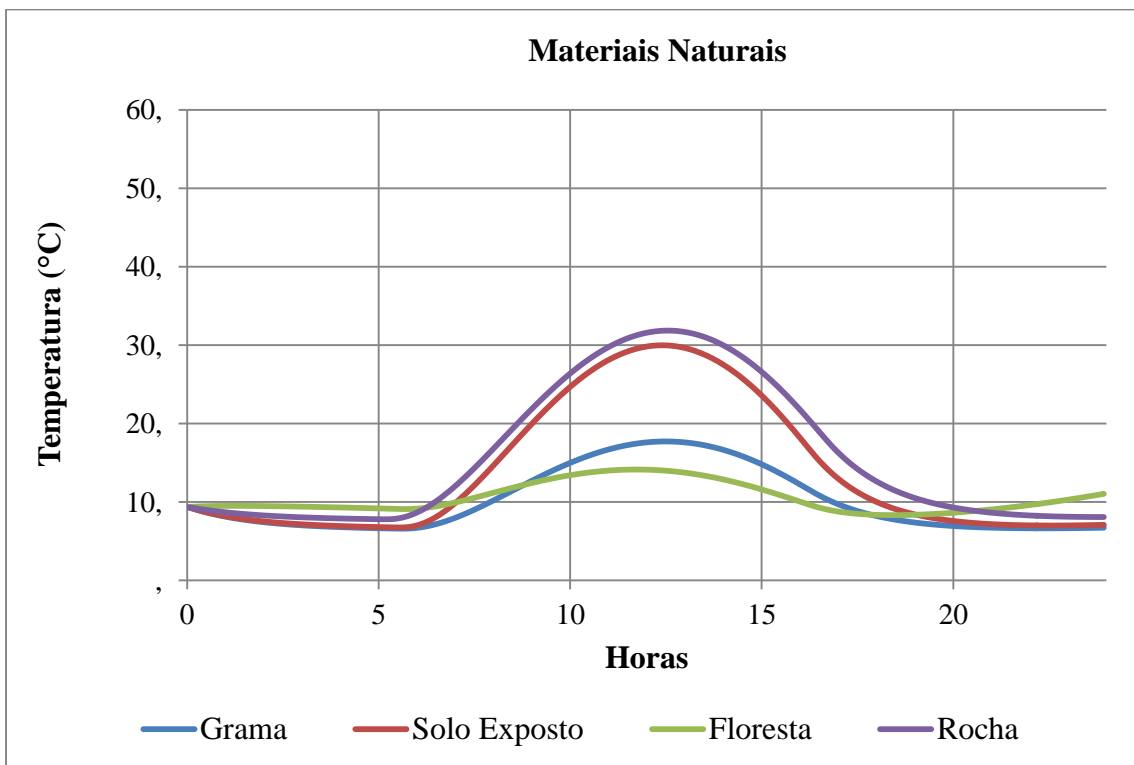


Figura 5.104. Variação diária de temperatura para as superfícies naturais.

Foi possível, dessa forma, obter a estimativa de temperatura superficial para cada superfície avaliada para as 9 horas, 40 minutos e 27 segundos do horário local, condizente com o horário de passagem do satélite Landsat.

Tabela 5.12. Temperatura estimada para cada superfície às 09:40:27 horas.

Superfície	Temperatura (°C)
Concreto	20,66
Asfalto	36,15
Cerâmica	15,91
Fibrocimento	26,07
Solo Exposto	23,23
Gramma	14,29
Floresta	13,13
Rocha	24,99

As temperaturas determinadas para cada material foram especializadas conforme a classificação exposta na Figura 5.100.

5.3.2 Comparação entre TSC a partir das Propriedades dos Materiais e Dados do Satélite Landsat-5

Diante da diferença significativa das escalas de análise, a comparação entre a estimativa da TSC a partir dos dados do satélite Landsat-5 e da estimativa obtida de acordo com o modelo proposto por Albuquerque (2009) requer uma avaliação mais cuidadosa. Dessa forma, a comparação foi realizada a partir de duas abordagens.

Inicialmente, foi feita uma ampliação da escala mais detalhada do satélite Quickbird, a partir da média das temperaturas contidas no píxel de 120 m. Essa aproximação permitiu a comparação entre os dois métodos de estimativa da TSC.

Os gráficos expostos na Figura 5.105 e Figura 5.106 indicam a comparação entre os resultados das temperaturas de cada série, nos quais observa-se que, ressalvados casos pontuais, ambas as estimativas seguem uma mesma tendência. Adicionalmente, observa-se que as temperaturas estimadas a partir da imagem do satélite Landsat-5 apresentam-se ligeiramente superiores àquelas estimadas a partir das propriedades dos materiais.

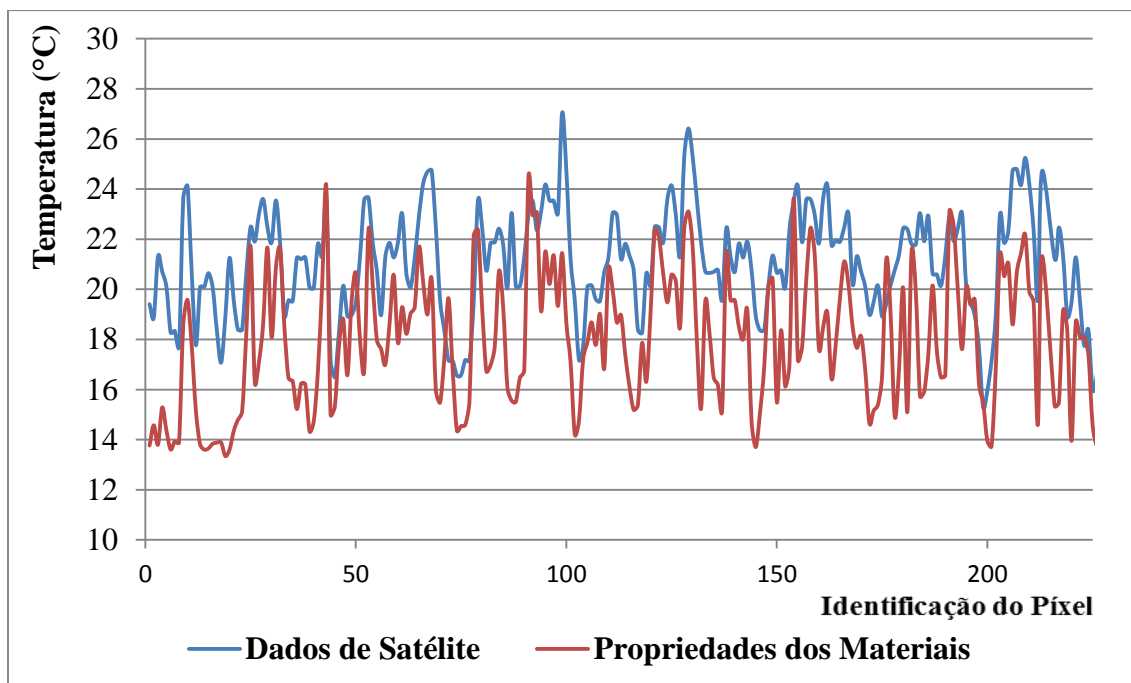


Figura 5.105. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais – área 1 a 229.

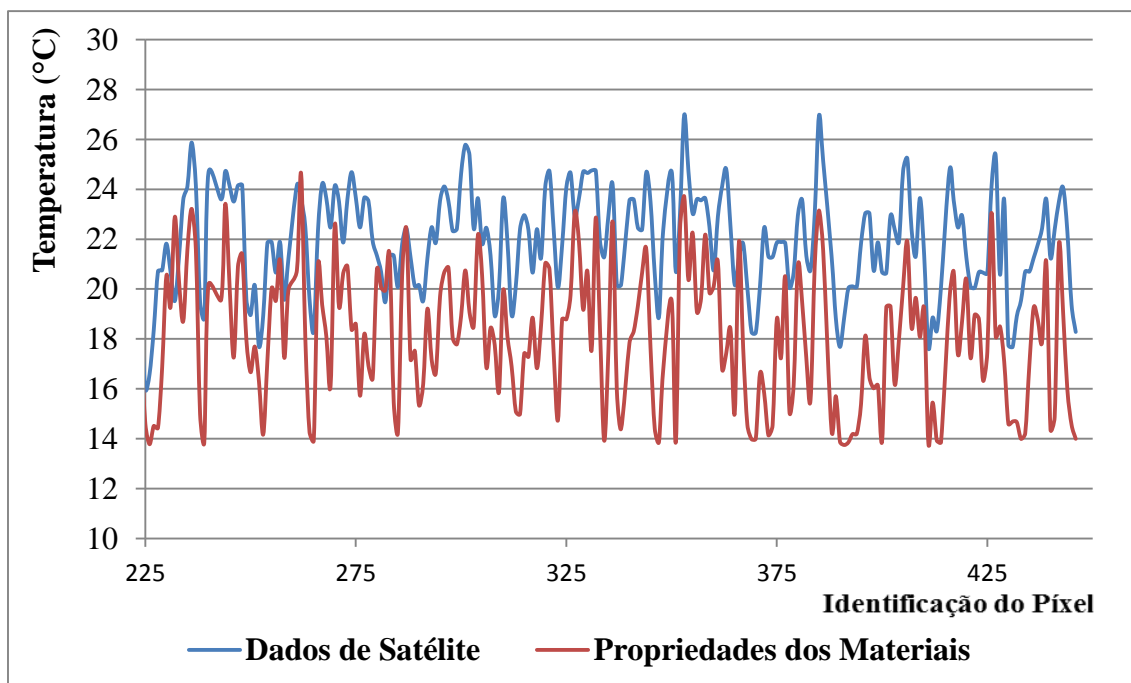


Figura 5.106. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais – área 229 a 458.

Como as variáveis avaliadas seguem uma distribuição normal, a verificação da associação entre elas foi feita a partir da determinação do coeficiente de Pearson. Foi obtido o valor de 0,64, o que indica uma correlação de moderada a alta, havendo um compartilhamento significativo de variâncias entre as séries obtidas a partir dos dois métodos avaliados. O erro médio observado entre as estimativas é de 3,6 °C.

Subtraindo-se um fator correspondente ao erro médio à série baseada nos dados do satélite Landsat-5, observa-se que o erro médio é reduzido para 1,7 °C, havendo também uma maior aproximação das curvas que pode ser observada nas Figura 5.107 e Figura 5.108, no qual a série de dados alterada é apresentada em verde.

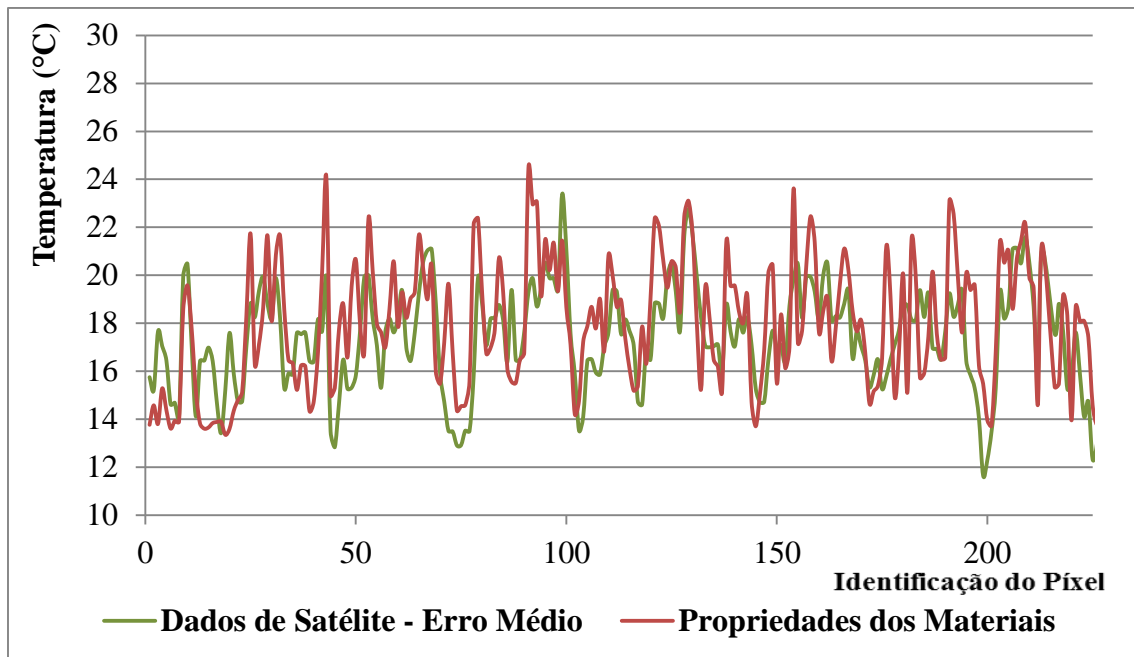


Figura 5.107. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais e subtração do fator de erro médio aos dados de satélite – área 1 a 229.

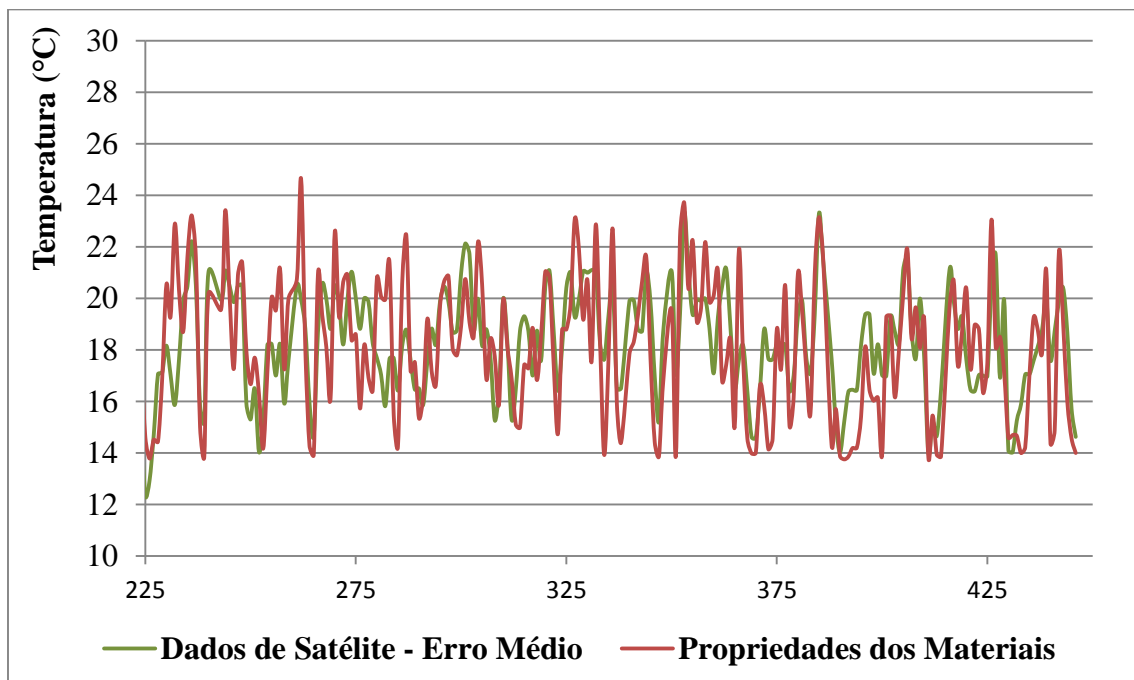


Figura 5.108. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com alteração da escala no modelo baseado nas propriedades dos materiais e subtração do fator de erro médio aos dados de satélite – área 229 a 458.

Foi desenvolvida, complementarmente, a comparação com a superfície gerada pelo interpolador de krigagem a partir das informações obtidas por dados de satélite.

Nesse caso, as informações na camada relativa às temperaturas a partir das propriedades dos materiais são mantidas da forma como foram obtidas, e a camada referente à temperatura pela imagem de satélite é representada por uma superfície contínua, permitindo a comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos sob outra ótica. A superfície gerada pelo interpolador de Krigagem pode ser observada na Figura 5.109.

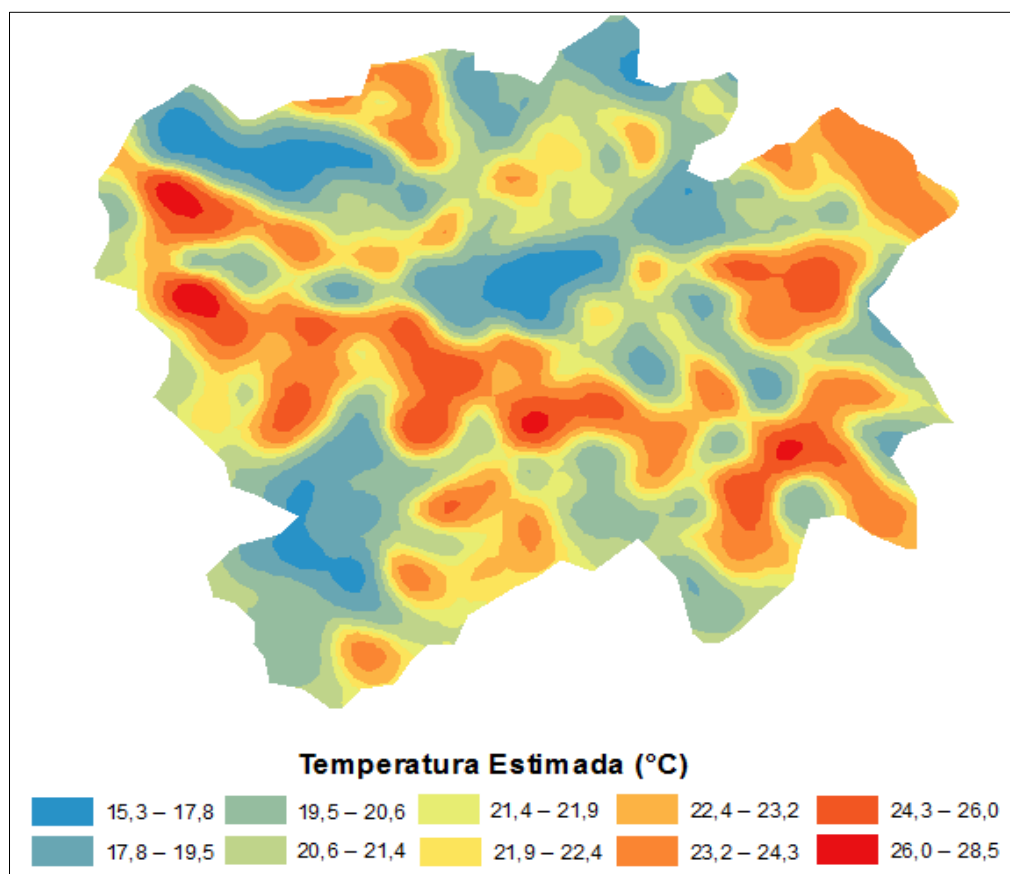


Figura 5.109. Previsão da TSC pelo interpolador de Krigagem.

O gráfico da validação cruzada da interpolação pode ser observado na Figura 5.110. Quanto mais exata é a previsão, mais próximo os pontos estarão da reta cinza. Quanto mais preciso em relação ao modelo encontra-se a observação, mais próximo o ponto encontrara-se à reta em azul.

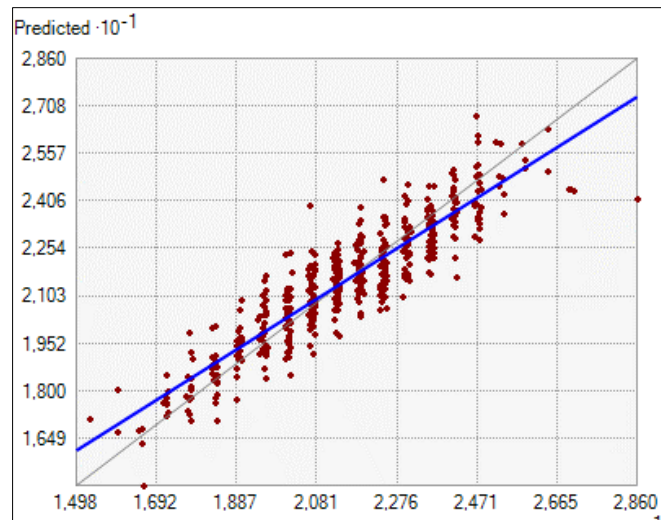


Figura 5.110. Gráfico de validação cruzada do modelo.

Para esse nível de comparação, foram selecionadas 458 amostras aleatórias da superfície de temperatura exposta na Figura 5.109.

A Figura 5.111 e a Figura 5.112 mostram que as estimativas também nesse caso seguem a mesma tendência. O coeficiente de Pearson para as séries obtidas, conforme essa segunda abordagem, foi 0,78, indicando uma forte correlação entre os dados, com maior exatidão para os valores de temperaturas superiores. O erro médio observado entre as estimativas é de 4,8 °C.

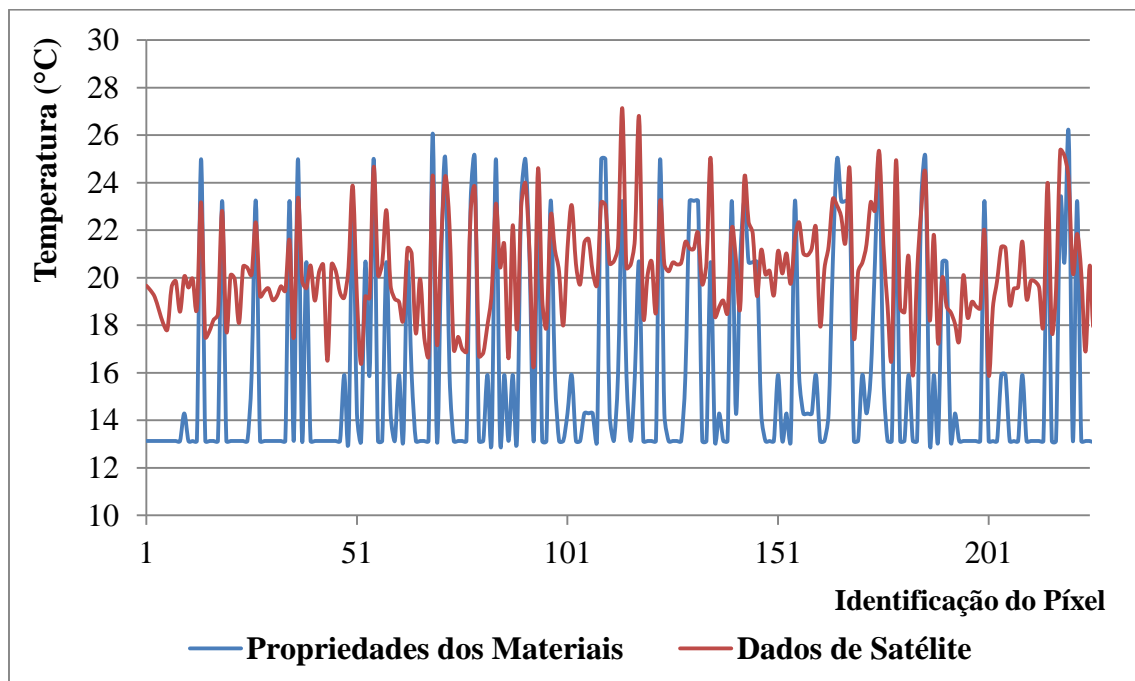


Figura 5.111. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 e adição do – pontos 1 a 229.

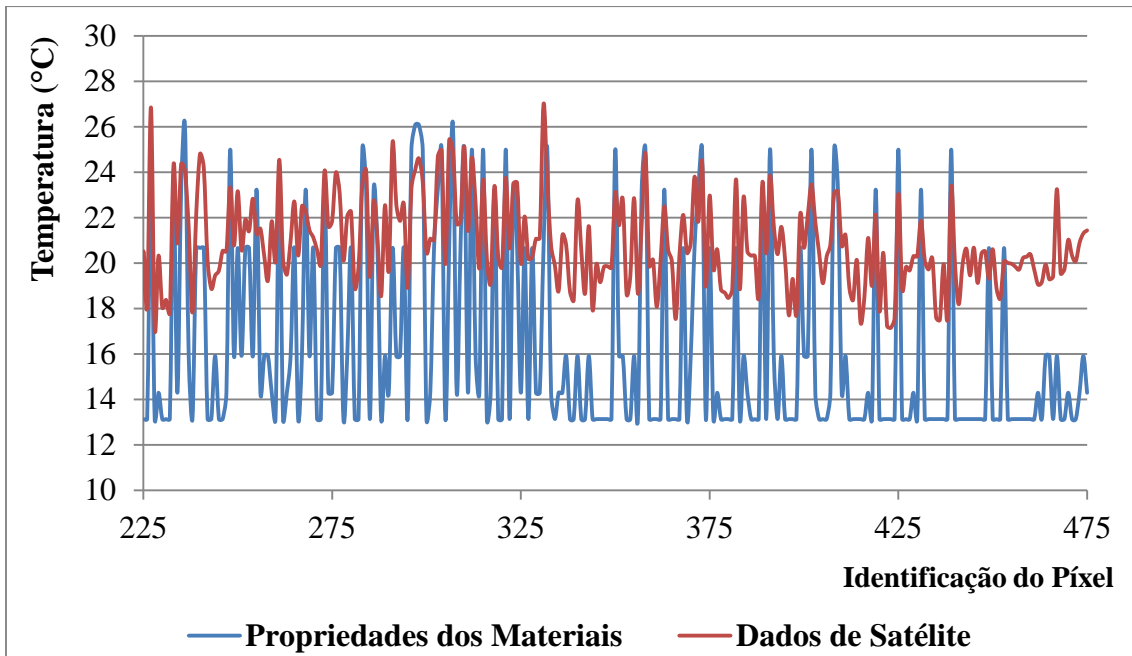


Figura 5.112. Comparação entre as estimativas das temperaturas com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 – área 229 a 458.

Nesse caso, optou-se por adicionar, à série de dados de temperatura baseada nas propriedades dos materiais, um fator igual ao erro médio acima mencionado. Esse ajuste reduziu o erro médio entre as séries avaliadas para 2,3 °C, aproximando as curvas como mostrado na Figura 5.113 e na Figura 5.114, nos quais a curva em verde representa a série que sofreu alteração.

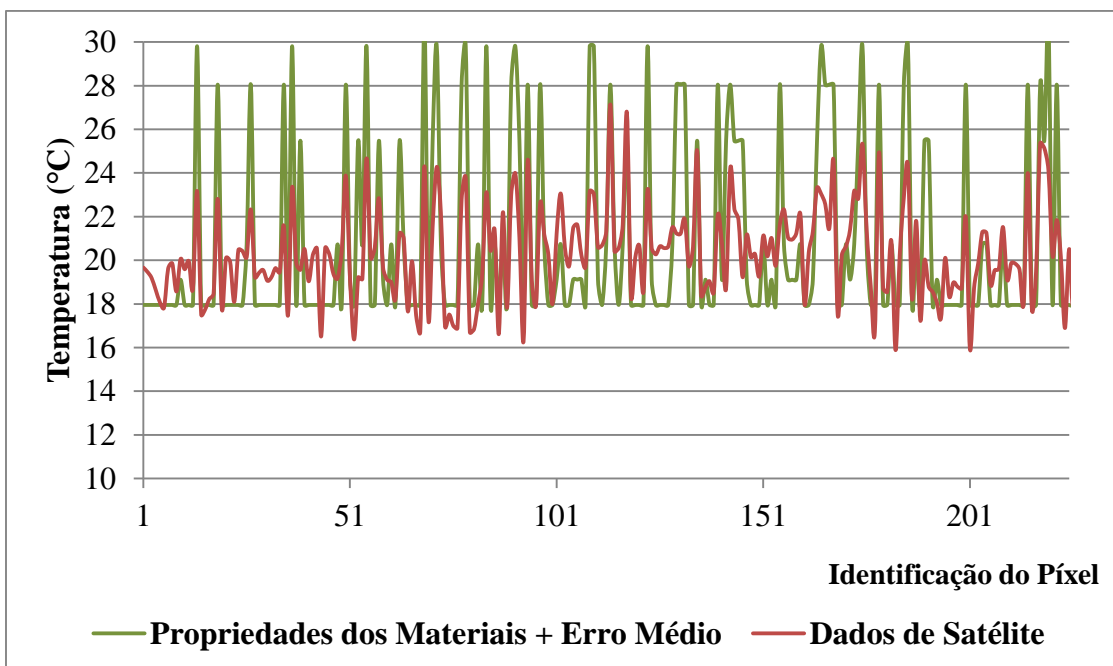


Figura 5.113. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 e adição do fator de erro médio à estimativa baseada nas propriedades dos materiais – pontos 1 a 229.

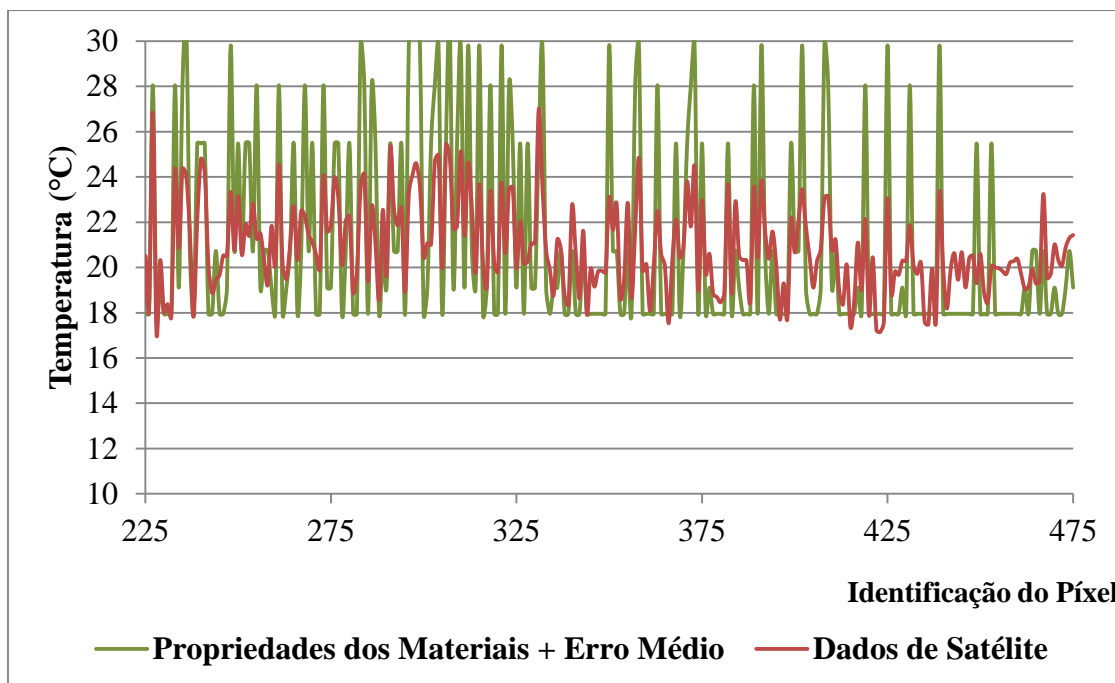


Figura 5.114. Comparação entre as estimativas das temperaturas, com interpolador de Krigagem aplicado aos dados de satélite Landsat-5 e adição do fator de erro médio à estimativa baseada nas propriedades dos materiais – pontos 229 a 475.

As análises acima indicam que existe uma forte correlação entre as estimativas baseadas nos dados do satélite Landsat-5 e nas propriedades dos materiais, e que estas, em geral, são, inferiores àquelas. Como complemento de informações medidas *in situ*, é possível ajustar as curvas de forma a representar de forma mais fidedigna a realidade observada.

5.3.3 Simulação de Cenário Projetado

Para a verificação da influência da inserção de camada de tinta branca nas telhas de fibrocimento, foram feitas medições de campo. A coleta de dados foi feita durante três dias, nos quais foi observado céu claro.

Para a determinação do albedo, a série de dados obtida foi submetida inicialmente à exclusão de dados referente ao período noturno, cujos valores de albedo tendiam ao infinito à medida que a radiação solar incidente tendia a zero.

Procedeu-se, então, à exclusão de valores *outliers*, aqui considerados como todos os valores superiores ao terceiro quartil ou inferiores ao primeiro quartil em 1,5 da distância interquartil, conforme mostram os gráficos de distribuição (*boxplot*) expostos na Figura 5.115.

Os valores considerados para o cálculo do albedo encontram-se na Figura 5.116.

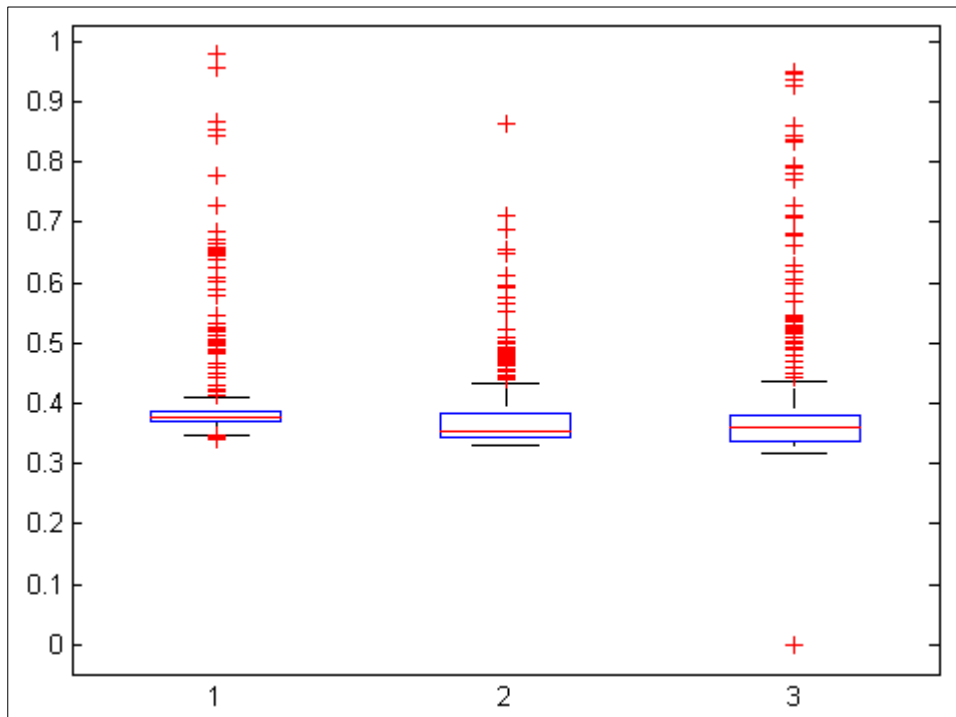


Figura 5.115. Identificação de extremos (*outliers*) na obtenção do albedo da superfície de fibrocimento com camada de tinta branca.

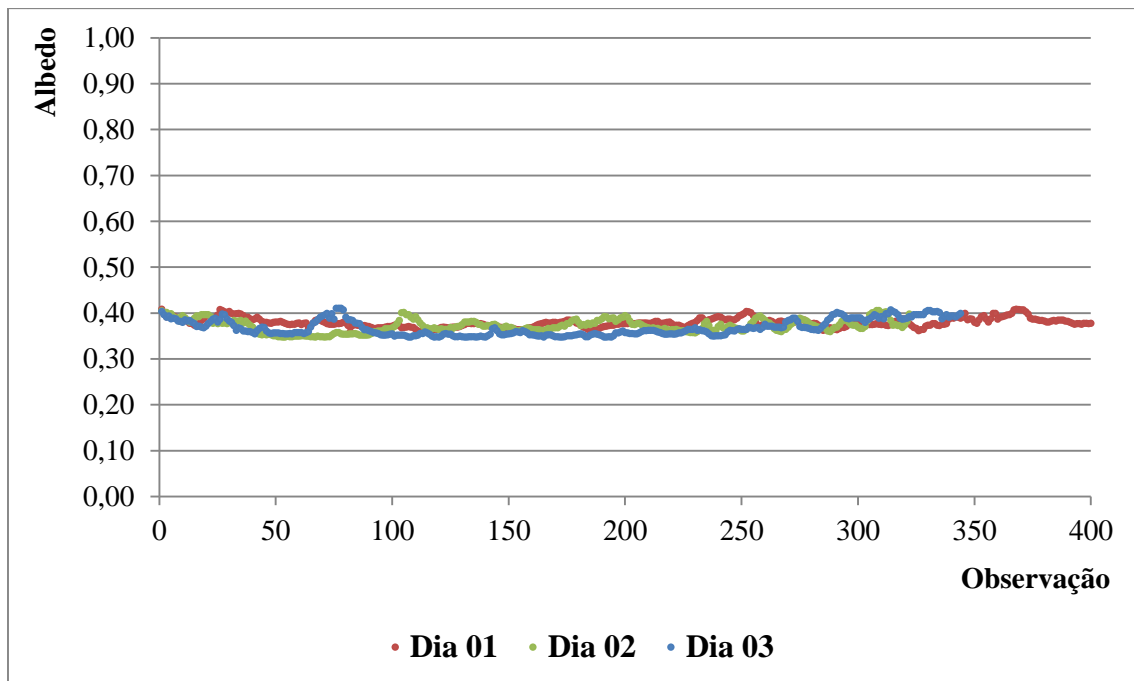


Figura 5.116. Medição do albedo para as telhas de fibrocimento brancas.

Foram calculadas a média, mediana e moda dos valores obtidos para cada dia de medição, apresentadas na Tabela 5.13. Destaca-se que os valores médios para os três dias de todas as estatísticas avaliadas convergiram para o valor de 0,37. Dessa forma,

assumiu-se um acréscimo de 0,5 no albedo das telhas de fibrocimento a partir da inserção da camada de tinta branca.

Tabela 5.13. Medição do albedo para telhas de fibrocimento pintadas de branco.

	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Média
Média	0,38	0,37	0,37	0,37
Mediana	0,38	0,36	0,37	0,37
Moda	0,38	0,35	0,37	0,37

Como superfícies com valores elevados de albedo absorvem menos radiação, as temperaturas dos edifícios e no entorno tendem a ser menores. Após a simulação através do modelo proposto por Albuquerque (2009), foi possível avaliar o comportamento térmico das telhas de fibrocimento com e sem a cobertura de tinta.

Conforme indica o gráfico exposto na Figura 5.117, as diferenças de temperatura do material chegam a cerca de 2°C para as condições presentes no dia 13/08/2011.

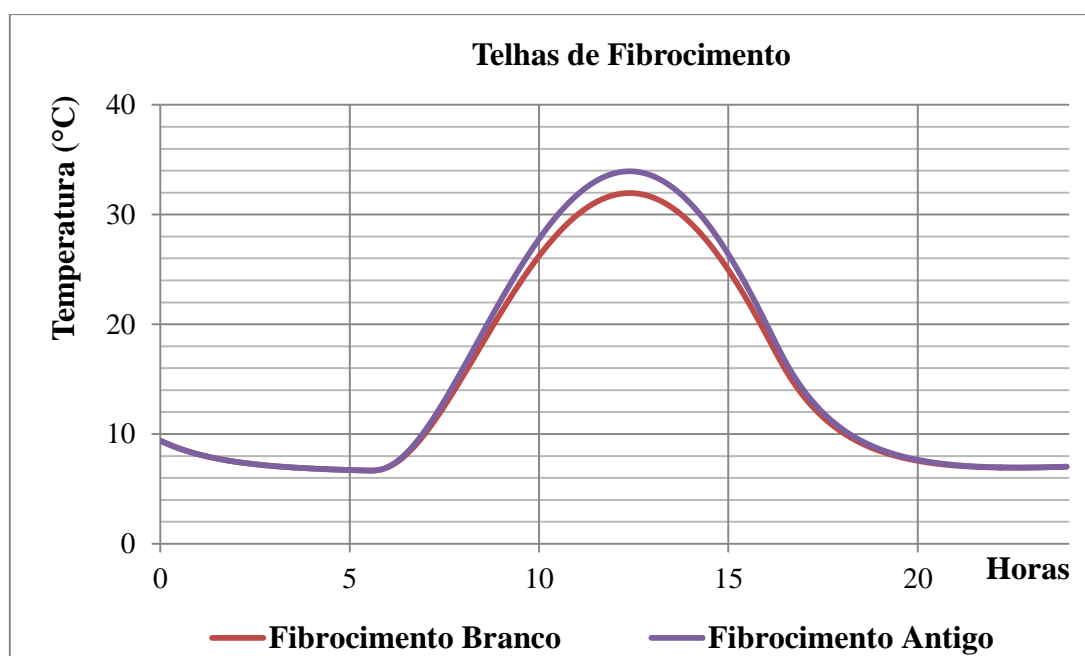


Figura 5.117. Comportamento térmico das telhas de fibrocimento com e sem a inserção de camada de tinta branca.

Na substituição das coberturas de concreto por telhados verdes, a diferença de temperatura considerando apenas a superfície torna-se ainda mais expressiva, conforme indica a Figura 5.118.

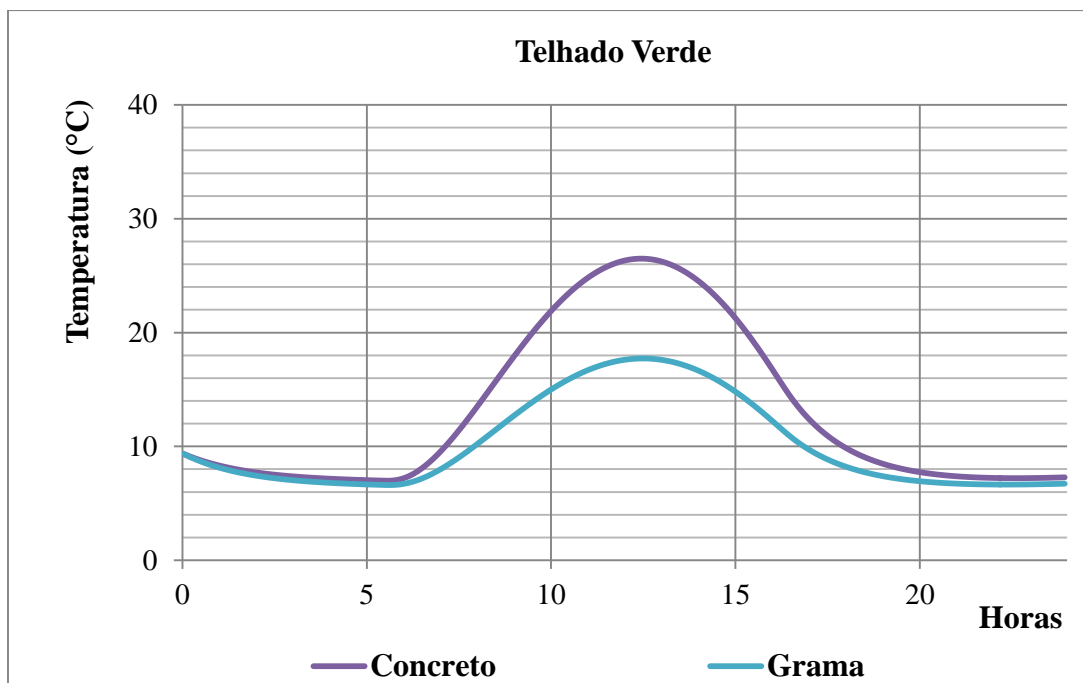


Figura 5.118. Comportamento térmico das superfícies de concreto e telhados verdes.

A classificação da cobertura da bacia permite observar que 2,05% de sua área superficial é coberta por telhas de fibrocimento, correspondente a uma área de 0,13 km². Ao considerar a área urbana da bacia, baseado na classificação de Rosário (2013), a parcela da superfície coberta por telhas de fibrocimento passa a ser de 4%. As coberturas de concreto abrangem cerca de 5% da área total da bacia, com uma área de 0,33 km². Ao ser considerada apenas a área urbana da bacia, as superfícies de concreto passam a representar 8% da área total (Tabela 5.8).

Apesar da pouca expressividade das superfícies de concreto e fibrocimento em termos de área na bacia, a simulação das temperaturas, para o cenário atual e o cenário projetado, permitiu observar uma redução de cerca de 0,8 °C na temperatura média da área urbana da bacia.

As temperaturas simuladas para as condições do dia 13/08/2011 nos horários de 9h, 12h, 15h e 18h estão apresentadas na Tabela 5.14, para o cenário atual, e, na Tabela 5.15, para o cenário projetado.

A espacialização das temperaturas para o horário de maiores diferenças detectadas encontra-se na Figura 5.119.

Tabela 5.14. Simulação do cenário atual.

Classe	Cenário Atual - Temperaturas (°C)			
	9h	12h	15h	18h
Concreto	17,93	26,33	21,27	9,86
Asfalto	30,41	47,22	35,44	11,60
Cerâmica	14,06	19,66	16,03	8,24
Fibrocimento	22,26	33,77	26,38	10,47
Solo Exposto	19,98	29,83	23,58	10,01
Gramma	12,72	17,61	14,81	8,22
Floresta	12,44	14,13	11,61	8,37
Rocha	21,89	31,59	26,59	12,63
Temperatura Média	17,78	24,92	20,05	9,77

Tabela 5.15. Simulação do cenário projetado.

Classe	Cenário Projetado - Temperaturas (°C)			
	9h	12h	15h	18h
Telhado Verde	12,72	17,61	14,81	8,22
Asfalto	30,41	47,22	35,44	11,60
Cerâmica	14,06	19,66	16,03	8,24
Fibrocimento	21,10	31,80	24,94	10,18
Solo Exposto	19,98	29,83	23,58	10,01
Gramma	12,72	17,61	14,81	8,22
Floresta	12,44	14,13	11,61	8,37
Rocha	21,89	31,59	26,59	12,63
Temperatura Média	17,30	24,11	19,45	9,62

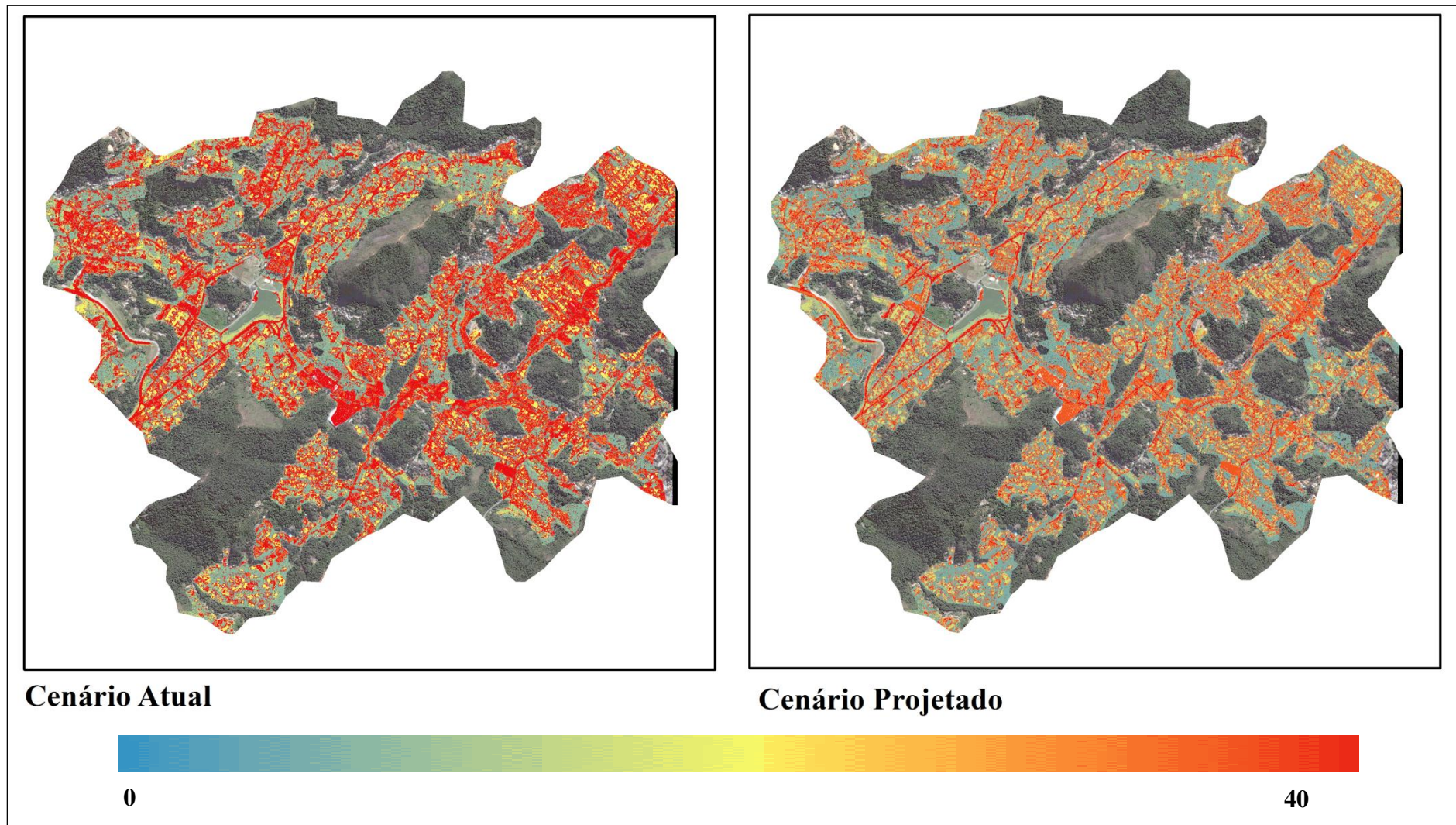


Figura 5.119. Comparação de TSC entre os cenários atual e projetado.

5.4 Avaliação do Índice de Inclusão Econômico Sanitário na sub-bacia do rio Quitandinha

Os indicadores selecionados, baseados no trabalho desenvolvido por Soares (2004), foram: domicílios ligados à rede de abastecimento pública de água; domicílios ligados à rede pública de esgotamento sanitário; domicílios com coleta regular de lixo e renda domiciliar nominal normalizada.

Observa-se que, em 2000, a média de domicílios ligados à rede era de 42,8%, com 57,9% da população residente apresentando-se índices de abastecimento de água superiores à média local. Os dados revelam ainda que 28,9% dos habitantes da bacia estavam contemplados com o abastecimento de água através da rede pública de abastecimento com índice inferior a 20%, e que esses apresentavam renda média mensal de 7,2 salários mínimos. Ao avaliar a faixa do indicador com índice de abastecimento superior a 80%, observa-se a reunião de 7,7% dos habitantes, com rendimento mensal domiciliar médio de 9,6 salários mínimos.

Em 2010, a média de abastecimento subiu para 66,9%, e a parcela da população que com índices de abastecimento superiores a isso passou a ser dominante, com 97%. Percentuais do indicador abaixo de 20% reúnem apenas 6,9% dos moradores, com renda domiciliar média de 3,8 salários mínimos. Nesse momento, 38,9% da população, detentora de renda média mensal de 4,1 salários mínimos encontrava-se em situação e abastecimento de água através da rede pública com índice superior a 80%. Observou-se que 2,2% da população alcançavam taxa de 100% do indicador.

Na Figura 5.130, são apresentadas as distribuições espaciais do indicador de interligação domiciliar com a rede de abastecimento de água para os anos de 2000 e 2010, onde é mostrada a melhoria geral do índice no período na região analisada.

No que tange à ligação à rede pública de esgoto, observa-se que, no ano de 2000, em média, do índice era de 81%, contemplando 67% da população residente com índices superiores à média. O rendimento nominal médio desse segmento populacional era de 7,6 salários mínimos. Os dados revelam que 2% da população encontram-se sem ligação com a rede de esgoto, e 5% da população com abrangência de 100% do índice.

Em 2010, o índice médio de casas ligadas à rede pública de esgoto aumentou para 87%, com abrangência de 68% da população contemplada por índices superiores à média, apresentando rendimento nominal mensal médio de 3,7 salários mínimos. Uma parcela de 8% da população estava contemplada com 100% do serviço, e apenas 1% inseria-se na faixa do indicador inferior a 20% de atendimento pela rede de esgoto.

Na Figura 5.131, é mostrada a espacialização desse índice para os anos de 2000 e 2010.

Quanto à coleta regular de lixo, a região analisada apresentou altos índices em ambos os períodos analisados. Em 2000, a média observada foi de 97% de residências com acesso ao serviço e 79% da população atendida indicadores acima da média, com rendimento nominal mensal médio de 8,0 salários mínimos. Observou-se que uma parcela de 20% da população é contemplada com 100% do indicador.

Em 2010, o índice médio atingiu 99%, envolvendo 84% da população com taxas de atendimento pelo serviço igual ou superior à média e rendimento de 8,0 salários mínimos. Nesse ano, a parcela de 59% da população possuía o indicador de coleta de lixo em 100%. A espacialização desse índice pode ser observada na Figura 5.132, onde se observa o aumento do índice de coleta de lixo de forma geral, à exceção de um setor pontual situado a nordeste da bacia, com valor do indicador de 85%.

O IIES médio observado no ano de 2000 foi de 0,6, inserindo a região na classe semi-incluída em termos econômicos e sanitários. No ano de 2010, o IIES médio da bacia atingiu 0,7, ainda caracterizando condições semi-incluídas.

Em 2000, 15% da população residia em setores classificados como semi-excluídos, 69% da população situava-se em setores semi-incluídos e 15% em setores incluídos. No de ano 2010, apenas 1% da população residia no setor classificados como semi-excluídos. Os setores classificados como semi-incluídos passaram a englobar 80% população, e aqueles classificados como incluídos a abranger 19% da população. A distribuição da população de acordo com a classificação de acordo com o IIES pode ser observada na Figura 5.120 para 2000, e na Figura 5.121 para o ano de 2010.

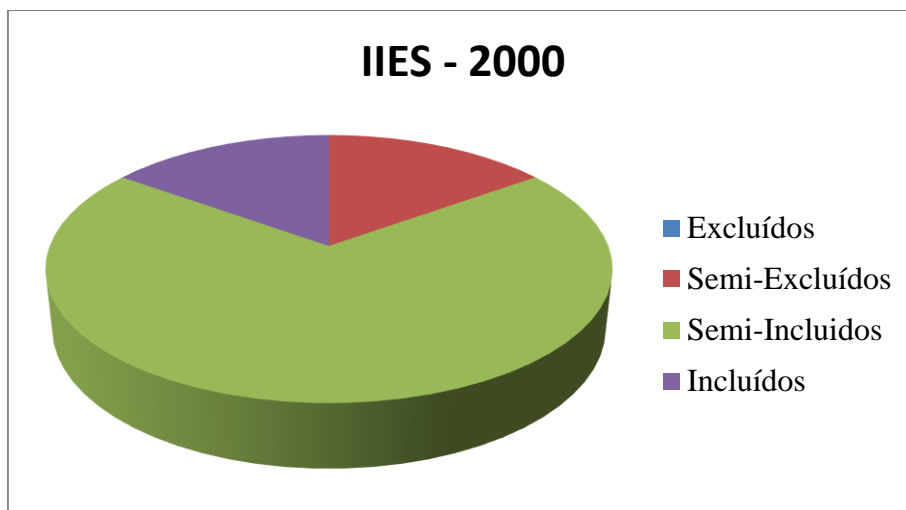


Figura 5.120. Distribuição da população de acordo com o IIES (2000).

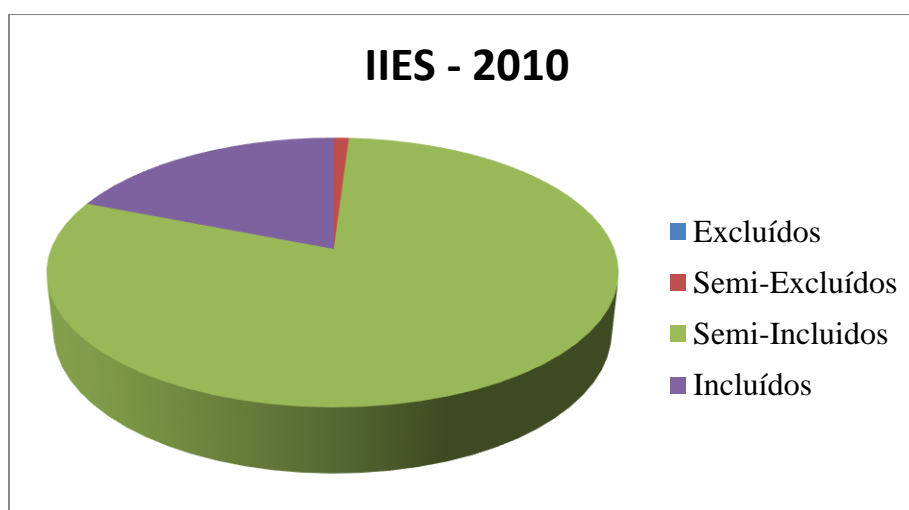


Figura 5.121. Distribuição da população de acordo com o IIES (2010).

A espacialização do IIES para os anos de 2000 e 2010 encontra-se apresentada na Figura 5.134, onde é possível observar o aumento geral no IIES dos setores inseridos na década de 2000. Como exceção a essa tendência, cita-se apenas um pequeno setor situado no centro-oeste na sub-bacia, com área de 0,2% da bacia, que passou de características semi-incluídas para semi-excluídas devido a redução do índice de residências com interligação à rede pública de esgoto.

Foram identificadas as tendências dos indicadores que compõem o IIES através da variação de cada um deles, com o índice de inclusão para os anos 2000 e 2010. A Figura 5.122, a Figura 5.123, a Figura 5.124 e a Figura 5.125 mostram, respectivamente, a variação do IIES com os indicadores de renda, interligação com a rede de abastecimento, com a rede de esgoto e de coleta regular de lixo para o ano de 2000.

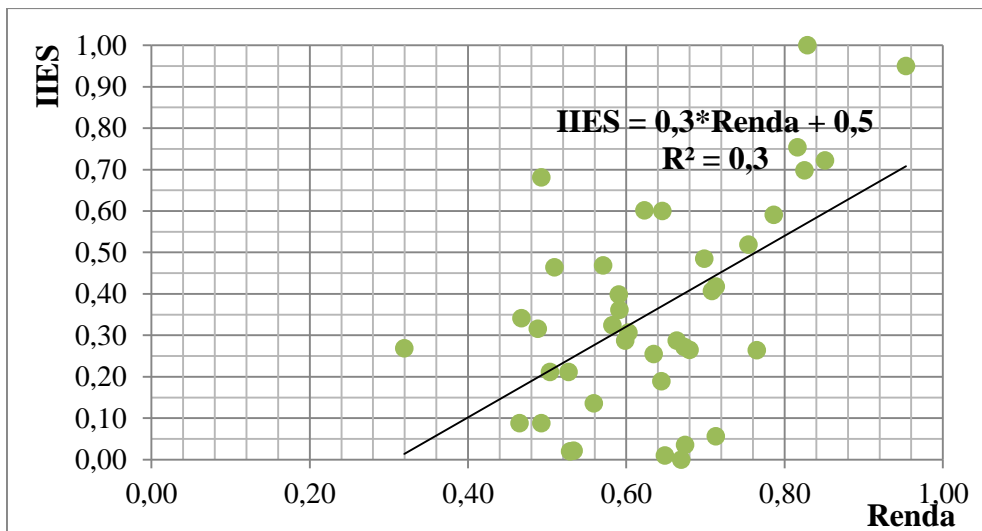


Figura 5.122. Tendência Renda versus IIES em 2000.

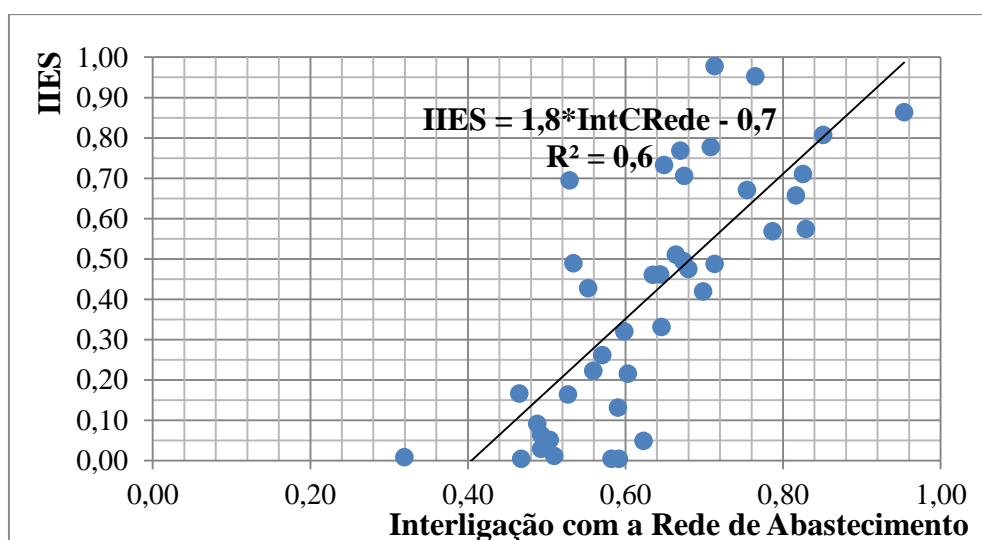


Figura 5.123. Tendência Interligação com a Rede de Água versus IIES em 2000.

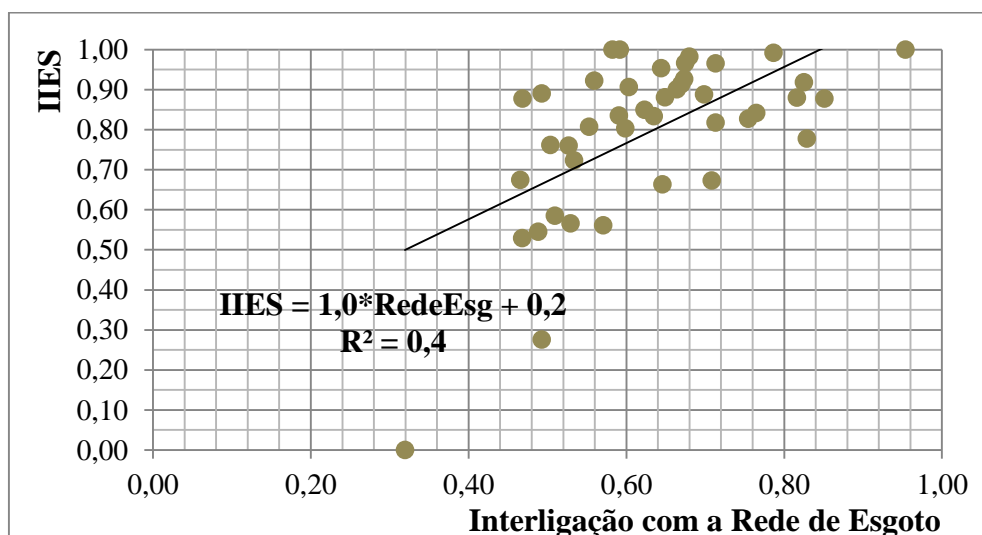


Figura 5.124. Tendência Interligação com a Rede de Esgoto versus IIES em 2000.

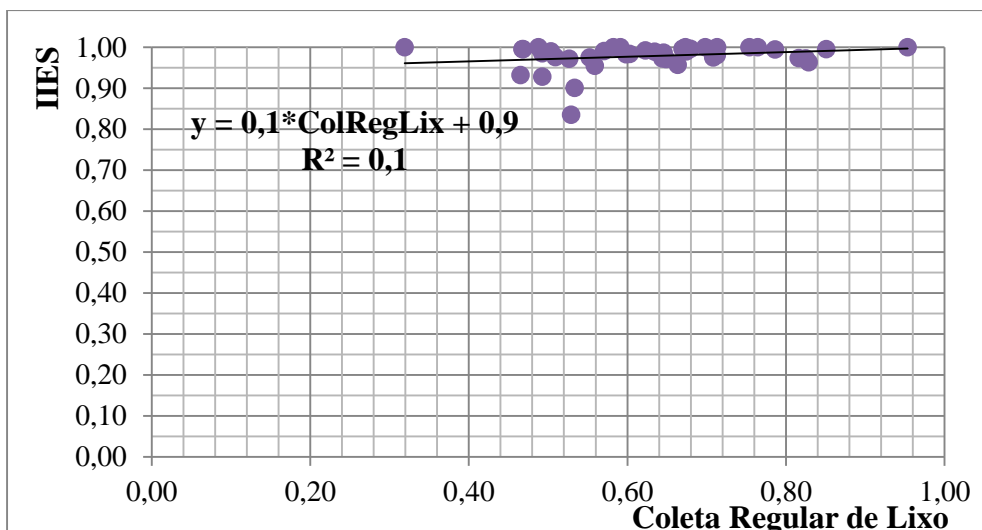


Figura 5.125. Tendência Coleta Regular de Lixo versus IIES em 2000.

O indicador que apresentou maior correção com o IIES foi de interligação com a rede de Abastecimento. O indicador com menor correlação com o IIES, dada sua pequena variabilidade na bacia, foi o de coleta regular de lixo.

A Figura 5.126, a Figura 5.127, a Figura 5.128 e a Figura 5.129 mostram, respectivamente, a variação do IIES com os indicadores de renda, interligação com a rede de abastecimento, com a rede de esgoto e de coleta regular de lixo para o ano de 2010, onde é possível observar novamente que o indicador com maior correlação com o IIES é o de interligação com a rede de abastecimento e o indicador com menor correlação foi o de coleta regular de lixo, tal qual ocorrido em 2000.

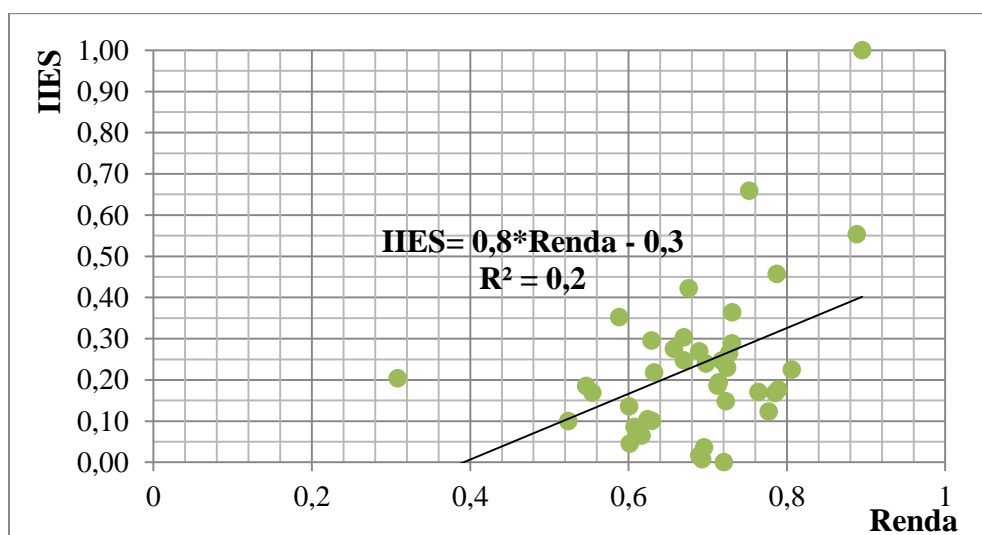


Figura 5.126. Tendência Renda versus IIES para o ano de 2010.

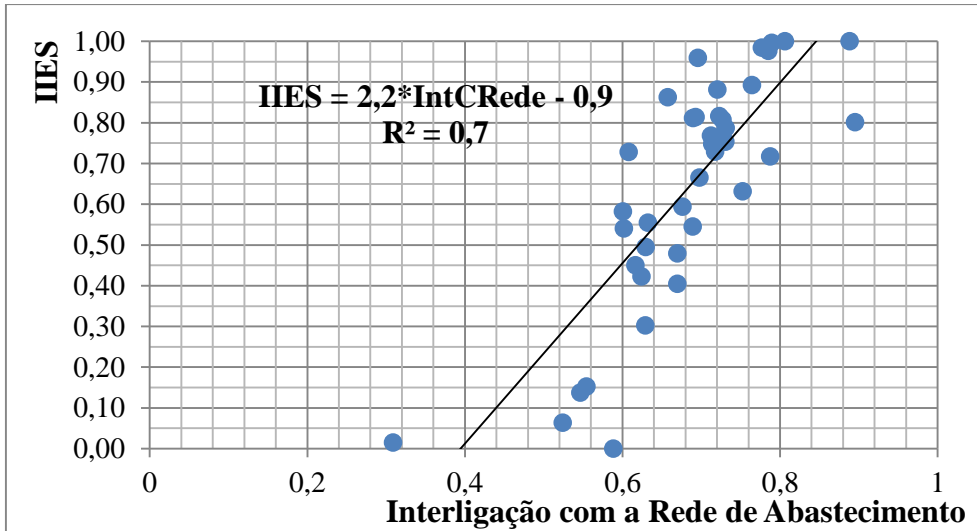


Figura 5.127. Tendência Interligação com a Rede de Água versus IIES em 2010.

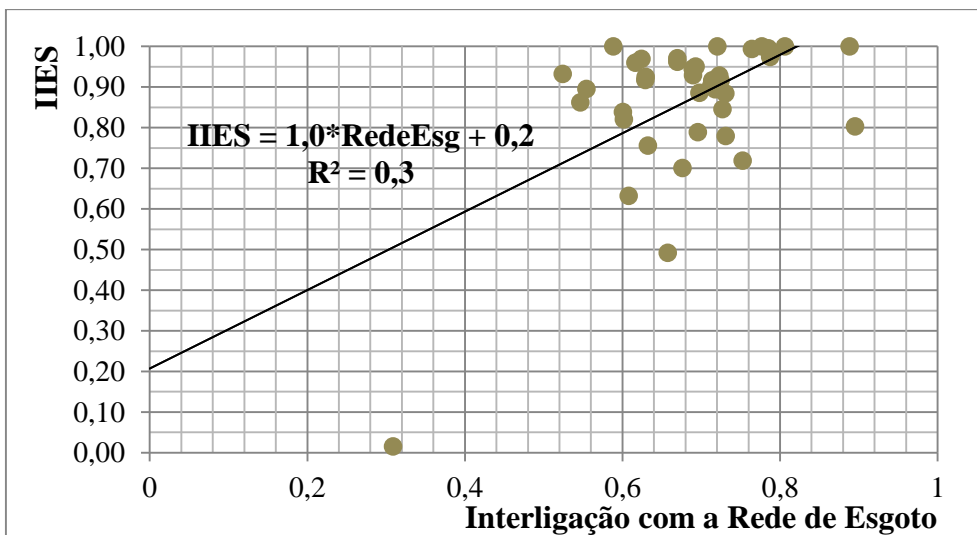


Figura 5.128. Tendência Interligação com a Rede de Esgoto vs IIES em 2010.

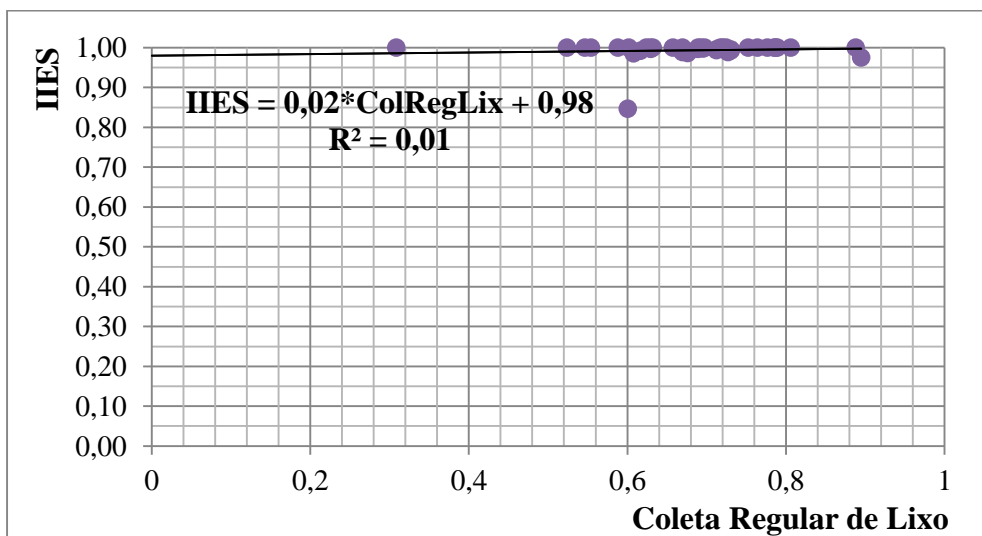


Figura 5.129. Tendência Coleta Regular de Lixo versus IIES para o ano de 2010.

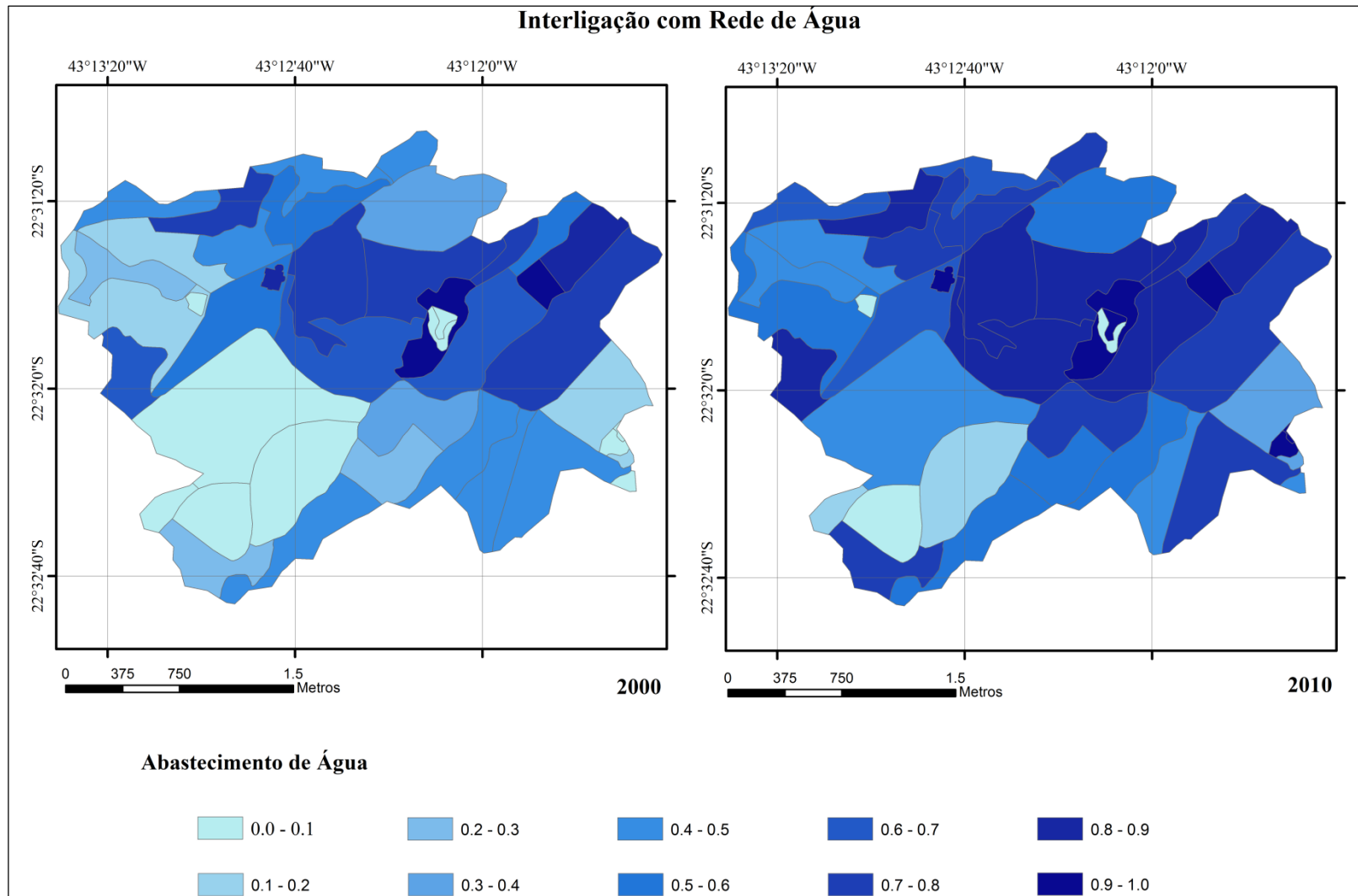


Figura 5.130. Interligação com a rede de abastecimento de água para os anos de 2000 e 2010.

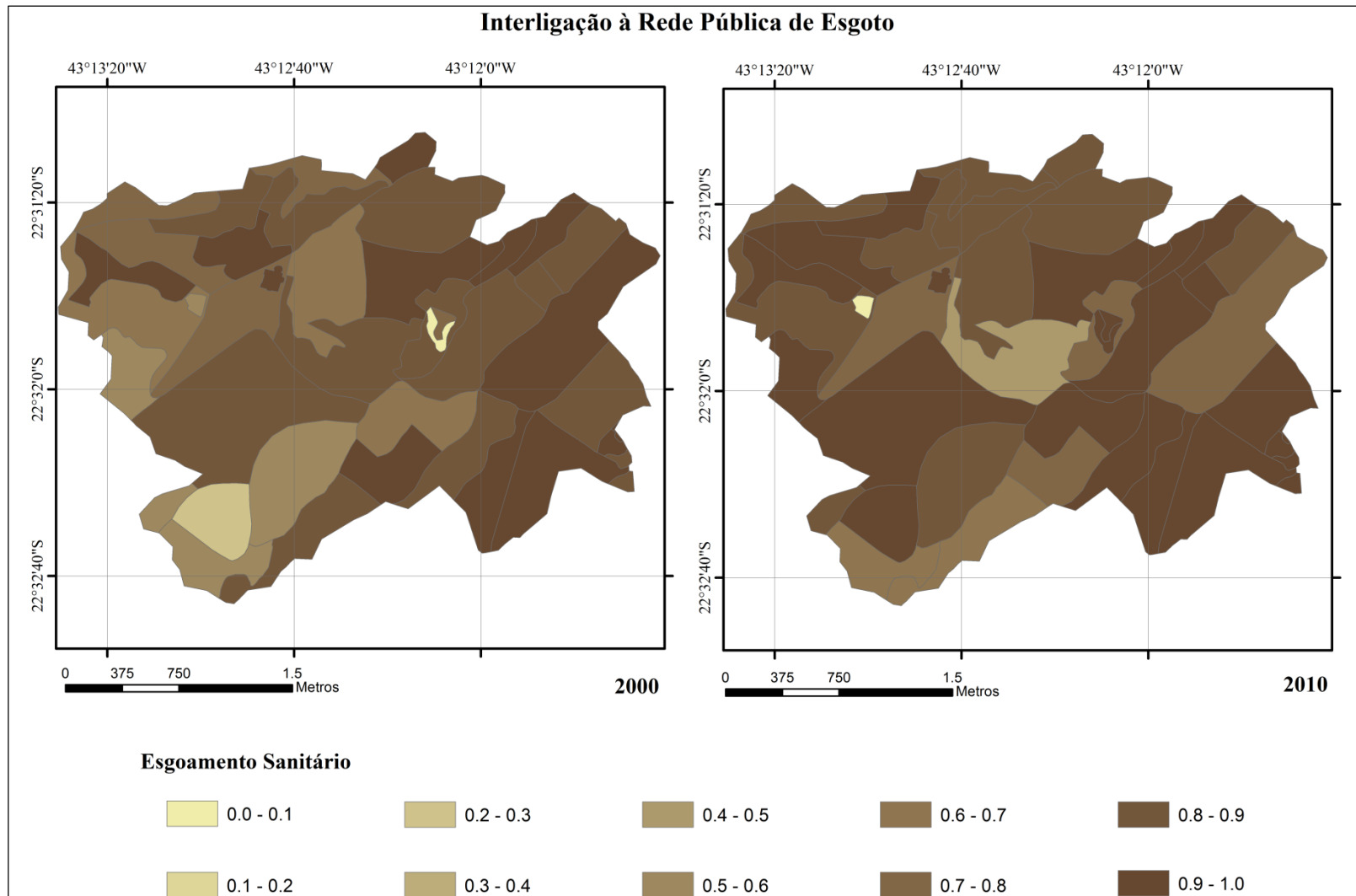


Figura 5.131. Interligação à rede pública de esgoto nos anos de 2000 e 2010.

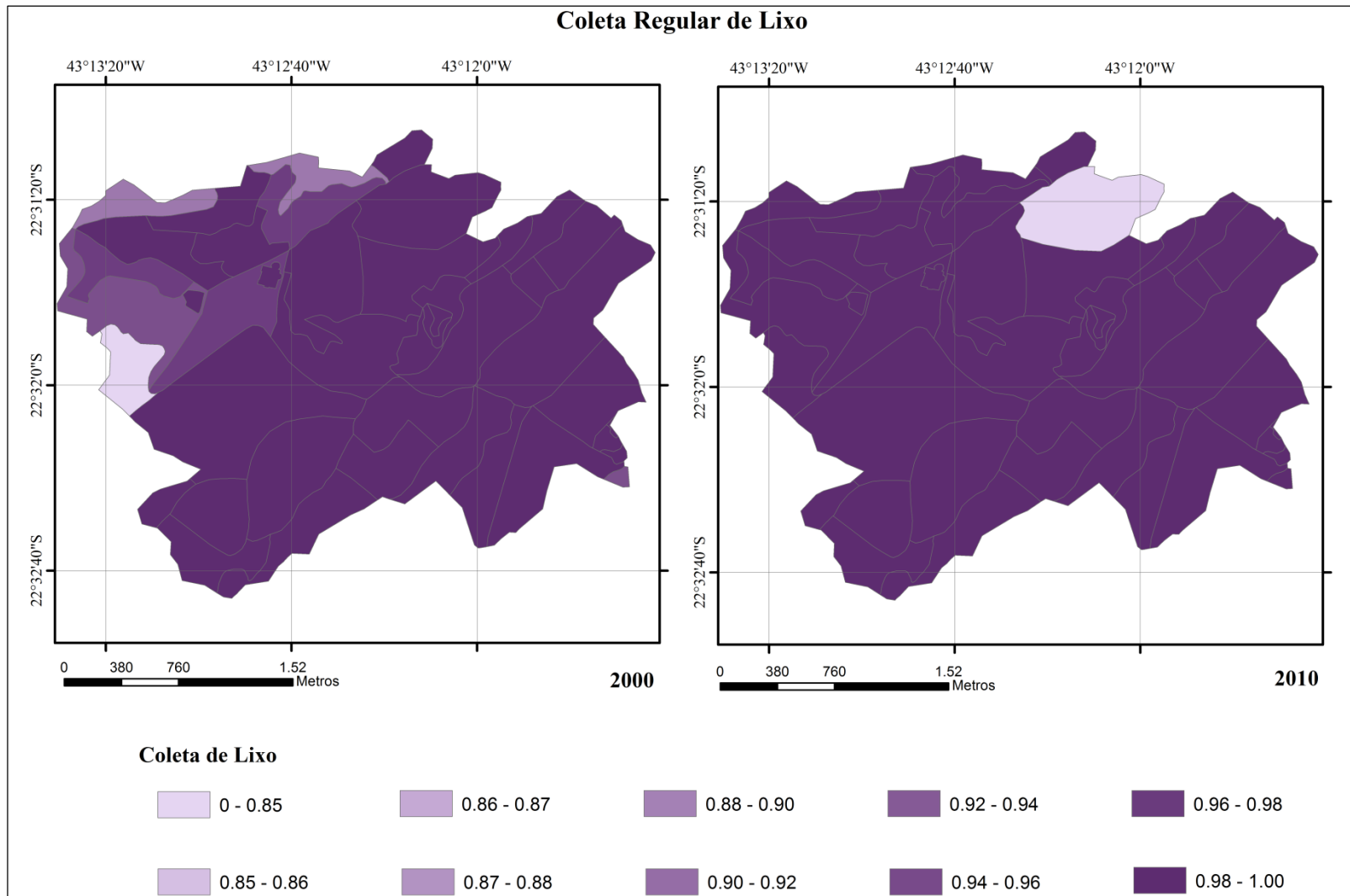


Figura 5.132. Coleta regular de lixo nos anos de 2000 e 2010.

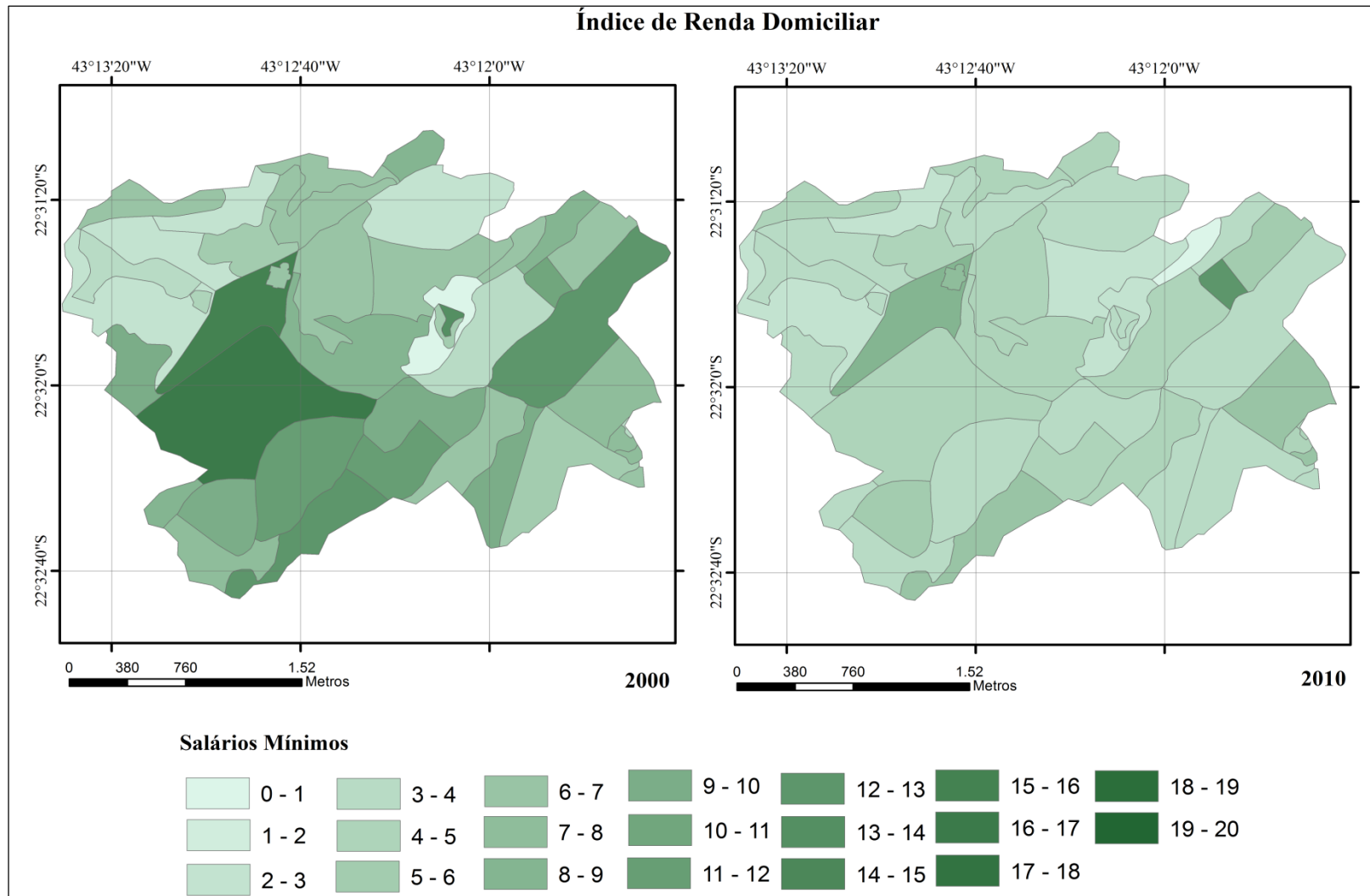


Figura 5.133. Índice de renda familiar para os anos de 2000 e 2010.

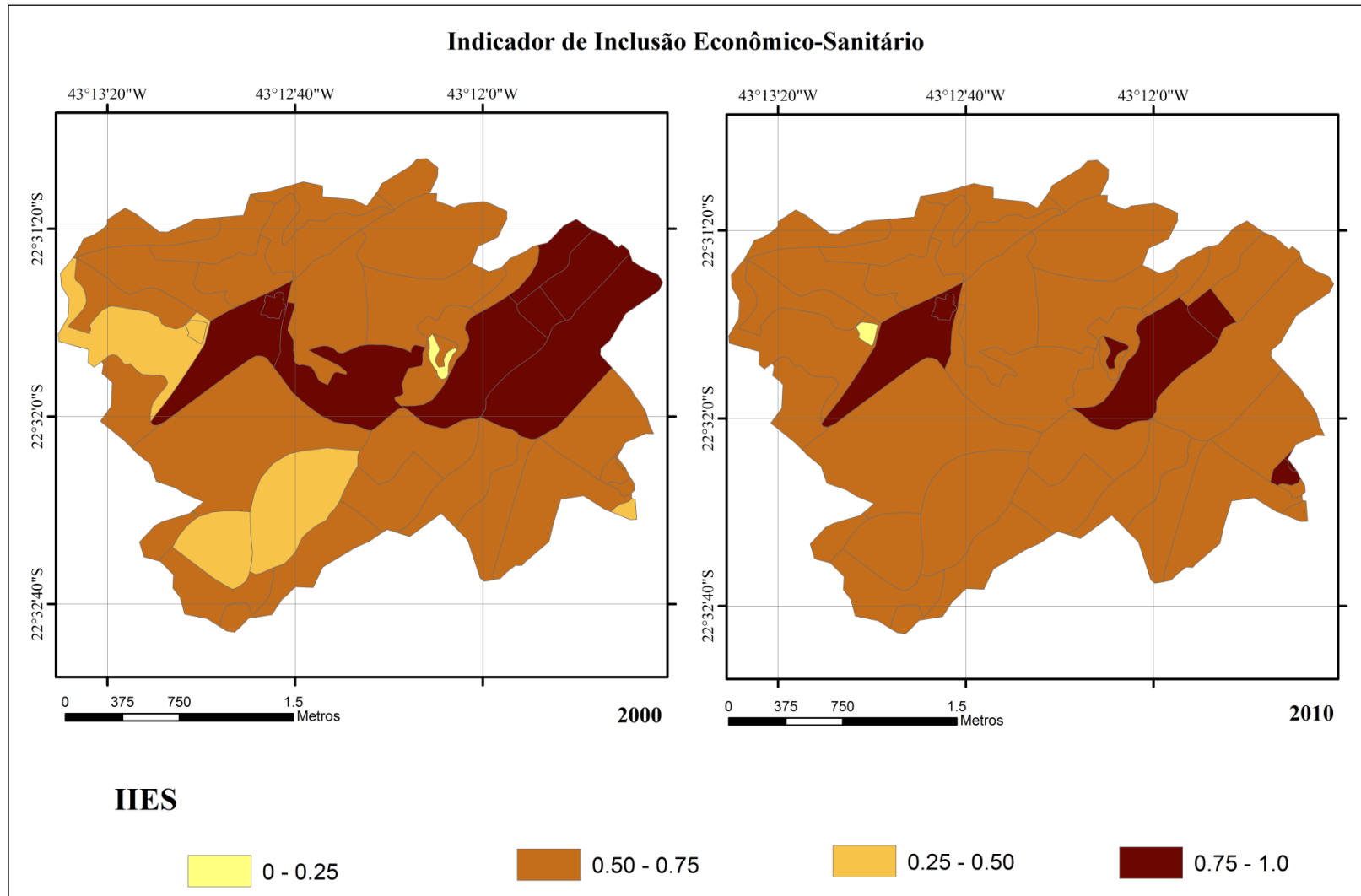


Figura 5.134. Índice de inclusão econômico-sanitário para os anos de 2000 e 2011.

A partir das informações levantadas, foi possível obter o indicador de desenvolvimento local, que possibilita a identificação de onde ocorreram retrocessos, estagnações e avanços ao longo da década de 2000 na sub-bacia do rio Quitandinha em termos dos indicadores econômico-sanitários avaliados.

Conforme exposto na Figura 5.135, a região apresentou condições de desenvolvimento local estagnadas. Em sete setores, que juntos englobam 10,7% da área total da bacia, observou-se condições de médio desenvolvimento. Em um setor, que abrange apenas 0,2% da área total da bacia, foi observado retrocesso quanto ao desenvolvimento local, fortemente relacionado à queda na abrangência da ligação da rede de esgoto, conforme citado anteriormente.

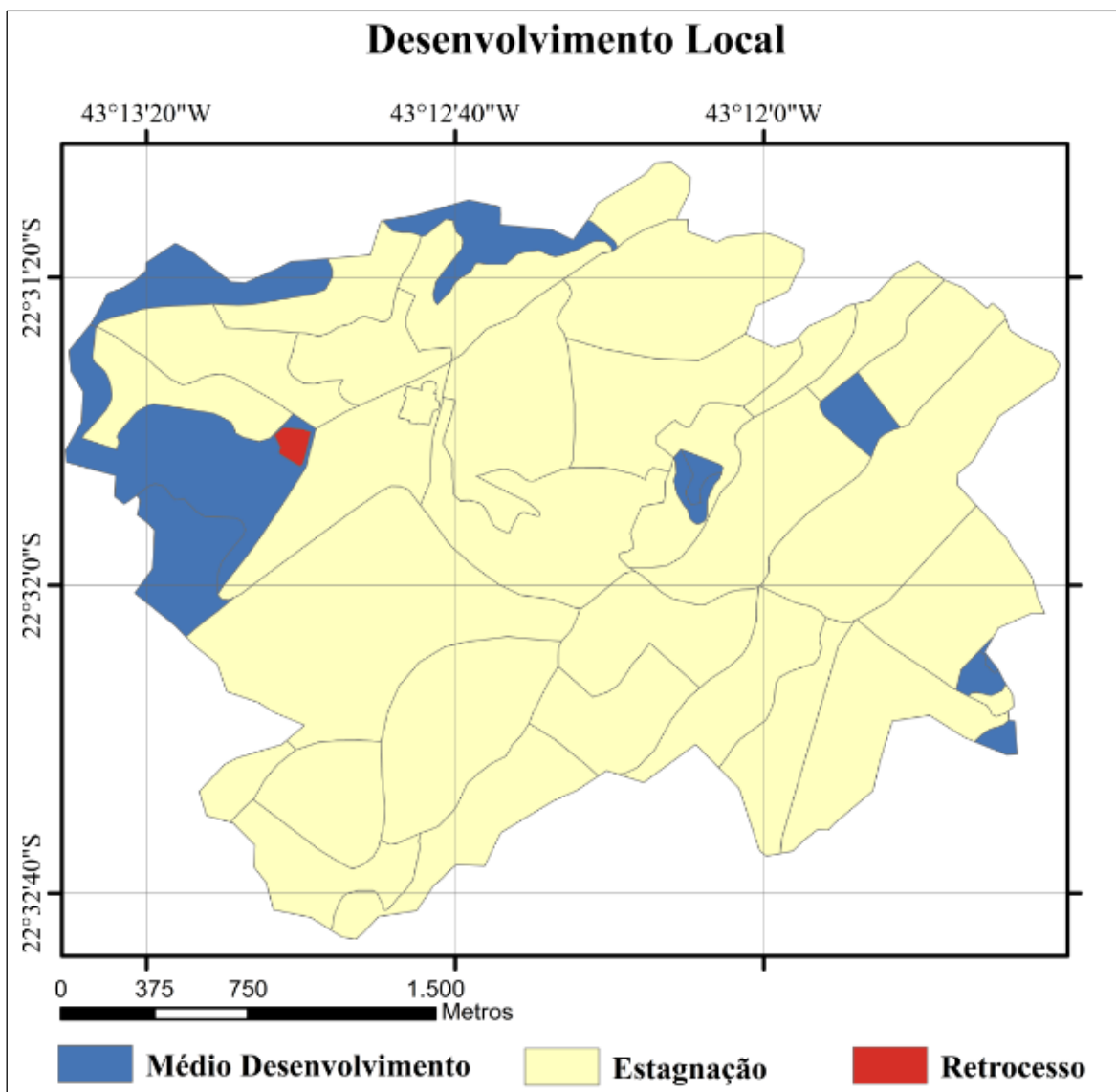


Figura 5.135. Indicador de desenvolvimento local entre os anos de 2000 e 2010.

Os resultados da relação entre o IIES para os anos de 2000 e 2010 e os dados físicos de índice de vegetação e temperatura na sub-bacia podem ser observados, a seguir, na Figura 5.136, na Figura 5.137 e na Tabela 5.16.

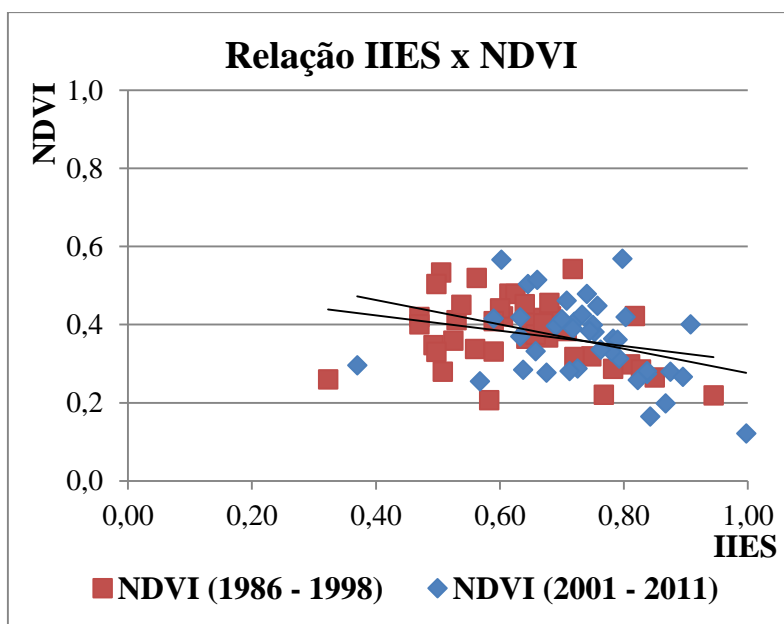


Figura 5.136. Relação entre IIES e NDVI.

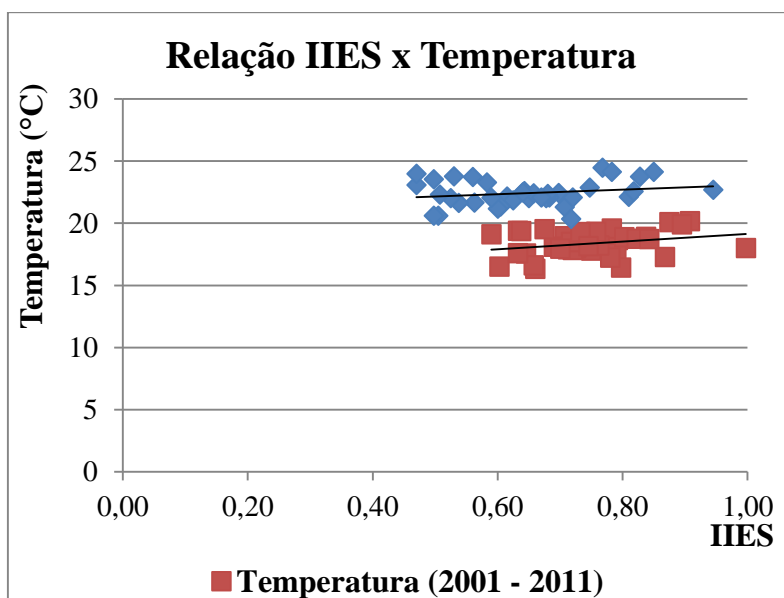


Figura 5.137. Relação entre IIES e temperatura.

Tabela 5.16. Correlação entre dados de IIES e NDVI e temperatura.

Relação	Correlação	
	1986 - 1998	2001 - 2011
IIES e NDVI	-0,29	-0,35
IIES e temperatura	0,21	0,28

Observa-se uma correlação negativa entre o IIES e o NDVI, bem como uma correlação positiva entre o IIES e a temperatura, ou seja, os setores com maior índice de inclusão econômico-sanitária situam-se, em geral, em regiões com menor índice de vegetação e maiores temperaturas.

É possível inferir que este comportamento está relacionado ao fato de que, como o índice de inclusão econômico-sanitária leva em consideração elementos ligados à infraestrutura urbana, regiões mais urbanizadas tendem a ter maiores IIES.

Paralelamente, observa-se que estagnação do desenvolvimento local anteriormente comentada é um indicativo da consolidação da ocupação no período analisado.

Dessa forma, no caso avaliado, tais regiões apresentaram, comparativamente, características áreas com menores índices de vegetação e maiores temperaturas. A avaliação preliminar revela a características de ocupação da sub-bacia, que apresenta maior acesso aos serviços urbanos e renda em regiões com maior aglomeração urbana.

Essa avaliação integrada entre os dados físicos e socioeconômicos da região permite compreender melhor seus extratos sociais e a forma como a bacia é ocupada, e expõe a potencialidade de uma avaliação integrada com dados hidrológicos e de mapeamento de riscos para a caracterização da região sob uma ótica sustentável e que considere as características da população na proposição de alternativas.

CAPÍTULO 6- CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs a avaliação espacial e temporal da paisagem mediante a utilização de geotecnologia, assumindo, como área de estudo, *a priori*, a bacia experimental do rio Piabanha situada no estado do Rio de Janeiro, e, em um segundo momento, a fim de detalhar alguns aspectos, a sub-bacia do rio Quitandinha.

Para tal, inicialmente, foi desenvolvida a estimativa de características físicas da bacia, a citar a temperatura da superfície continental (TSC), índices de vegetação e índice de umidade, com base em dados do satélite Landsat-5. Em um segundo momento, com o subsídio das informações obtidas anteriormente, foi realizada a detecção de mudanças na bacia ao longo do tempo, com base no índice de vegetação e na avaliação integrada das características da bacia em termos da relação temperatura - índice de vegetação.

Por fim, no intuito de validar as estimativas a partir do satélite Landsat-5, foi detalhada a questão da temperatura a partir das propriedades físicas dos materiais constituintes da paisagem urbana da sub-bacia do rio Quitandinha. Nessa linha, foi simulada também a influência na TSC da substituição das superfícies de concreto e fibrocimento por, respectivamente, telhados verdes e telhados brancos. Adicionalmente, foi desenvolvida a caracterização dos fatores demográficos e econômico-sanitários da sub-bacia a partir do indicador de inclusão econômico-sanitária e do índice de desenvolvimento local.

Os dados de sensoriamento remoto apresentaram grande potencial para o mapeamento qualitativo e quantitativo das mudanças e no fornecimento de parâmetros de entrada para modelos preditivos, inserindo o presente trabalho como uma contribuição na aplicação dessas ferramentas para a avaliação da paisagem e fornecendo subsídios para a gestão hídrica de bacias hidrográficas.

6.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, foi possível destacar os seguintes pontos como principais conclusões do trabalho:

- A observação dos índices de vegetação avaliados na bacia do Rio Piabanha/RJ, permitiu inferir que, entre os anos de 1986 e 1998, ocorreu a redução do vigor

vegetativo. Já entre os anos de 2001 e 2011, a variação no índice de vegetação não apresenta decrescimento direto, o que mostra um indicativo de que a variação do índice de vegetação, nesse período, está mais associada a condições climáticas do que à conversão da cobertura da terra. Quando comparadas com as condições médias do período 1998-1986 e 2011-2001, observou-se a redução do vigor vegetativo na bacia.

- Quanto à obtenção da TSC, foi possível constatar a importância das correções da emissividade, dos efeitos atmosféricos e das condições do relevo presentes na bacia, caracterizada por uma topografia acidentada e cujas influências podem levar a estimativas incorretas. Observa-se que, no primeiro período avaliado (1986 – 1998), ocorre uma redução gradativa das temperaturas na bacia. Nesse caso, as influências de outros fatores climáticos sobre a temperatura são mais significativas do que a vegetação, cujos índices tendem a diminuir ao longo do tempo. Já no segundo período avaliado (2001 - 2011), observou-se uma relação direta entre a tendência de redução dos índices de vegetação NDVI e SAVI com o aumento das temperaturas superficiais.
- A análise dos dados de precipitação nos 15 dias antecedentes aos de cada imagem, na qual foi baseada a estimativa da TSC, permitiu inferir que os picos de precipitação em dias imediatamente antecedentes apresentaram maior influência na sua redução da TSC. Como um fator de influência secundária, observou-se a precipitação acumulada nos 15 dias antecedentes.
- Na estimativa do índice de umidade, observou-se que os diagramas de dispersão apresentaram-se conforme esperado na metodologia. Os ajustes das retas representativas dos limites seco e úmido apresentaram altos coeficientes de determinação, tornando possível obter o índice de umidade do solo espacialmente. Nesse ponto, destaca-se a importância de estimativas a partir de dados existentes, principalmente no estudo de grandes áreas, onde medições pontuais mostram-se insuficientes para uma caracterização completa da região.
- A detecção de mudanças na bacia em termos do vigor vegetativo, desenvolvida a partir de imagem-diferença, permitiu a confirmação de que, no período entre 1986 e 1998, as mudanças predominantes ocorreram no sentido de diminuição do índice de vegetação, observando uma tendência de mudança com classificação de “diminuição” e de superfície já “decomposta”. Entre os anos de

1998 e 2001, observou-se classe “sem mudanças” no índice de vegetação, caracterizando tendência de superfície “decomposta”. No período entre 2001 e 2011, observaram-se condições de “crescimento” associados a áreas “sem mudanças”, intercaladas por período caracterizado pela “diminuição” do vigor vegetativo. A tendência de mudança foi, dessa forma, de “crescimento” associado à condição “estável”, seguida de “desvegetação” associada a “diminuição” e por fim de “revegetação” associada a “decomposição” vegetal.

- Em termos de mudanças relativas à avaliação simultânea dos indicadores de temperatura e índice de vegetação, salvo casos pontuais, a bacia não apresentou mudanças significativas, com destaque para as áreas de urbanização consolidada, visto que a composição dessas regiões conta com materiais que não apresentam retenção de umidade quando comparada a regiões vegetadas, havendo ainda uma constância no índice de vegetação. As mudanças ao longo do tempo são predominantemente negativas, ocorrendo, desta forma, um aumento nas condições de estresse.
- A avaliação da estimativa de TSC foi desenvolvida a partir das temperaturas obtidas pelas propriedades dos materiais urbanos constituintes da paisagem, revelando uma correlação entre os dados de 0,64, quando ampliada a escala da imagem Quickbird, e de 0,78 quando reduzida a escala do satélite Landsat-5 pela estimativa de uma superfície através do interpolador de krigagem. Destaca-se aqui novamente a importância da correção das influências do relevo, de forma a compatibilizar as estimativas a partir dos dois diferentes métodos.
- A implantação do cenário projetado para substituição dos telhados de concreto por telhados verdes, e das telhas de fibrocimento por telhados brancos permitiu observar uma redução de 0,8°C na temperatura média da área urbana na sub-bacia. Todavia, em termos práticos, é importante observar que a aplicação de soluções sustentáveis num contexto culturalmente excludente é uma tarefa complexa, que requer a informação e envolvimento da sociedade nas questões urbanas – só a participação e o conhecimento garantem o direito de cidadania. Nesse sentido, é importante que a legislação não seja elitista, e que iniciativas para implantação dos telhados verdes e brancos envolvam a população de forma ativa, não apenas normativa.

- Em relação à avaliação econômico-sanitária, observou-se que o IIES médio observado no ano de 2000 foi de 0,6, inserindo a região na classe semi-incluída. No ano de 2010, o IIES médio da bacia atingiu 0,7, ainda caracterizando condições semi-incluídas. O indicador de desenvolvimento local revela “estagnação” ao longo da década de 2000 na sub-bacia do rio Quitandinha.
- A avaliação integrada entre o indicador socioeconômico (IIES) e os indicadores físicos (NDVI e TSC) permitiu observar que a população com maior acesso aos serviços de saneamento e renda concentra-se em áreas com menor índice de vegetação e maiores temperaturas, indicando maior concentração urbana.

6.2 Recomendações

Como possíveis desdobramentos para este trabalho, destaca-se:

- consideração da influência de presença dos aerossóis no cálculo dos índices de vegetação, dado o espalhamento da radiação no visível por eles promovido;
- determinação de diretrizes para o planejamento de bacia visando a minimização dos impactos ambientais, baseado nos resultados obtidos e utilização da bacia hidrográfica como unidade de referência para o planejamento de ações;
- utilização dos resultados de detecção de mudanças e aos dados censitários para a proposição de modelos de preservação ambiental ou desmatamento supervisionado;
- emprego da caracterização dos aspectos físicos da bacia como contribuição para proposição de uma rede ótima de monitoramento hidrológico e estudos de regionalização de vazão e de variáveis hidrometeorológicas;
- estudo das correlações entre os indicadores de mudança e a caracterização econômico-sanitária da bacia;
- automatização da metodologia utilizada, obtendo informações úteis à utilização em modelos hidrológicos;
- desenvolvimento de metodologia para seleção dos pontos de envoltória utilizados nos ajustes dos limites seco e úmido para a obtenção do índice de umidade do solo (IUS);
- desenvolvimento de índice de susceptibilidade a queimadas, baseado no IUS, com inclusão de informação dos dias anteriores sem ocorrência de chuvas;

- validação da estimativa do índice de umidade a partir de dados medidos *in situ* e de outros modelos de transferência de energia solo-vegetação-atmosfera;
- estimativa da redução da demanda energética para resfriamento de edificações com a substituição de superfícies por telhados verdes e frios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, F. L. (2009) **Proposta de Modelo de Estimativa da Temperatura de Superfície Urbana Aplicando Modelo de Balanço Energético e Sensoriamento Remoto**. 86p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação da Universidade da Força Aérea, Rio de Janeiro.
- ALLEN, R.G., TASUMI, M., TREZZA, R. (2002). “**SEBAL – Surface Energy Balance Algorithms for Land – Advanced Training and User’s Manual**”. Idaho Implementation, version 1.0, 98 p.
- ALVES, H.P.F. (2004) **Análise dos fatores associados às mudanças na cobertura da terra no Vale do Ribeira através da integração de dados censitários e de sensoriamento remoto**. Textos Nepo 47, Campinas, Nepo/Unicamp.
- BARROS, V.R. (2012) **Avaliação da evapotranspiração utilizando o algoritmo Sebal e imagens Landsat5-TM– estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ**. Dissertação de mestrado. COPPE-UFRJ. 2012.
- BEERI, O.; PELED, A. (2009). Geographical model for precise agriculture monitoring with real-time remote sensing. *ISPRS J. Photogr. Remote Sensing*, 64(1): 47-54.
- BEZERRA, B. (2006) **Balanço de Energia e Evapotranspiração em Áreas com Diferentes Tipos de Cobertura de Solo no Cariri Cearense Através do Algoritmo SEBAL**. Campina Grande, 2006. 127p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFCG.
- BOIXO, S., DIAZ-VICENTE, M., COLMENAR, A. (2012). Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia, *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 425–438, 2012.
- BRASIL. **Lei 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 11 de jul. de 2001.
- CAMPBELL, J. B. (1996) **Introduction to Remote Sensing**, New York, NW, The Guilford Press, 2 ed, 1996. 662p.
- CARLSON, T. (2007). An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors* 2007, 7, 1612-1629.
- CARVALHO, S. L. (2011) **Avaliação da Poluição Urbana Difusa na Bacia do Córrego Quitandinha no Município de Petrópolis, RJ - Rio de Janeiro**. 2013. 139p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- CASTELLS, M. (1999) **A sociedade em rede. - (A era da informação: economia, sociedade e cultura; v. 1)**. - São Paulo: Paz e Terra.
- CEIVAP. Comitê para Integração da Bacia do rio Paraíba do Sul. (2002). **Relatórios do Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente da COPPE / UFRJ**:

- PGRH-RE-010-RO - Metas de racionalização de uso, Aumento da Quantidade e Melhoria da Qualidade dos Recursos Hídricos, 2002; PGRH-RE-09-RO - Diagnóstico e Prognóstico do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Paraíba do Sul, 2001; PS-RE-030-RI – Controle da Poluição Hídrica Industrial na Bacia do rio Paraíba do Sul, 1999; PS-RE-077-RO – Estudos hidrológicos, 1999; PS-RE-71-RO – Projeto Básico de Drenagem Urbana – Município de Petrópolis – Rio Quitandinha.
- CHANDER, G., MARKHAM, B.; HELDER, D. (2009) Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, 113, 893-903.
- COPPIN, P. (2004). Digital Change Detection Methods In Ecosystem Monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**. Taylor e Francis Ltd., n. 9, p. 1565-1596, 10 mai. 2004.
- DIGITAL GLOBE. (2003) **QUICKBIRD Imagery Products – Products Guide**. 2003. 54 p. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com>> Acessado em 09.10.2013.
- ERMIDA, S. L.; TRIGO, I. F.; DACAMARA, C. C.; GÖTTSCHE, F. M.; OLESEN, F. S.; HULLEY, G. (2014) Validation of remotely sensed surface temperature over an oak woodland landscape — The problem of viewing and illumination geometries. **Remote Sensing of Environment**, 148: 16-27
- FLORENZANO, T. G. (2013). **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª ed. São Paulo, Oficina de Textos.
- GONÇALVES, R.C. (2008). **Modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão via SMAP e TOPMODEL - Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação de M.Sc, Curso de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- HASSAN, Q.K.; BOURQUE, C.P.-A; MENG, F.-R.; and COX, R.M. (2007). A wetness index using terrain-corrected surface temperature and normalized difference vegetation index derived from standard MODIS products: an evaluation of its use in a humid forest-dominated region of eastern Canada. **Sensors**, 7, pp. 2028–2048.
- HAUTE, A. R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**. Volume 25, Issue 3, August 1988, Pages 295-309. Department of Soil and Water Science, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, United States
- IQBAL, M. (1983) An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, Toronto. VAN DE GRIEND, A.A., OWE, M., 1993, “On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces”, **International Journal of Remote Sensing**, vol. 14.
- JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYYA, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; and BARET, F. (2004) Review of methods for in-situ leaf area index determination. Part I.

Theories, sensors and hemispherical photography. **Agric. Forest Meteorol.**, 121, pp. 19–35

- KIEL, R. (2008). **Detecção de Mudanças no Uso e na Cobertura do Solo em uma Serie Temporal de Imagens da Região da Campanha do Rio Grande do Sul.** 203 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre, RS.
- KLING, A. S. M. (2005). **Aplicação do Método Battelle na avaliação do impacto ambiental na Bacia hidrográfica do rio Piabanha.** Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). Dissertação de Mestrado em Saúde Pública.
- KOLOKOTRONI M, GOWREESUNKER B L, GIRIDHARAN R. (2013). Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. **Energy and Buildings.**
- KURKDJIAN, M. L. N.; PEREIRA, N. M. (2006) **O Desenvolvimento das Geotecnologias e suas Aplicações no Planejamento Urbano e Plano Diretor.** REVISTA INFOGEO, Curitiba-PR, Edição Especial: Cidades, nov 2006.
- LAMBIN, E. F., and STRAHLER, A. H. (1994) Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, 48, 231–244.
- LAMBIN, E. F., and EHRLICH, D. (1997) Land-cover changes in sub-Saharan Africa, 1982–1991): application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. **Remote Sensing of Environment**, 61, 181–200.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. (2009) **Análise da paisagem com SIG.** 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 424p.
- LOU, R. F. (2010) **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ.** 2010. 190p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- LUCENA, A. J. (2012) **A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. – Rio de Janeiro.** UFRJ/COPPE. 357 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ.
- LV, Z.; ZHOU, Q. (2011) **Utility of landsat Image in the Study of Land Cover and Land Surface Temperature Change.** 3rd International Conference on Environmental. Science and Information Application Technology (ESIAT 2011)
- MENON, S., AKBARI, H.; MAHANAMA, S.; SEDNEV, I.; LEVINSON, R. (2010). Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO2 offsets. **Environ. Res. Lett.**

- MOREIRA JUNIOR, O. (2010) **O Social e o Ambiental nas Cidades Contemporâneas: Embates, Desafios e Incertezas**. Geografia (Londrina) v. 19 n. 1.
- NAGENDRA H.; LUCAS R.; HONRADO J.P.; JONGMAN R. H.; TARANTINO C.; ADAMO M.; MAIROTA P. (2012) Remote Sensing for Conservation Monitoring: Assessing Protected Areas, Habitat Extent, Habitat Condition, Species Diversity and Threats. **Ecological Indicators**. 18 de set de 2012.
- NICÁCIO, R. M. (2008) **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. 337 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ.
- NOVO, E. M. L. M. (1989) **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo. ed. Edgard Blücher, 1989, 308p.
- NUCCI, J. C. (1996) **Qualidade Ambiental e Adensamento Urbano: um estudo de planejamento da paisagem do distrito de Santa Cecília (MSP)**. 229p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PAIVA, C. M. (2005) **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. 248p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ.
- PANDEY B, SETO K. (2014). Urbanization and agricultural land loss in India: Comparing satellite estimates with census data. **Journal of Environmental Management**, 2014.
- PERES, L. F., & DACAMARA, C. C. (2004). Land surface temperature and emissivity estimation based on the two-temperature method: sensitivity analysis using simulated MSG/SEVIRI data. **Remote Sensing of Environment**, 91, 377–389.
- PERES, L.F.; SOBRINO, J.A. LIBONATI, R.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., C.C.; DACAMARA, M. (2008). Validation of a temperature emissivity separation hybrid method from airborne hyperspectral scanner data and ground measurements in the SEN2FLEX field campaign. **International Journal of Remote Sensing**, 29 (2008), pp. 7251-7268.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. (2012). **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2ª ed. São Paulo, Oficina de Textos.
- 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.
- RIBEIRO, S. B. M. (2001) **Sensoriamento remoto aplicado à detecção de mudanças na cobertura do solo de uma bacia hidrográfica**. 191p. Dissertação (Mestrado) - Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

- RIO DE JANEIRO. **Lei 6.349, de 30 de novembro de 2012.** Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “Telhado Verde” nos locais que especifica e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 03 de dez. 2012.
- ROLA, S. (2011) **Telhados verdes: pequenos pulmões para grandes cidades.** Disponível em: <www.dw-world.de/dw/article/0,,1772334_page_2,00.html>. Acesso em: 03 jun. 2014.
- ROSÁRIO, L. S. (2013) **Análise das áreas de proteção permanente com suporte de geotecnologias face a possíveis alterações no código florestal brasileiro – estudo de caso: bacia do rio Piabanha/RJ.** 2013. 146p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. (1973) **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.** In Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium. Proceedings. Washington, v.1, Sec. A, p. 309-317.
- SANTAMOURIS, M. (2014) Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy** 103, 682-703.
- SANTOS, M. (1994) **Por uma economia política da cidade: o caso de São Paulo.** - São Paulo: Editora Hucitec/EDUC.
- SCHMUGGE, T. J. (1980) Effect of texture on microwave emission from soil. IEEE. **Trans. Geosci. Remote Sensing**, GE-18, 353-361.
- SILVA, J. A.. (2004). Direito ambiental constitucional. 5. ed. São Paulo: Malheiros, 2004.
- SOARES, H. P. S. (2004) **Definição de um Índice Econômico-Sanitário para Avaliação das Condições de Saneamento na Baixada Fluminense. Estudo de Caso: Programa de Despoluição da Baía de Guanabara.** UFRJ/COPPE. 468 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Combra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ.
- SOMMER, S.; HILL, J.; MÉGIER, J. (1998) The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes and their effects on soil conditions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 67, 197-209.
- SOUZA, C. F. (2005). **Mecanismos técnico-institucionais para a sustentabilidade da drenagem urbana.** Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento ambiental da universidade federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre; Abril de 2005.
- SOUZA J., SILVA B. (2005) Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Rev Bras Geofis** 23(4):349–358, In Portuguese.

- TASUMI, M. (2003), **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. PhD dissertation. University of Idaho, Moscow, Idaho, EUA.
- TAUBENBÖCK, H.; WEGMANN; M., ROTH; A., MEHL H.; DECH, S. (2009): Urbanization in India – Spatiotemporal analysis using remote sensing data. *Computers, Environment and Urban Systems* 33. pp 179-188.
- VIRTANEN, T; EK, M. (2014). The fragmented nature of tundra landscape. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** Volume 27, Part A, April 2014, Pages 4–12 Special Issue on Polar Remote Sensing 2013.
- WOOD, C. H.; SKOLE, D. (1998) **Linking satellite, census, and survey data to study deforestation in the Brazilian Amazon**. In: LIVERMAN, D. et al. (Ed.). *People and pixel: linking remote sensing and social sciences*. Washington: National Research Council, 1998.
- WUKELIC G.; GIBBONS D.; MARTUCCI L.; FOOTE H. (1989) Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band. **Remote Sensing of Environment**, 28: 339–347.
- ZINZI, M; AGNOLI, S. (2012) Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings** 55, 66-76.

ANEXOS

ANEXO A: Algoritmo para detecção de Tendência de Mudanças

```
I=input('Inicial: ');
F=input('Final: ');

[l,c]=size(I);

for i=1:l:l
    for j=1:c:c

        %Background
        if (I(i,j)==128)
            TEN(i,j)=26;
        end

        % Partindo de -2 (Alta Diminuição)
        if ((I(i,j)==-2) & (F(i,j)==-2))
            TEN(i,j)=1;
        end

        if ((I(i,j)==-2) & (F(i,j)==-1))
            TEN(i,j)=2;
        end

        if ((I(i,j)==-2) & (F(i,j)==0))
            TEN(i,j)=3;
        end

        if ((I(i,j)==-2) & (F(i,j)==1))
            TEN(i,j)=4;
        end

        if ((I(i,j)==-2) & (F(i,j)==2))
            TEN(i,j)=5;
        end

        % Partindo de -1 (Diminuição)
        if ((I(i,j)==-1) & (F(i,j)==-2))
            TEN(i,j)=6;
        end

        if ((I(i,j)==-1) & (F(i,j)==-1))
            TEN(i,j)=7;
        end

        if ((I(i,j)==-1) & (F(i,j)==0))
            TEN(i,j)=8;
        end

        if ((I(i,j)==-1) & (F(i,j)==1))
            TEN(i,j)=9;
        end

        if ((I(i,j)==-1) & (F(i,j)==2))
```

```

TEN(i,j)=10;
end

% Partindo de 0 (Sem Mudança)
if ((I(i,j)==0) & (F(i,j)==-2))
TEN(i,j)=11;
end

if ((I(i,j)==0) & (F(i,j)==-1))
TEN(i,j)=12;
end

if ((I(i,j)==0) & (F(i,j)==0))
TEN(i,j)=13;
end

if ((I(i,j)==0) & (F(i,j)==1))
TEN(i,j)=14;
end

if ((I(i,j)==0) & (F(i,j)==2))
TEN(i,j)=15;
end

% Partindo de 1 (Crescimento)
if ((I(i,j)==1) & (F(i,j)==-2))
TEN(i,j)=16;
end

if ((I(i,j)==1) & (F(i,j)==-1))
TEN(i,j)=17;
end

if ((I(i,j)==1) & (F(i,j)==0))
TEN(i,j)=18;
end

if ((I(i,j)==1) & (F(i,j)==1))
TEN(i,j)=19;
end

if ((I(i,j)==1) & (F(i,j)==2))
TEN(i,j)=20;
end

% Partindo de 2 (Alto Crescimento)
if ((I(i,j)==2) & (F(i,j)==-2))
TEN(i,j)=21;
end

if ((I(i,j)==2) & (F(i,j)==-1))
TEN(i,j)=22;
end

if ((I(i,j)==2) & (F(i,j)==0))
TEN(i,j)=23;
end

```

```
if ((I(i,j)==2) & (F(i,j)==1))  
TEN(i,j)=24;  
end
```

```
if ((I(i,j)==2) & (F(i,j)==2))  
TEN(i,j)=25;  
end
```

```
end  
end
```