



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

LUIZ BATISTA CASTANHEIRA

VARIABILIDADE DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA
NORMALIZADA (NDVI) EM ÁREAS DE REFLORESTAMENTO: FLORESTA
ESTADUAL 'EDMUNDO NAVARRO DE ANDRADE' (FEENA)/RIO CLARO (SP)

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim

Rio Claro – SP

2013

621.3678 Castanheira, Luiz Batista
C346v Variabilidade do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
(NDVI) em áreas de reflorestamento: Floresta Estadual 'Edmundo
Navarro de Andrade' (FEENA) Rio Claro (SP) / Luiz Batista Castanheira.
- Rio Claro, 2013
127 f. : il., figs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Paulo Milton Barbosa Landim

1. Sensoriamento remoto. 2. Georreferenciamento. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. PAULO MILTON BARBOSA LANDIM - Orientador
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. SERGIO DOS ANJOS FERREIRA PINTO
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK
FCA/UNESP/Botucatu (SP)

Prof. Dr. ROBERTO WAGNER LOURENÇO
UNESP/Sorocaba (SP)

Profa. Dra. ROSÂNGELA DE OLIVEIRA COLABONE
AFA/Pirassununga (SP)

Aluno: Luiz Batista Castanheira

Resultado: Aprovado

Rio Claro, 25 de abril de 2013

***Dedico a
Tomiris e Bárbara***

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim, pelo apoio, orientação e dedicação;
- Ao Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço, por todas as discussões e indicações fundamentais sobre a melhor forma de desenvolver este trabalho;
- Ao Prof. Dr. Sergio dos Anjos Ferreira Pinto, por todas as sugestões para o melhor desenvolvimento deste trabalho;
- À Dra. Lucimari Aparecida Franco Rossetti, pela paciência, dedicação, ajuda e incentivo;
- À Dra. Teresa Maria Grubisich, pela dedicação na correção dos erros da linguagem.
- Aos meus companheiros de curso Luciano, Natale e Roseli, por todo apoio, ajuda e incentivo;
- Ao Centro de Análise e Planejamento Ambiental, CEAPLA, pelo fornecimento dos dados meteorológicos utilizados;
- Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, pelo fornecimento das imagens orbitais utilizadas;
- À Academia da Força Aérea, pelos afastamentos concedidos para a elaboração deste trabalho;
- Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma análise qualitativa da densidade e da intensidade da atividade fotossintética da vegetação com possíveis consequências no fluxo de carbono na região da Floresta Estadual “*Edmundo Navarro de Andrade*” (FEENA), por meio da variação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A FEENA é uma Unidade de Conservação e tem sua maior parte contida na área do município de Rio Claro. A cidade de Rio Claro está localizada no Centro-Leste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°05’ de Latitude Sul e 47°55’ de Longitude Oeste de Greenwich. Na análise, foram utilizadas imagens do sensor TM Landsat 5 de 1985 a 2011 e dados de temperatura e pluviosidade no mesmo período nessa região. A análise levou em consideração medidas da Estatística Descritiva de tendência central e de dispersão do NDVI e das variáveis meteorológicas, além de curvas de tendência e correlação. Foram utilizados, como ferramentas, Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e planilhas eletrônicas. As médias da série temporal do NDVI da FEENA apresentaram amplitude total 0,05 e média geral 0,67. Esses valores indicam que a Floresta manteve nesse período alta densidade e alta intensidade da atividade fotossintética de sua vegetação. Em função disso, pode-se sugerir que ocorreu variação positiva do sequestro de carbono da atmosfera na região. Nesse período a temperatura e a pluviosidade apresentaram comportamento similar em todos os anos. No entanto, não há correlação linear entre a temperatura e o NDVI, tão pouco entre a pluviosidade e o NDVI da FEENA.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Georreferenciamento. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. Reflorestamento.

ABSTRACT

This research presents a qualitative analysis of the density and intensity of vegetation photosynthetic activity with possible consequences on carbon flux in the region of the State Forest "Edmundo Navarro de Andrade" (FEENA), through the variation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Most of the FEENA, which is a Conservation Unit, is located in the area of the municipality of Rio Claro. The city of Rio Claro is located in the Center-East of the State of São Paulo, between the coordinates 22° 05 ' South Latitude and 47° 55 ' Longitude West of Greenwich. In the analysis, images from Landsat 5 TM sensor from 1985 to 2011 and temperature and pluviosity data for the same period in this region were used. The analysis took into account Descriptive Statistics measures of central tendency and dispersion of NDVI and weather variables, besides correlation and trend curves. Geographical Information Systems (GIS) and spreadsheets were used as tools. The average of time series NDVI of FEENA showed full range 0.05 and overall average 0.67. These values indicate that high density and high intensity of photosynthetic activity of forest vegetation were stable during this period. Because of this, it can be suggested that increase of carbon sequestration from the atmosphere in the region occurred. In this period, temperature and pluviosity showed similar behavior presenting yearly. However, there is no linear correlation between the temperature and the NDVI and none between the pluviosity and NDVI of the FEENA.

Keywords: Remote Sensing. Georeferencing. Normalized Difference Vegetation Index. Reforestation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - População rural e urbana do Brasil entre 1950 a 2000.....	18
Figura 2 - Carta Imagem da localização da área de estudo.....	46
Figura 3 - Fazendas que deram origem ao Horto Florestal de Rio Claro.....	48
Figura 4 - Mapa geológico da FEENA.....	50
Figura 5 - Hidrografia da FEENA	52
Figura 6 - Divisão da FEENA em talhões.....	54
Figura 7 - Evolução temporal do plantio de eucaliptos na FEENA.....	56
Figura 8 - Temperatura média dos biênios referentes às imagens orbitais.....	70
Figura 9 - Temperatura média dos biênios referentes às imagens orbitais.....	70
Figura 10 - Médias das temperaturas médias mensais referentes ao Horto.....	71
Figura 11 - Médias das temperaturas médias mensais à Estação do CEAPLA....	72
Figura 12 - Média das temperaturas médias mensais.	74
Figura 13 - Média mensal da pluviosidade entre 1985 e 2011.....	80
Figura 14 - Pluviosidade anual na região da FEENA.....	81
Figura 15 - Localização dos pontos de controle nas imagens.....	83
Figura 16 - Carta imagem do NDVI de 1985 da região da FEENA/Rio Claro	85
Figura 17 - Carta imagem do NDVI de 1987 da região da FEENA/Rio Claro	85
Figura 18 - Carta imagem do NDVI de 1989 da região da FEENA/Rio Claro	86
Figura 19 - Carta imagem do NDVI de 1991 da região da FEENA/Rio Claro	86
Figura 20 - Carta imagem do NDVI de 1993 da região da FEENA/Rio Claro	87
Figura 21 - Carta imagem do NDVI de 1995 da região da FEENA/Rio Claro	87
Figura 22 - Carta imagem do NDVI de 1997 da região da FEENA/Rio Claro	88
Figura 23 - Carta imagem do NDVI de 1999 da região da FEENA/Rio Claro	88
Figura 24 - Carta imagem do NDVI de 2001 da região da FEENA/Rio Claro	89
Figura 25 - Carta imagem do NDVI de 2003 da região da FEENA/Rio Claro	89
Figura 26 - Carta imagem do NDVI de 2005 da região da FEENA/Rio Claro	90
Figura 27 - Carta imagem do NDVI de 2007 da região da FEENA/Rio Claro	90
Figura 28 - Carta imagem do NDVI de 2009 da região da FEENA/Rio Claro	91
Figura 29 - Carta imagem do NDVI de 2011 da região da FEENA/Rio Claro	91
Figura 30 - Carta imagem do NDVI da FEENA de 1985 a 2011	92
Figura 31 - Histogramas do NDVI de 1985 a 2011	97

Figura 32 - Médias e curva de tendência do NDVI na FEENA.....	100
Figura 33 - Talhões do plantio de 1983 a 1986.....	101
Figura 34 - Talhões do plantio de 1987 e 1988.....	102
Figura 35 - Talhões do plantio de 1987 e 1988.....	103
Figura 36 - Imagens “falsa cor” R3G4B5 da FEENA de 1985 a 2001.....	104
Figura 37 - NDVI e pluviosidade do Posto do Horto Florestal.....	108
Figura 38 - NDVI e pluviosidade da Estação Meteorológica do CEAPLA.....	109
Figura 39 - Dispersão entre NDVI e temperatura do Posto do Horto.....	110
Figura 40 - Dispersão entre NDVI e temperatura do Posto do Horto.....	110
Figura 41 - Médias do NDVI e da pluviosidade.....	111
Figura 42 - Dispersão entre médias de NDVI e pluviosidade.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reuniões do COP	16
Tabela 2 - Descrição de alguns dos principais Índices de Vegetação	35
Tabela 3 - Quantidade de árvores plantadas e remanescentes.....	55
Tabela 4 - Dados das imagens utilizadas do sensor TM LANDSAT 5	58
Tabela 5 - Resoluções do sensor TM LANDSAT 5	59
Tabela 6 - Discriminação das faixas espectrais do sensor TM Landsat 5	60
Tabela 7 - Médias da temperatura do Posto Meteorológico do Horto Florestal	67
Tabela 8 - Médias da temperatura da Estação Meteorológica do CEAPLA.....	68
Tabela 9 - Médias bianuais da temperatura da região da área de estudo	69
Tabela 10 - Média das temperaturas média mensais.	74
Tabela 11 - Média do valor da pluviosidade anual em cada biênio.....	82
Tabela 12 - Erro Quadrático Médio do Georreferenciamento	84
Tabela 13 - Dados estatísticos do NDVI	96
Tabela 14 - Frequência relativa do NDVI na FEENA	99
Tabela 15 - Discriminação do plantio nos talhões em 1983/84	101
Tabela 16 - Discriminação do plantio nos talhões em 1987/88.....	102
Tabela 17 - Discriminação do plantio nos talhões em 1989/90.....	103
Tabela 18 - Pontos de controle para o georreferenciamento das imagens.....	122
Tabela 19 - Valor mínimo dos Números Digitais por banda.....	122
Tabela 20 - Valores mensal/anual da precipitação pluviométrica.	123
Tabela 21 - Coeficiente de definição das curvas de tendência da temperatura ..	124
Tabela 22 - Discriminação do plantio na FEENA de 1909 a 1920	124
Tabela 23 - Discriminação do plantio na FEENA de 1921 a 1930	125
Tabela 24 - Discriminação do plantio na FEENA de 1931 a 1940	125
Tabela 25 - Discriminação do plantio na FEENA de 1941 a 1950	125
Tabela 26 - Discriminação do plantio na FEENA de 1951 a 1960	126
Tabela 27 - Discriminação do plantio na FEENA de 1961 a 1970	126
Tabela 28 - Discriminação do plantio na FEENA de 1971 a 1980	126
Tabela 29 - Discriminação do plantio na FEENA de 1981 a 1990	127
Tabela 30 - Medidas estatísticas do NDVI na FEENA.	127

LISTA DE ABREVIATURAS

ALL	<i>América Latina Logística</i>
CAP	<i>Circunferência à Altura do Peito</i>
CEAPLA	<i>Centro de Análise e Planejamento Ambiental</i>
CMMAD	<i>Comissão Mundial Sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento</i>
COP	<i>Conferência das Pares</i>
CPEF	<i>Companhia Paulista de Estradas de Ferro</i>
CV	<i>Coeficiente de Variação</i>
DAP	<i>Diâmetro à Altura do Peito</i>
DP	<i>Desvio Padrão</i>
FAO	<i>Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação</i>
FRB	<i>Fator de Reflectância Bidirecional</i>
FEENA	<i>Floresta Estadual "Edmundo Navarro de Andrade"</i>
FEPASA	<i>Ferrovias Paulista S.A.</i>
GEE	<i>Gases de efeito estufa</i>
IAF	<i>Índice de Área Foliar</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
IPCC	<i>"Intergovernmental Panel on Climate Change"</i>
IPT	<i>Instituto de Pesquisas Tecnológicas</i>
IV	<i>Índice de Vegetação</i>
LANDSAT	<i>"Land Remote Sensing Satellite"</i>
LBA	<i>Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia</i>
LULUCF	<i>"Land Use, Land Use Change and Forestry"</i>
MAB	<i>"The Man and the Biosphere Programme"</i>
MMA	<i>Ministério do Meio Ambiente</i>
MNT	<i>Modelo Numérico de Terreno</i>
NDVI	<i>"Normalized Difference Vegetation Index"</i>
NDWI	<i>"Normalized Difference Water Index"</i>
NOAA	<i>Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
PIB	<i>Produto Interno Bruto</i>
PNMC	<i>Política Nacional de Mudança do Clima</i>
PPM	<i>Porção Por Milhão</i>
RVI	<i>"Ratio Vegetation Index"</i>
REM	<i>Radiação Eletromagnética</i>
RMS	<i>"Root Mean Square"</i>
RPPN	<i>Reserva Particular de Patrimônio Natural</i>
SFB	<i>Serviço Florestal Brasileiro</i>
SIG	<i>Sistema de Informações Geográficas</i>
SR	<i>Sensoriamento Remoto</i>
TM	<i>"Thematic Mapper"</i>
UNESCO	<i>"United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization"</i>
UNFCCC	<i>Convenção Quatro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas</i>
UNFCCC	<i>"Framework Convention on Climatic Change"</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos gerais.....	23
1.2	Objetivos específicos.....	23
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1	Ciclo do Carbono.....	24
2.2	Sensoriamento Remoto.....	25
2.3	Índices de Vegetação	29
2.4	Sistemas de Informações Geográficas.....	36
2.5	Revisão bibliográfica	37
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
3.1	Breve histórico da FEENA.....	47
3.2	Características geológicas, geomorfológicas e pedológicas da região	49
3.3	Cobertura do solo e uso da terra.....	53
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1	Materiais.....	57
4.1.1	Base Cartográfica.....	57
4.1.2	Dados meteorológicos.....	57
4.1.3	Imagens de satélite	58
4.2	Métodos.....	61
4.2.1	Análise estatística.....	61
4.2.2	Elaboração da Base Cartográfica e do Mapa da FEENA.....	63
4.2.3	Tratamento dos dados meteorológicos	63
4.2.4	Determinação do NDVI.....	64
4.2.4.1	Tratamento das imagens.....	64
4.2.4.2	Registro das imagens.....	64
4.2.4.3	Minimização do efeito da atmosfera	65
4.2.4.4	Cálculo do NDVI.....	65

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
5.1	Análise da variabilidade de parâmetros meteorológicos	67
5.1.1	Temperatura.....	67
5.1.2	Pluviosidade	79
5.2	As imagens geradas por NDVI	82
5.3	Análise da cobertura vegetal da FEENA por meio do NDVI.....	92
5.4	Relação entre a temperatura e o NDVI	108
5.5	Relação entre pluviosidade e NDVI.....	111
6.	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
	ANEXO	122

1. INTRODUÇÃO

Na história do desenvolvimento social do homem, em relação ao comportamento antrópico, dois grandes momentos podem ser destacados. O primeiro refere-se a sua fixação à terra em função do surgimento da agricultura e criação de animais, ambos para consumo. O segundo refere-se à Revolução Industrial, quando a forma de produção de bens de consumo foi muito alterada e sua capacidade muito aumentada (DIAS, 2005).

Autores como Michulin (1960), Dias (2005), Rezende (2005) e Vicentino (2008) descreveram os processos de interação do homem com o meio ambiente que ocasionaram e ocasionam até os dias atuais, mudanças significativas em ambos.

Rezende (2005) afirmou que, no decorrer do período de 7.000 a 3.000 AC, o homem deixou de ser nômade, passou a formar grupos maiores, construiu aglomerados nos locais onde se fixava e, como consequência, passou a estabelecer um novo tipo de relacionamento social e com a natureza. Surgiram assim as primeiras vilas e, posteriormente, as primeiras cidades.

Segundo Dias (2005), com o aumento da concentração humana em um mesmo local, ocorreu melhoria das condições de vida e houve consequente crescimento demográfico aumentando, assim, o consumo de bens naturais, e, quanto maiores essas concentrações, maiores foram as modificações causadas por esse consumo desmedido ao meio ambiente natural no entorno desses aglomerados. Em função da agricultura o homem passou a se fixar em locais mais adequados ao seu desenvolvimento, na maior parte dos casos, às margens de grandes rios.

Já a Revolução Industrial, que teve início na Inglaterra durante as últimas décadas do século XVIII e se espalhou praticamente por todas as partes do planeta, caracterizou-se principalmente pela substituição do trabalho manufaturado pelo fabril, que tinha como base máquinas a vapor que passaram a produzir bens de consumo em grande escala, o que acarretou um processo de transformação social, econômica e no meio ambiente (REZENDE, 2005).

Michulin (1960) e Vicentino (2008) afirmaram que a Revolução Industrial provocou crescimento econômico, melhora nas condições de vida para a população e aumento demográfico. Mas, como consequência dela, ocorreu o aumento da concentração populacional, o que ocasionou a demanda por grande quantidade de

energia, consumo excessivo de recursos naturais, alguns não renováveis, e problemas de degradação ao meio ambiente.

De acordo com Rezende (2005), na Inglaterra, por volta de 1850, a maior parte da população já vivia nas cidades, e cerca de um terço dos ingleses naquelas com população acima de 50.000 habitantes. O êxodo para as cidades, provocado pela Revolução Industrial acarretou problemas relacionados ao abastecimento de água, à coleta de esgoto, ao surgimento de epidemias, à degradação do meio ambiente e outros que são constatados até os dias atuais. Esse processo não ocorreu somente na Inglaterra, mas em todas as regiões afetadas por essa Revolução.

Dias (2005) afirmou ainda que o impacto da industrialização sobre o meio ambiente, em relação aos seus recursos, não foi levado em consideração durante o primeiro século da Revolução Industrial e, dessa forma, os recursos naturais foram se esgotando. Como exemplo, na Europa, no século XIX, o desmatamento para obtenção de carvão e de novas áreas para a produção agrícola fez desaparecer a maior parte da cobertura vegetal natural deste continente.

Segundo o mesmo autor, a partir da Revolução Industrial, a emissão de CO₂ para a atmosfera aumentou em função da aceleração do consumo de energia, baseada, principalmente, na queima de combustíveis fósseis. Como consequência, aumentou significativamente a concentração do dióxido de carbono e de outros gases causadores do efeito estufa provocando seu aumento, que por sua vez vem acarretando mudanças no clima da Terra nos últimos 250 anos.

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre em função da absorção da radiação infravermelha, emitida pela superfície terrestre, por alguns gases concentrados na atmosfera e ocasiona aumento da temperatura da superfície. O efeito estufa pode ser considerado como um processo que mantém a amplitude térmica da superfície terrestre de forma que a vida nela se mantenha. Em função desse processo, a temperatura média da superfície do planeta é mantida em torno de 16°C. Dentre esses gases, os principais são: o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o ozônio (O₃) e o óxido nitroso (N₂O). Segundo Dias (2005), esse fenômeno é um dos responsáveis pela manutenção da vida na Terra; no entanto, o aumento da concentração de alguns desses gases na atmosfera terrestre, principalmente do CO₂, provoca aquecimento acima do normal e, em função disso, alterações no clima de todo o planeta.

De acordo com Rezende (2005) e Dias (2005), a relação entre o homem e a natureza quase sempre foi desfavorável a ela, pois, desde a sua origem, suas ações a têm degradado. Somente nas últimas décadas do século XX, a visão de que os recursos naturais eram inesgotáveis e estariam sempre disponíveis começou a ser questionada e revista, pois já era evidente que alguns desses recursos energéticos estavam se esgotando. Um fato que pode ter colaborado para esse questionamento foi que, nesse período, a produção mundial da indústria teve aumento significativo, acarretando maior consumo de recursos naturais, em relação ao que já era consumido depois da Revolução Industrial.

Após ter degradado a maior parte de seu meio ambiente, os países do primeiro mundo iniciaram um processo de conscientização sobre a necessidade de se preservar e recuperar o meio ambiente. Assim, inúmeros encontros e conferências entre representantes governamentais de vários países, cientistas e demais interessados, foram realizados. Dentre esses, as Conferência das Partes (COP–*Conference of Parties*), apresentadas na Tabela 1, tiveram como resultado acordos e maior participação de governos e organizações não governamentais nas questões ambientais, por meio de propostas que racionalizam a relação entre o homem e o meio ambiente, dando maior sustentabilidade ao constante desenvolvimento da humanidade (COP, 2011).

Tabela 1 - Reuniões do COP

COP	Cidade/País	Ano
1	Berlin/Alemanha	1995
2	Genebra/Suíça	1996
3	Kyoto/Japão	1997
4	Buenos Aires/Argentina	1998
5	Bonn/Alemanha	1999
6	Haía/Holanda	2000
6,5	Bonn/Alemanha	2001
7	Marrakesh/Marrocos	2001
8	Nova Déli/Índia	2002
9	Milão/Italia	2003
10	Buenos Aires/Argentina	2004
11	Montreal/Canadá	2005
12	Nairóbi/Quênia	2006
13	Bali/Indonésia	2007
14	Poznan/Polônia	2008
15	Copenhague/Dinamarca	2009
16	Cancúm/México	2010
17	Durban/África doSul	2011

Fonte: Framework Convention on Climatic Change (UNFCCC, 2011)

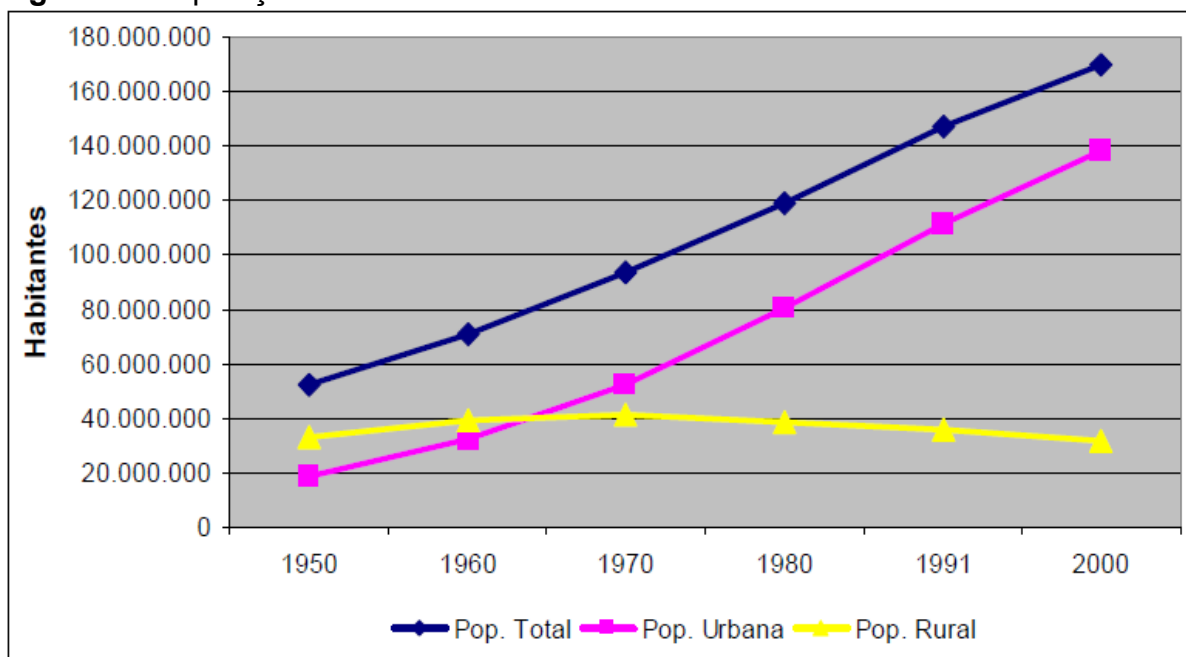
Nesse processo, em 1997, foi assinado no Japão o Protocolo de Kyoto, convenção para firmar compromisso dos países desenvolvidos para diminuir a emissão de gases que incrementam o efeito estufa. Esse protocolo incentiva a pesquisa, o desenvolvimento e o uso de tecnologias de sequestro de carbono. Ele foi efetivado e vigorou a partir de fevereiro de 2005, dando início ao Mercado de Créditos de Carbono (COP, 2011).

Dentre as medidas para solucionar um dos problemas relacionados ao meio ambiente, o da poluição do ar, pode-se destacar o melhor planejamento das cidades e a proteção, manutenção e criação de áreas verdes no seu entorno.

No Brasil em 1929, o então presidente Washington Luís apoiou a candidatura de Júlio Prestes, que venceu as eleições presidenciais realizadas em março do ano seguinte. Mas, Júlio Prestes não chegou a tomar posse, em virtude do Golpe de Estado, denominado Revolução de 1930, que instituiu um governo provisório sob o comando de Getulio Vargas. Nesse contexto as oligarquias com interesses agrários foram afastadas do poder e foi adotada uma política de desenvolvimento industrial, o que provocou o aumento do êxodo rural para as cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo, fato que já ocorria em função da decadência da cafeicultura e dos movimentos migratórios nordestinos. Esses fatores podem ser considerados responsáveis pela grande concentração espacial da indústria, principalmente nas capitais dos estados de São Paulo, do Rio de Janeiro, de Minas Gerais e do Rio Grande do Sul (DIAS, 2005; FAUSTO, 2012).

A rápida industrialização brasileira que ocorreu após a Segunda Guerra Mundial aumentou o êxodo rural para as cidades e, no final do século XX, a população urbana do Brasil praticamente dobrou e ultrapassou a população rural na década de sessenta, como mostra a Figura 1. Nesse cenário, maiores desequilíbrios ambientais ocorreram, e os espaços urbanos não receberam a devida atenção, ocasionando problemas ambientais que se verificam até os dias atuais como a poluição e a destruição de recursos naturais (IBGE, 2011).

Figura 1 - População rural e urbana do Brasil entre 1950 a 2000.



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2011.

Em função do desenvolvimento industrial e urbano houve aumento na emissão de poluentes para a atmosfera, danos a florestas naturais e desequilíbrio em ecossistemas. Somente no final do século XX, o Brasil começou a enfrentar o desafio de compatibilizar o seu desenvolvimento com a preservação ambiental.

Os grandes impactos ambientais não ocorreram somente nas cidades e no entorno delas, mas também em regiões mais afastadas devido à construção de grandes empreendimentos de engenharia, exploração de minérios, construção de vias de transporte e da expansão agropecuária (IBGE, 2011).

Segundo o Instituto Carbono Brasil (ICB, 2011), foi divulgado pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (NOAA) que, entre 2009 e 2010, a concentração de GEEs na atmosfera cresceu 2%. O nível de CO₂, que antes da Revolução Industrial era de 280 Porção Por Milhão (PPM), chegou a 289 ppm no ano de 2011.

De acordo com Dias (2005), até cerca de 30 anos atrás, a poluição atmosférica urbana brasileira era atribuída basicamente às indústrias que, em geral, se concentravam em grandes núcleos populacionais. Entretanto, tem-se demonstrado que a falta de um melhor planejamento das cidades e a não proteção, manutenção e implantação de áreas verdes, também corroboram para que essa poluição aumente.

Conforme dados do Ministério da Ciência e Tecnologia, divulgados em 1994, o setor industrial foi responsável por cerca de 27% das emissões de dióxido de carbono, enquanto o restante decorreu em função de desmatamentos e da atividade de preparação de áreas agrícolas.

Em 2009, foi instituída a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei 12.187/2009. De acordo com o Comitê de Política Nacional de Mudança do Clima, definiu-se que as emissões totais de CO₂ projetadas para 2020 serão compostas pelos setores: Mudança de Uso da Terra, Energia, Agropecuária, Processos Industriais e Tratamento de Resíduos. Assim, segundo esse mesmo Comitê, ações que devem ser tomadas para minimizar os impactos desta emissão são: a redução em 80% dos índices anuais de desmatamento na Amazônia Legal em relação à média entre 1996 e 2000; a redução de 40% dos índices de desmatamento no Bioma Cerrado em relação à média entre 1999 e 2008; a expansão da oferta de energia hidroelétrica e de fontes alternativas renováveis, de bicomustíveis e incremento na eficiência energética; a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas; a implantação de sistemas lavoura-pecuária-florestas em 4 milhões de hectares; expansão da prática de plantio direto na palha em 8 milhões de hectares; a expansão da fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares de áreas de cultivo, em substituição ao uso de fertilizantes nitrogenados; a expansão do plantio de florestas em 3 milhões de hectares; a aplicação do uso de tecnologias para tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos de animais; e o incremento da utilização da siderurgia do carvão vegetal originário de florestas plantadas e melhoria na eficiência do processo de carbonização.

Segundo o Instituto Brasileiro de Florestas (IBF, 2011), a forma mais comum de sequestro de carbono é realizada pelas florestas. A fase de crescimento das árvores demanda grande quantidade de carbono, o que provoca o sequestro do dióxido de carbono da atmosfera. No desenvolvimento de florestas, a absorção de CO₂ pode ficar entre 150 e 200 toneladas de carbono por hectare. O plantio de árvores compensa parte das emissões de carbono para a atmosfera.

Cavallet e De Paula (2011) afirmaram que uma das formas recomendadas para minimizar o efeito estufa é o sequestro de carbono por meio do desenvolvimento de árvores e, conseqüentemente, de biomassa florestal. Uma árvore absorve em média 0,8 toneladas (Mg – Mega gramas, 10⁶ g) de CO₂ da atmosfera, até atingir o seu clímax, que pode variar entre 20 e 40 anos.

De acordo com Jensen (2007), a vegetação, que ocupa cerca de 70% da superfície terrestre, é o principal componente dos ecossistemas. Em função disso, são valiosas as informações sobre os padrões de sua distribuição, espécies de sua comunidade, alterações no seu crescimento, modificações em sua morfologia e fisiologia, além de como exercem influência sobre ela as variáveis climáticas, as características geológicas e fisiográficas da área que a contém.

Segundo o Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2011), unidade do Ministério do Meio Ambiente, os principais bens e serviços que os ecossistemas florestais fornecem são: matéria prima; material genético; alimento; produtos farmacêuticos; controle biológico; controle de erosão e distúrbios climáticos como tempestades, enchentes e secas; controle da sedimentação e da poluição; conservação e armazenamento de águas em bacias hidrográficas, reservatórios e aquíferos; recreação; proteção de habitat utilizado na reprodução e emigração de espécies animais; regulação dos níveis de gases atmosféricos poluentes e de gases que afetam o clima como o dióxido de carbono; e ciclagem de minerais. Bens e serviços não são exclusivos de florestas nativas, estes podem também ser fornecidos por florestas plantadas. Todos os setores produtivos estão de alguma forma, ligados a produtos florestais. Há estimativas de que 4% do Produto Interno Bruto brasileiro decorram de florestas e que o setor econômico envolvido seja responsável por cerca de seis milhões de empregos diretos e indiretos.

Alem disso, de acordo com Dixon et al. (1993), as florestas, por meio da assimilação, estocagem e emissão, desempenham papel extremamente importante no ciclo do carbono, em relação ao seu sequestro da atmosfera pela fotossíntese e à sua emissão por meio da transpiração.

Bacha e Barros (2004) definiram que, em relação à biodiversidade, as florestas nativas podem ser consideradas como uma das maiores riquezas de um país, pois sua variedade em organismos vivos tem alto valor econômico, como princípios ativos de plantas, fonte de alimentos e de habitat para reprodução vegetal e animal.

De acordo com o sistema de classificação do IBGE (2004), ocorrem no Brasil as seguintes categorias de vegetação: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, Campinarana (florestada e arborizada), Savana (florestada e arborizada) – Cerradão e Campo-Cerrado, Savana Estépica (florestada

e arborizada) – Caatinga arbórea, Estepe (arborizada), Vegetação com influência marinha e fluviomarina (arbóreas), Vegetação remanescente em contatos em que pelo menos uma formação seja florestal, Vegetação secundária em áreas florestais e reflorestamento.

Segundo IBGE (2004), as florestas no Brasil podem ser divididas em Amazônica, na região Norte; Tropical, nas regiões Sul e Sudeste; Caatinga, no nordeste; Cerrados, no Sudeste e Centro-Oeste; Mangues, na região litorânea; Campos, na região Sul; e Reflorestamentos. As florestas plantadas no Brasil são formadas principalmente pelos gêneros “*Pinus*” e “*Eucalyptus*”, em função de sua adaptabilidade e alto índice de produtividade.

O reflorestamento é o replantio de árvores em áreas onde ocorreu derrubada de floresta virgem, por ações antrópicas ou naturais. Ele pode ser efetuado com plantio de espécies nativas ou exóticas para recuperar o ecossistema original, ou com objetivo econômico, com plantio de espécies de rápido crescimento e qualidade de madeira, para posterior comercialização. Essa atividade de reflorestamento pode contribuir com o aumento de empregos, a diminuição dos riscos de erosão, a proteção das bacias hidrográficas, o aumento da biodiversidade e do conforto térmico, o sequestro de dióxido de carbono, a produção de oxigênio e a diminuição da pressão sobre florestas nativas (SFB, 2011).

De acordo com Bacha e Barros (2004), os principais agentes reflorestadores do Brasil são as empresas de celulose, as siderúrgicas, as empresas de produtos sólidos de madeira, os governos estaduais e municipais e pequenos produtores. Além destes, em menor escala, tem-se as empresas produtoras de móveis, produtos da construção civil, de embalagens, de lápis e produtores rurais que utilizam lenha para secagem de seus produtos.

Ainda segundo os mesmos autores, no Brasil, setores acadêmicos e várias empresas vêm se interessando pela atividade de reflorestamento, para pesquisa, para atender à demanda de matéria prima, reparação do meio ambiente, melhoria na qualidade de produção e participação no mercado mundial de carbono.

Estudos realizados pela Organização das Nações Unidas sobre mudanças climáticas preveem que a degradação de florestas nativas, associada ao aumento da emissão de dióxido de carbono, CO₂, pode aumentar a temperatura média terrestre.

Nesse contexto, um dos principais problemas de países em desenvolvimento é o fato de que eles perdem biodiversidade, atividades de fotossíntese e respiração e, simultaneamente, em função de seu desenvolvimento, aumentam a quantidade de emissão de dióxido de carbono para atmosfera.

As questões relacionais entre o aquecimento global e o uso da cobertura da terra podem ser analisadas em escala global, regional e local. Na escala global, envolve o processo de aquecimento global, suas causas e consequências econômicas e ambientais como a diminuição da camada de ozônio, o aumento do nível médio do mar, o processo de desertificação, a perda de biodiversidade, a disponibilidade de alimentos e água potável, as migrações humanas e crescimento da população mundial. Na escala regional, essas questões referem-se à poluição do ar e da água, degradação do solo e diminuição da biodiversidade. Em escala local, são destaques a extinção de vegetação e animais, a erosão, sedimentação e contaminação de corpos de água, redução da produtividade na pecuária e agricultura, expansão de municípios e de área de agricultura sobre áreas de floresta, áreas florestadas e reflorestadas (IPCC, 2007).

No processo da fotossíntese a energia da luz é utilizada para sintetizar compostos orgânicos a partir água e do dióxido de carbono da atmosfera. Nesse processo é liberado oxigênio (O_2) para a atmosfera e o carbono é incorporado às células das plantas. Em decorrência disso, as florestas, compostas majoritariamente por árvores que tem ciclo de vida longo, têm grande potencial na remoção e fixação do carbono sequestrado da atmosfera, ao contrário de plantas com ciclo de vida curto que se decompõem rapidamente liberando carbono. Florestas operam como veículos para a captura de carbono adicional e reservatórios de carbono (SEDJO, SOHNGER, 2001).

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – *“Intergovernmental Panel on Climate Change”* - 2005), a biomassa vegetal, ou fitomassa, deve ser estimada considerando-se: (1) a biomassa florestal acima do nível do solo, (2) a biomassa de raízes com diâmetro de base maior que 2 mm, e, (3) a biomassa de todos os materiais vegetais mortos não contidos na serapilheira. Ao serem usados os teores de água e de carbono, a biomassa florestal pode ser transformada em carbono da vegetação.

Nesse contexto as técnicas de Sensoriamento Remoto podem ser utilizadas para fins de levantamentos e monitoramentos, por meio da utilização de

imagens de satélite, em áreas de florestas e de reflorestamentos, com suporte de geotecnologias e técnicas estatísticas. Um dos produtos mais utilizados do Sensoriamento Remoto são os índices de vegetação que se baseiam na absorção e na reflexão da radiação eletromagnética, respectivamente, nas faixas do visível e do infravermelho.

Essas informações enfatizam a importância de estudos sobre agentes que interferem de alguma forma no ciclo do carbono e, dentre esses, estudos envolvendo reflorestamentos e florestas podem ser muito relevantes e definem os objetivos deste trabalho.

1.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é, no período de 1985 a 2011, analisar a variação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) em áreas de reflorestamento: na Floresta Estadual ‘*Edmundo Navarro de Andrade*’ (FEENA); com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Estatística Descritiva.

Além disso, estudar a variabilidade e a tendência da temperatura e da pluviosidade da região, verificar a existência de correlação entre o NDVI e cada uma das variáveis meteorológicas e sugerir o comportamento da FEENA em relação ao sequestro de carbono.

1.2 Objetivos específicos

- Elaborar cartas imagens de NDVI da FEENA e obter medidas estatísticas referentes a elas.
- Obter medidas estatísticas e elaborar gráficos da temperatura e da pluviosidade na região da FEENA.
- Elaborar gráficos de dispersão do NDVI em função de cada uma das variáveis meteorológicas e suas respectivas curvas de tendência e coeficientes de determinação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ciclo do Carbono

O ciclo do carbono está relacionado com os seres vivos da superfície da terra, que são responsáveis pela maior parte da sinterização desse elemento na forma líquida sólida ou gasosa. Mas o transporte de carbono entre a atmosfera, a hidrosfera e a litosfera é realizado, principalmente, pelo carbono na forma de dióxido de carbono (CO_2), de carbonato (CO_3^{2-}) ou de bicarbonato (HCO_3^-). Na absorção de CO_2 pelos vegetais durante o processo de fotossíntese o gás carbônico se combina com a água na presença de luz e clorofila, o carbono é fixado como biomassa e oxigênio é liberado para atmosfera (ROCHA, 2009).

De acordo com Spiro e Stagliani (2009), nos vegetais, o carbono participa dos processos de respiração e transpiração e é o principal elemento de seu desenvolvimento. As moléculas orgânicas obtidas na fotossíntese têm o carbono como seu elemento fundamental, o que define a sua importância para a manutenção da vida neste planeta.

Segundo Lenzi e Favero (2009) no ciclo do carbono, o CO_2 é transformado nas plantas em açúcar pela fotossíntese, e estas servem como alimento para os animais que decompõem esse açúcar e liberam o carbono para a atmosfera. Além disso, a queima de vegetação e de combustíveis fósseis, a decomposição de organismos e a atividade vulcânica são estão relacionadas ao ciclo do carbono que trata do movimento desse elemento entre a atmosfera e a superfície terrestre. No solo, o carbono funciona como solvente dos alimentos minerais das plantas e, na atmosfera, é um dos principais elementos necessários para a manutenção do equilíbrio ecológico.

Brown et al. (1997) afirmaram que o planejamento do uso sustentável de recursos naturais é de fundamental importância para inferir a quantidade de fitomassa de sistemas florestais, e esta, por sua vez, pode ser utilizada para estimar o estoque de carbono da vegetação e a quantidade de CO_2 que é liberado para a atmosfera ou dela sequestrado.

Foddy et al. (2003) e Lu et al. (2005) afirmaram que trabalhos realizados por quantificação indireta do carbono baseada em processos não destrutivos que

envolvem informações espectrais de imagens de satélite, constituem um dos principais desafios técnico-científicos na construção de modelos que estimem o fluxo de carbono.

O dióxido de carbono é o gás com maior contribuição para o aumento do efeito estufa, o que está incrementando de forma positiva o aquecimento global. As principais atividades provocadoras da emissão desse gás para a atmosfera são o desmatamento, a industrialização e a queima de combustíveis fósseis (IPCC/ONU, 2007).

2.2 Sensoriamento Remoto

A partir do lançamento do primeiro satélite, em 1957, a superfície da Terra passou a ser monitorada por meio de imagens obtidas de sensores orbitais. Nas últimas três décadas, com o desenvolvimento de computadores e programas mais poderosos com interfaces gráficas mais amigáveis, tornou-se possível a realização de maior quantidade de estudos ambientais de forma global, mais rápida e com menor custo. Nesse contexto, alguns autores definiram esse processo denominado por Sensoriamento Remoto, tecnologia que coleta dados para levantamento e monitoramento de recursos da superfície terrestre.

De acordo com Novo (1992), o Sensoriamento Remoto é uma tecnologia que utiliza sensores coletores de energia eletromagnética, para obter informações sobre objetos ou fenômenos sem contato direto com estes. Atualmente, é uma das mais importantes tecnologias que possibilita o processamento e a análise de dados ambientais com maior velocidade e custo relativamente baixo.

Meneses (2012, p. 3) afirmou que uma das definições mais científicas de Sensoriamento Remoto seria:

Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

Novo et al. (2005) salientaram que, por meio dos métodos de Sensoriamento Remoto, é possível integrar informações sobre vários processos

biológicos e físicos de diferentes espaços e períodos de tempo. Além disso, enfatizaram que alguns avanços no conhecimento só foram alcançados em decorrência das informações obtidas por meio do Sensoriamento Remoto.

Figueiredo (2005) elencou algumas das utilizações do Sensoriamento Remoto, como: na cartografia, para elaborar mapas e cartas; na arqueologia, para descobrir, estudar e mapear novos sítios; na geologia, para mapear e pesquisar locais de extração mineral; na agricultura, para acompanhar o desenvolvimento de plantas; nas florestas, para levantamento e caracterização de sua tipologia; em estudos ambientais das atividades antrópicas; e na geografia, para monitorar o uso da terra e de processos geomorfológicos.

O mesmo autor definiu que o comportamento espectral dos alvos depende da interação dos objetos e suas feições com a radiação eletromagnética que incide sobre eles. Essa interação ocorre em função da estrutura atômica e molecular de cada objeto alvo. Os níveis energéticos em torno dos núcleos atômicos definem a maior ou menor quantidade de energia absorvida, o que determina a quantidade de energia da radiação eletromagnética refletida nas faixas do espectro eletromagnético, denominadas bandas de absorção.

O Sensoriamento Remoto, segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), deve levar em consideração propriedades e parâmetros: (1) da fonte de radiação, em relação ao seu posicionamento; (2) da atmosfera, em relação ao espalhamento e absorção da radiação eletromagnética; (3) do dossel, em relação à sua estrutura, aos componentes da vegetação, sua geometria e o clima de sua região; (4) do solo, em relação à sua textura, umidade, absorvância e refletância; e (5) do sensor, em relação à sua sensibilidade, abertura, calibração e posicionamento espacial.

Liu (2007) e Jensen (2007) afirmaram que os sensores utilizados em Sensoriamento Remoto podem ser classificados como ativos, quando possuem sua própria fonte de energia, e passivos, quando têm como fonte principal de energia o Sol, sendo estes a maioria em utilização. No caso da superfície terrestre, sensores passivos captam a radiação eletromagnética solar refletida dos objetos e a convertem em sinais que, por sua vez, são registrados e posteriormente transformados em informações representadas por uma imagem da área recoberta pelo sensor.

A radiação eletromagnética (REM), de acordo com Moreira (2007), pode ser definida como energia que se propaga no espaço em forma de ondas do tipo transversal sem necessidade de meio material. Nessa propagação, ocorrem modificações em sua intensidade e distribuição, tanto na incidência na superfície quanto na reflexão até ser captada por sensores.

Jensen (2007) e Liu (2007) afirmaram que ao atingir a superfície da Terra, a radiação eletromagnética interage com as feições desta e podem ocorrer três processos distintos: absorção, reflexão e transmissão. Dessa forma, a fração de energia refletida ou emitida pela superfície terrestre voltará a atravessar a atmosfera, havendo novas interações, e atingirá o sensor remoto em órbita terrestre, gerando as imagens de satélite.

As frações de energia absorvida, transmitida e refletida da radiação eletromagnética que incide em um dossel vegetal são alteradas em função da morfologia e fisiologia deste (PONZONI, SHIMABUKURO, 2007). Isso embasa a afirmação de que é possível estudar a modificação temporal de um dossel vegetal, utilizando-se como variável independente a fração da energia refletida.

Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), nas plantas ocorrem atividades físicas, químicas e biológicas, em função da radiação solar que incide em suas partes. Estudos do comportamento espectral da vegetação vêm sendo realizados para representar as características de reflectância da radiação eletromagnética, por parte delas e pelo conjunto delas, no caso os dosséis vegetais.

De acordo com Ponzoni, (2001, p. 159)

A aparência da cobertura vegetal em determinado produto de Sensoriamento Remoto é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais. O que efetivamente é medido por um sensor remoto, oriundo de determinada vegetação, não pode ser explicado apenas por suas características intrínsecas, inclui também a interferência de vários outros fatores, como: a) a fonte de radiação, que inclui a irradiância espectral, a localização do ângulo zenital e azimutal solar; b) a atmosfera, caracterizada por uma série de propriedades e parâmetros, incluindo as concentrações espacialmente dependentes e as propriedades seletivas de absorção e de espalhamento dos diversos comprimentos de onda por parte dos constituintes da atmosfera (como vapor d'água, ozônio e aerossóis); c) o dossel, cujas características se dão por várias propriedades e parâmetros ópticos (reflectância e transmitância), estruturais (formas geométricas e posicionamento dos componentes da vegetação: folhas, galhos, frutos e flores), geométricos e ambientais (temperatura,

umidade relativa, velocidade do vento e precipitação); d) do solo, que também é caracterizado por uma série de propriedades e parâmetros tais como reflectância, absorvância, rugosidade superficial, textura e umidade; e e) do detector, caracterizado por uma série de propriedades e parâmetros, como a sensibilidade espectral, a abertura, a calibração e o posicionamento espacial.

De acordo com Figueiredo (2005), a radiação solar incidente interage de forma distinta para cada tipo de alvo, e isso determina uma assinatura específica para cada um dos tipos. Outros fatores que influenciam a interação entre radiação e alvo são a rugosidade da superfície do alvo, a densidade e a posição relativa das feições em relação ao ângulo de incidência, a geometria de imageamento e os componentes atmosféricos.

Liu (2007) afirmou que, quando ocorre absorção da radiação solar por um dossel, há fatores morfológicos e fisiológicos que determinam essa absorção. Dentre os morfológicos, destaca-se a organização espacial das folhas. Nesse contexto, o melhor parâmetro que vem sendo utilizado para estimar esses fatores é o Índice de Área Foliar (IAF), razão entre a área foliar do dossel e a área superficial do local onde ele se encontra. Além disso, segundo Moreira (2007), a radiação solar, ao passar pelas camadas de folhas da vegetação, tem sua intensidade diminuída exponencialmente e, geralmente, ao chegar ao solo, é praticamente nula. O autor destaca que é nas plantas que se processam todas as atividades físico-químicas e biológicas, sendo todo esse processo desencadeado pela interação da radiação solar com componentes das suas folhas.

Chuvieco e Huete (2010) afirmaram que as propriedades da reflectância de um dossel vegetal são complexas e resultam de muitos dos seus atributos bioquímicos e biofísicos e de fatores externos que influenciam o sinal detectado pelo sensor. Para entender o comportamento da reflectância sobre um dossel, devem-se levar em consideração os fatores bioquímicos da folha, a fisiologia da planta e as suas propriedades estruturais e morfológicas.

De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2007), no imageamento orbital da superfície terrestre, cada pixel deve ter suas coordenadas geográficas de posicionamento o mais preciso possível em relação à área por ele representada na superfície terrestre. Além disso, as imagens obtidas por sensores orbitais são compostas por pixels, representados por números digitais,

que são diretamente proporcionais aos valores de reflectância representados por cada um deles.

Cavallet e De Paula (2011) inferiram que, ao se admitir boa relação entre a estimativa do sequestro de carbono via métodos diretos e geoprocessamento, quando se trata de fitomassa de áreas florestais, uma boa forma de se avaliar a variação de estoque de carbono é utilizar séries temporais de imagens digitais de satélites.

Coltri et al. (2009) afirmaram que grande parte dos estudos realizados para estimar o carbono fixado pela vegetação baseia-se em métodos destrutivos, nos quais é necessário o abatimento para se obterem amostras locais das diferentes partes da planta. Dessa forma, o desenvolvimento de processos diferentes para mensurar e estimar o carbono da fitomassa acima do solo, com base em características locais, pode ser uma boa alternativa para estudos de quantificação da emissão e do sequestro de carbono.

Segundo IPCC (2007), o estudo de espécies de árvores para aumentar a produtividade da biomassa e o sequestro de carbono e a evolução das tecnologias de Sensoriamento Remoto para analisar o potencial de sequestro de carbono pela vegetação são indispensáveis para os estudos ambientais.

2.3 Índices de Vegetação

Segundo Bannari et al. (1995), desde o lançamento do primeiro satélite de estudo de recursos naturais, grandes esforços foram despendidos para se estabelecer relações entre a resposta espectral captada por sensores transportados por satélites e a cobertura vegetal da região da superfície terrestre imageada por eles. Nesses esforços foram criados os Índices de Vegetação (VI).

Ainda segundo esses autores, os índices de vegetação são medidas que indicam a intensidade da atividade fotossintética da vegetação e são utilizados para interpretar imagens orbitais com objetivo de detectar mudanças no uso da terra, auxiliar na avaliação da densidade da cobertura vegetal, discriminar e prever a produtividade de uma safra agrícola. Cada um dos índices de vegetação tem melhor resposta a um determinado tipo de estudo. A história dos índices de vegetação pode ser dividida em duas fases. Uma primeira, em que o desenvolvimento baseava-se

exclusivamente nas combinações lineares entre as bandas de uma mesma imagem, e uma segunda, a qual transcorre até hoje, que se baseia no conhecimento dos fenômenos biofísicos que podem interferir no valor dos índices de vegetação.

Os índices de vegetação espectrais são, segundo Jackson e Huete (1991), amplamente utilizados na avaliação da biomassa vegetal, uso da água, análise do estresse e produção vegetal. Mas, o principal objetivo de projetos envolvendo o Sensoriamento Remoto é caracterizar a condição da vegetação em uma determinada área e, para que isso fosse possível, foram desenvolvidos os índices de vegetação.

Segundo Dong et al. (2003), o estudo de como inferir a quantidade de biomassa vegetal sem a derrubada de árvores teve início na década de 70, com aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto, estabelecendo-se correlação entre valores de reflectância e biomassa vegetal. Segundo eles, há indicação de que modelos de regressão podem ser usados para relacionar a biomassa vegetal de florestas com índices de vegetação.

Ponzoni e Shimabukuro (2007) afirmaram que, baseado no conhecimento da resposta espectral da vegetação, dos fatores fisiológicos que alteram essa resposta e de como estão distribuídos os valores numéricos da imagem que caracterizam a fitomassa aérea, é possível realizar estudos quantitativos com objetivo de inferir sobre características da cobertura vegetal, em relação à sua produtividade e ao seu estado fisiológico ou nutricional. Pode-se, então, combinar imagens de Sensoriamento Remoto Orbital por meio de operações matemáticas e produzir mapas com informações relevantes sobre a vegetação imageada. Entre essas operações estão as que definem índices de vegetação, baseados no comportamento da reflexão da radiação solar na vegetação. Na faixa do visível, a reflexão é inversamente proporcional à densidade da vegetação e, na faixa do infravermelho, essa proporcionalidade é direta.

A radiação solar interage com a vegetação principalmente nas folhas, órgão especializado na absorção da radiação eletromagnética. Existem duas bandas de absorção distintas, uma próxima a $0,48\mu\text{m}$, devido à presença de carotenos, e outra próxima a $0,68\mu\text{m}$ relacionada à fotossíntese. Entre esses dois valores, há um ponto de valor de pico da refletância próximo a $0,5\mu\text{m}$, que corresponde à região da cor verde no espectro visível, o que explica a coloração verde da vegetação que nossa visão observa. Além disso, no intervalo de $0,7\mu\text{m}$ a $1,3\mu\text{m}$, praticamente não

ocorre interação entre as folhas e a radiação eletromagnética, ocorre sim, uma alta reflexão, que está associada a um comportamento das folhas que tem por finalidade a manutenção do equilíbrio no balanço de energia interna da planta. Além desses, ocorrem picos de absorção nas regiões próximas a 1,4 μm e 1,9 μm , em função da presença de água. A análise e a quantificação dessas interações possibilitam a caracterização e o monitoramento da vegetação. A integração dos dados obtidos a partir de sensores remotos com modelos matemáticos pode ser usada como ferramenta para inferir sobre as propriedades biofísicas de um dossel (PONZONI, SHIMABUKURO, 2007; FIGUEIREDO, 2005).

Moreira (2007) afirmou que, da radiação solar que atinge uma planta, na superfície terrestre, aproximadamente, 50% é absorvida pelos pigmentos contidos nas suas folhas. Do restante, uma parte é refletida pelas folhas e a outra parte é transmitida, para outras folhas de outras camadas que formam as copas.

Em relação à reflectância no dossel vegetal, Ponzoni e Shimabukuro (2007, p. 25) relatam duas situações:

Na primeira, na região do visível, a reflectância diminui com o aumento de camadas de folhas e na segunda, na região do infravermelho próximo, a reflectância aumenta com o aumento de número de camadas. Mas essas dinâmicas não apresentam variações lineares, ou seja, a diminuição da reflectância na região do visível com a adição da segunda camada de folhas, não apresentará a mesma dimensão quando for acrescida uma terceira camada, e o mesmo acontecerá com o acréscimo de uma quarta camada, e assim por diante. Na região do infravermelho, analogamente, o aumento da reflectância com a adição de camadas também não será linear e apresentará acréscimos sempre menores à medida que forem adicionadas camadas adicionais de folhas. Esse fenômeno comprova o caráter assintótico da reflectância de dosséis, também conhecido como refletância infinita.

Segundo Moreira (2007), as folhas representam o principal componente de um dossel vegetal, pois nelas são processadas todas as reações fotoquímicas para a síntese de carboidratos. Em relação a sua refletância espectral, podem-se estabelecer algumas propriedades comuns:

Quando foram apresentados os parâmetros influentes sobre a reflectância espectral das folhas, verificou-se que estes se referem às suas composições químicas, morfológicas, fisiológicas e umidade interna, e que cada um desses exerce influência predominante em pelo menos três regiões espectrais do espectro óptico (visível, infravermelho próximo e

infravermelho médio). Para o caso dos dosséis, verificou-se que existem ainda outros fatores e/ou parâmetros, sendo estes de natureza geométrica (iluminação e visada), espectral (propriedades espectrais dos elementos da vegetação, principalmente das folhas; e solo) e biofísica (IAF e DAF) (PONZONI, SHIMABUKURU, 2007, p. 36).

De acordo com os mesmos autores, a reflectância das folhas isoladas é em geral superior à do dossel do qual elas fazem parte, e isso provavelmente decorre em função das sombras nele presentes. Em um dossel vegetal, as porções da energia da radiação absorvida, refletida e transmitida têm como variáveis independentes as modificações morfológicas e fisiológicas deste.

Segundo Jensen (2007), a partir da década de 60, informações sobre variáveis biofísicas da vegetação têm sido obtidas por meio de Índices de Vegetação (IV) baseados em dados de Sensoriamento Remoto. Por meio desses índices, é possível estudar variáveis relacionadas com fatores biofísicos da vegetação como Índice de Área Foliar (IAF), teor de clorofila e quantidade de biomassa vegetal.

Liu (2007) afirmou que, entre as aplicações desenvolvidas a partir do Sensoriamento do Remoto, têm-se os índices espectrais de vegetação, que são usados para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais da vegetação. Esses índices são obtidos por meio de operações matemáticas, tendo como elementos envolvidos valores detectados pelos sensores orbitais em várias faixas espectrais da radiação eletromagnética.

De acordo com Moreira (2007), os índices de vegetação foram criados para aperfeiçoar o trabalho de análise dos dados obtidos por meio de sensores orbitais. A assinatura espectral da vegetação evidencia o contraste entre a região do vermelho e do infravermelho próximo, sendo que esse contraste está diretamente relacionado à intensidade da atividade fotossintética da vegetação da área representada pela imagem.

Ponzoni e Shimabukuro (2007) afirmaram que, nos dosséis vegetais, a forma da curva de reflectância e de transmitância é idêntica a das folhas, embora, nesse caso, devam ser consideradas principalmente a sua quantidade de folhas e a sua arquitetura. Em decorrência dessa diferença, foram elaborados diversos índices de vegetação e, por meio deles, podem ser estudados parâmetros biofísicos da cobertura vegetal.

A partir do estudo de Jordan (1969), baseado no Índice de Vegetação da Razão Simples (RVI – Ratio Vegetation Index), inúmeros índices de vegetação vêm sendo definidos com a finalidade de melhor caracterizar as propriedades biofísicas da vegetação, além de eliminar ao máximo a ação de agentes que possam ter interferência nos resultados obtidos. O RVI é descrito pela Equação 1.

$$RVI = \frac{NIR}{RED} \quad (1)$$

Sendo: *NIR* o valor do ND da refletância do infravermelho próximo e *RED* o valor do ND da refletância do vermelho.

Dentre os índices de vegetação, destacam-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*NDVI – Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse et al. (1973), apresentado na Equação 2.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

Sendo: *NIR* o valor do ND da refletância do infravermelho próximo e *RED* o valor do ND da refletância do vermelho.

Segundo Liu (2007), o NDVI opera com a diferença da reflectância entre a absorção do comprimento de onda do vermelho (0,66 µm) e o início do comprimento de onda do infravermelho próximo (0,88 µm). Nesse índice, a faixa do vermelho substitui toda a região eletromagnética do visível, em função de sua maior absorção pela clorofila, em relação às demais faixas. Os possíveis valores do NDVI variam no intervalo entre -1 e 1, sendo que na imagem os níveis mais claros de cinza estão relacionados aos maiores valores, e os mais escuros aos menores.

O mesmo autor define que os valores negativos do NDVI representam as nuvens, os valores próximos a zero representam o solo sem vegetação e valores positivos representam a vegetação sendo que, quanto mais próximos de 1, maior intensidade da atividade fotossintética e maior a densidade da cobertura vegetal.

Ponzoni e Shimabukuro (2007) afirmaram que o NDVI tem como uma de suas aplicações o estudo de comparações temporais de atividades da vegetação, pois tem relação direta com a intensidade da atividade fotossintética da vegetação,

que por sua vez, está relacionada com a biomassa vegetal. É um índice que vem sendo utilizado para estudar o desenvolvimento da vegetação agrícola e florestal e eventuais alterações em seu ciclo sazonal. Além disso, pode ser utilizado para modelagem climática e da hidrologia; inferir sobre o balanço de carbono e detecção de mudanças no clima.

Os mesmos autores ainda afirmaram que a aparência da cobertura vegetal em uma imagem obtida por Sensoriamento Remoto depende de muitos parâmetros e fatores ambientais, destacando-se a irradiância espectral, o ângulo de elevação solar, as propriedades de absorção e de espalhamento dos diversos comprimentos de onda em função dos elementos constituintes da atmosfera, as características da fonte, a forma de irradiação, os parâmetros estruturais, geométricos e ambientais do dossel e as características do sensor.

De acordo com Jensen (2007), o NDVI é muito usado nas atividades de monitoramento das alterações sazonais da vegetação. Sua expressão reduz muitas formas de ruídos multiplicativos, como os provocados pelas diferenças de iluminação do solar, atenuações atmosféricas e variações topográficas. No entanto, o NDVI é muito sensível ao solo visível através do dossel.

Liu (2007) observou que, em função da combinação das bandas do espectro eletromagnético utilizadas em seu cálculo, o NDVI encobre parcialmente os efeitos da presença dos constituintes atmosféricos, o que minimiza os efeitos da atenuação atmosférica em imagens multitemporais. Além disso, a normalização diminui os efeitos das variações do ângulo solar e de visada dos sensores.

Jensen (2007) afirmou que na análise de dados orbitais para estudar informações biofísicas da vegetação, é necessário que estes pertençam a séries temporais. Desta forma, será possível observar as variações relevantes no decorrer do período estudado.

Segundo Meneses (2012), o NDVI tende a ser linearmente proporcional à biomassa vegetal, dessa forma é apropriado para se estabelecer comparação entre imagens de um mesmo local, mas de diferentes datas, pois sofre menos influência das condições atmosféricas. Além disso, o NDVI pode ser utilizado para inferências de aspectos da vegetação como o índice de área foliar e quantidade de dióxido de carbono sequestrado da atmosfera pela vegetação no processo de fotossíntese.

A Tabela 2 apresenta as equações de alguns dos principais índices de vegetação juntamente com suas características mais relevantes e seus respectivos autores e ano de criação.

Tabela 2 - Descrição de alguns dos principais Índices de Vegetação

Índice	Propositores (Ano)	Expressão	Características Principais
Ratio Vegetation Index	Pearson e Miller (1972)	$RVI = \frac{NIR}{RED}$	Indica o crescimento de cultura e estima biomassa.
Difference Vegetation Index	Richardson e Wiegand (1973)	$DVI = NIR - VIS$	Inferir a quantidade de vegetação verde.
Normalized Difference Vegetation Index	Rouse et al. (1973)	$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$	Classifica a vegetação, inferir produção de biomassa.
Transformation Vegetation Index	Rouse et al. (1974)	$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$	Evita valores negativos para o NDVI
Soil Adjusted Vegetation Index	Huete (1988)	$SAVI = \frac{(NIR - VIS)(1 + L)}{(NIR + VIS + L)}$	Incorpora ao NDVI o efeito da presença do solo.
Atmospherically Resistant Vegetation Index	Kaufman e Tanré (1992)	$ARVI = \frac{NIR - RB}{NIR + RB}$	Minimiza o efeito dos aerossóis da atmosfera
Two-Axis Adjusted Vegetation Index	Li (1994)	$TWVI = \frac{(NIR - VIS - W)(1 + L)}{NIR + VIS + L}$	Ajusta o SAVI eliminando a variação de diferentes solos.
Vegetation Condition Index	Kpagan (1999)	$VCI_j(\%) = \frac{100(NDVI_j - NDVI_{MIN})}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}}$	Monitora a variabilidade da seca em um período j, inferida pelo NDVI

RED: valor do ND da refletância na faixa do vermelho (0,63 a 0,69 μ m)

NIR: valor do ND da refletância na faixa do infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μ m)

VIS: valor do ND da refletância na faixa do visível (0,45 a 0,69 μ m)

L=0,25 para cobertura completa de vegetação

L=0,5 para cobertura média de vegetação

L=1,0 para solo sem ou muito esparsa cobertura

RB: reflectância combinada das bandas do vermelho e do azul

Fonte: Autor, adaptado de Bannari et al. (1995), Jensen (2007), Liu (2007) e Bolfe (2010)

2.4 Sistemas de Informações Geográficas

Um importante instrumento para a aplicação das técnicas de Sensoriamento Remoto, são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que foram desenvolvidos para gerenciar grandes quantidades de informações georreferenciadas ou não. Eles são estruturados para que seja possível a análise de mapas, fotografias, imagens de satélite, planilhas dados estatísticos e demais dados georreferenciados.

De acordo com Câmara (1995), um SIG é um conjunto de ferramentas baseado em computador que permite capturar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados georreferenciados. Algumas de suas aplicações estão na agricultura, na cartografia, em cadastros urbanos e em estudos florestais. Devido a isso, pode-se dividir a utilização de um SIG como banco de dados geográficos, ferramenta de produção de mapas e análise de dados espaciais. As principais características de um Sistema de Informações Geográficas são a integração, em um único banco de dados, de informações cartográficas, cadastrais, imagens, censo, redes e Modelos Numéricos de Elevação (MNT) e a possibilidade de combinação e manipulação de todos esses dados.

Segundo Burrough e McDonnel (1998), um Sistema de Informações Geográficas é um conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados espaciais. Uma de suas principais características é integrar, em uma base de dados, informações espaciais, dados de senso, de cadastro, imagens de satélites e de modelos numéricos de terreno. Além disso, pode gerar mapeamentos para consulta, recuperar e visualizar conteúdo da base de dados geocodificados.

Liu (2007, p. 811) definiu um SIG da seguinte forma:

O Sistema de Informações Geográficas é um modelo matemático dinâmico construído como um banco de dados digitais gerenciados para facilitar a atualização e a aplicação dos dados georreferenciados de infinitas camadas de informação no planejamento e na otimização de uma determinada tarefa. O SIG é empregado na integração e análise de dados provenientes de fontes dispersas, como imagens digitais de satélites, mapas digitais de usos e tipos de solo, topográficos, hidrologias, vegetação, floras e faunas, cartas climatológicas, sensores socioeconômicos e outros. Os processos incluem a escolha, obtenção e armazenamento de dados, de

modo padronizado, em escalas compatíveis para fornecer e facilitar aos usuários a utilização, recuperação e manipulação de várias camadas de dados para atender suas aplicações específicas.

Moreira (2007) afirmou que um Sistema de Informações Geográficas deve possibilitar a inserção e integração de dados, georreferenciados ou não, possibilitando sua manipulação além de oferecer ferramentas para estudos envolvendo esses dados. Para tanto, um SIG deve ter uma interface ligada à entrada e integração de dados, à consulta e análise espacial e à visualização e plotagem. Todos esses componentes devem estar ligados à gerência de dados que, por sua vez, deve ter acesso ao banco de dados.

2.5 Revisão bibliográfica

Pesquisas sobre aplicações do Sensoriamento Remoto e de índices de vegetação relacionadas com desenvolvimento vegetal e estoque de biomassa vegetal têm sido realizadas nas últimas décadas.

Bernardes (1996) verificou a aplicabilidade de técnicas de processamento digital em uma série temporal de imagens do sensor TM Landsat 5, dos anos de 1984, 1986 a 1989, 1991, 1992 e 1995, por meio dos índices de vegetação NDVI e SAVI e valores de proporção de vegetação (PVEG), proporção de solo (PSOL) e proporção de sombra (PSOM), por meio de um Modelo Linear de Mistura Espectral, para caracterizar a Floresta Tropical Primária e estágios na região sobre influência da Floresta Nacional do Tapajós no estado do Pará. A análise dos resultados indicou forte correlação entre as variáveis biofísicas: biomassa e área basal e os valores digitais calculados, com exceção para o PSOL e o NDVI.

Amaral et al. (1996) realizaram pesquisa sobre a regeneração da floresta tropical em uma área do estado de Rondônia pertencente aos municípios de Cacaulândia e Ariquemes. Foi utilizada a análise de regressão linear e logarítmica para o índice de área foliar, IAF, o NDVI de imagens do sensor TM Landsat 5, e a área basal, com medidas obtidas em oito áreas que haviam sido abandonadas a 2, 3, 5, 8, 10, 12 e 18 anos. Nesse estudo foram obtidas relações lineares entre o NDVI

e o IAF, com coeficiente de determinação elevado, $R^2 = 0,7706$ e entre o NDVI e a área basal com $R^2 = 0,7756$. Os autores concluíram que existe uma clara indicação de que o NDVI pode ser indicador de biomassa, no caso, de capoeiras em estágios iniciais de sucessão.

Xavier et al. (1998) avaliaram a viabilidade do uso de técnicas de Sensoriamento Remoto para estimar o Índice de Área Foliar (IAF) de plantações de eucalipto, em uma área pertencente à Aracruz Celulose S.A., localizada na região norte do Estado do Espírito Santo. Para a coleta do IAF em campo, foram utilizados equipamentos LAI-2000 e para o cálculo dos índices de vegetação NDVI e SAVI, imagens do sensor TM Landsat 5. Para a análise dos índices de vegetação, foram geradas regressões simples do IAF em função do NDVI e SAVI. Os autores concluíram ainda ser viável a elaboração de um modelo global único para estimar o IAF por meio dos índices de vegetação SAVI e NDVI.

Turner et al. (1999) apresentaram pesquisa realizada em três localidades na zona temperada nos Estados Unidos: Konza Prairie Research Natural Area (KNZ), região central leste do Kansas; North Temperate Lakes (NTL), região ao norte de Central Wisconsin; e H. J. Andrews Experimental Forest (AND), na encosta oeste da cordilheira em Oregon, na Floresta experimental de Andrews. Foram comparadas as relações entre o índice de área foliar e três diferentes índices de vegetação baseados na banda do vermelho e do infravermelho próximo: o NDVI, o SR e o SAVI. Várias derivações desses índices foram examinadas, incluindo os índices que têm como base os valores de número digitais NDs, a luminosidade, a reflectância no topo da atmosfera e os que apresentam a reflectância com atmosférica corrigida. Os melhores modelos ajustados obtidos foram polinômios de grau três para a relação do índice de área foliar com o NDVI e de grau dois para o RS e o SAVI, sendo o menor coeficiente de determinação $R^2 = 0,51$.

Agarez et al. (2001) desenvolveram uma classificação de fragmentos florestais na região do município de Sooretama, norte do estado do Espírito Santo, baseando-se no NDVI obtido por meio de imagens do sensor TM Landsat 5. O objetivo desse trabalho foi fornecer uma ferramenta que pudesse ser utilizada como base para a recuperação da biodiversidade e a conservação da Mata Atlântica, por meio da quantificação e da qualificação de remanescentes florestais que sofreram diferentes graus de atividades antrópicas. Para o desenvolvimento do modelo, os autores utilizaram análise de regressão múltipla, e a classificação foi realizada

considerando a diversidade das árvores: alta diversidade, média diversidade e diversidade reduzida.

Ponzoni e Rezende (2004) avaliaram o potencial e as limitações do uso de dados obtidos por Sensoriamento Remoto, para caracterizar a vegetação secundária arbórea na região de Altamira, no estado do Pará, a partir de correlações entre valores de medidas dendrométricas coletados em plantios de eucaliptos e dados radiométricos obtidos por meio de imagens do sensor TM Landsat 5.

Watzlawick et al. (2004) e Watzlawick, Koehler e Kirchner (2006) desenvolveram metodologias para estimar a quantidade de fitomassa e de carbono orgânico em plantações de *Araucaria angustifolia* e de *Pinus taeda*, no município de General Carneiro, do estado do Paraná, por meio dos índices de vegetação RVI, NDVI e SAVI, obtidos a partir de imagens orbitais de alta resolução. A análise estatística realizada neste trabalho mostrou alta relação entre a biomassa arbórea e o carbono arbóreo, e correlações médias destas com os índices de vegetação utilizados.

Baptista (2005) apresentou uma validação para o modelo proposto por Rahaman et al. em 2000, de fluxo do dióxido de carbono para o cerrado tropical, em diferentes extratos de vegetação de Cerrado, com a utilização de imagens orbitais. Para substituir a determinação do fluxo de dióxido de carbono em campo, baseou-se na correlação com a intensidade da feição espectral do CO₂ nos espectros de radiância centrada a 2,0 µm, aproximadamente, que denominou por ICO₂ (Índice de Dióxido de Carbono). Em todos os casos, os resultados descrevem uma função decrescente e apresentam um alto coeficiente de correlação.

Novo et al. (2005) apresentaram um panorama dos principais avanços tecnológicos decorrentes do Sensoriamento Remoto em ecossistemas da Região Amazônica e questões científicas para serem respondidas no contexto do Projeto LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia - Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia). Esse estudo apresenta como exemplos: (1); Mapeamento de ecossistemas alagáveis por meio de integração de sensores de múltiplas resoluções e em múltiplas datas; (2) Aplicação de dados de satélites no estudo das teleconexões entre os processos dos ecossistemas amazônicos e o clima global; (3) Avaliação da dinâmica sazonal da bacia amazônica através da análise de produtos biofísicos do sensor MODIS/Terra; (4) Monitoramento da dinâmica espaço-temporal das fisionomias do cerrado brasileiro com o uso de

índices de vegetação; e (5) Padronização do mapeamento de uso e cobertura da terra em suporte ao LBA. Um desses expõe o uso de índices de vegetação para identificar padrões sub-regionais, para monitorar processos de média escala, e outro apresenta a importância da padronização de métodos de extração de informações provenientes de diferentes sensores.

Almeida et al. (2005) analisaram o uso de índices de vegetação como indicadores do desenvolvimento de uma cultura de soja, em uma área localizada na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Eldorado, RS. Nessa pesquisa, o NDVI e o Índice de Vegetação de Transformação, TVI, em comparação com os demais índices estudados apresentaram correlação significativa com o IAF, por meio do qual pode ser inferida a quantidade de fitomassa. Concluíram que os índices de vegetação podem ser utilizados para monitorar e realizar estimativas quanto a produção de culturas de soja.

Junges, Alves e Fontana (2007) analisaram e interpretaram a evolução temporal dos índices de vegetação NDVI e EVI em lavouras de trigo, cevada e aveia, localizadas em uma região que contém 13 municípios ao norte do estado do Rio Grande do Sul, durante o ano de 2006. Neste estudo, foram definidas áreas de interesse para cada um dos cereais, e essas foram sobrepostas às composições dos índices de vegetação. Por meio dessa sobreposição, foram extraídos dados estatísticos referentes a tais áreas, e os resultados indicaram haver comportamento semelhante dos dois índices para as três culturas analisadas. Os autores concluíram que o acompanhamento do desenvolvimento de plantas pode ser feito por meio de índices de vegetação.

Muukkonen e Heiskanen (2007) testaram a adequação de dados de imagens do satélite ASTER para estimar a fitomassa da Floresta Boreal ao sul da Finlândia. Nesse teste, os dados de inventário da floresta foram utilizados como referência, e as estimativas de volume foram convertidas em quantidade de fitomassa da superfície. Análise de regressão não linear e redes neurais foram por eles utilizadas para desenvolver modelos estatísticos de previsão de fitomassa em função da reflectância.

Cerqueira e Rocha (2007) desenvolveram análise do fluxo de dióxido de carbono sobre diferentes tipos de vegetação da região de Rio de Contas, no Estado da Bahia, confrontando sua metodologia com a da quantificação convencional. Para

essa análise, os autores obtiveram a Composição do Mapa de Vegetação, por meio da classificação supervisionada, integraram e estabeleceram análise estatística por meio da tabulação cruzada em um SIG, utilizando imagem orbital da área de estudo e construíram um mapa de fluxo de carbono pela integração dos índices de vegetação NDVI e PRI. Essa integração foi medida pelo índice CO_2flux , razão entre esses dois índices. Elaboraram um mapa de cobertura vegetal do solo que apresenta oito tipos de vegetação, com destaque especial para os tipos Caatinga e Campo Rupestre, com representações de 30 e 19%. Assim concluíram que a caatinga responde por 65% do fluxo de CO_2 , demonstrando seu potencial para sequestro de carbono.

Técnicas de Sensoriamento Remoto vêm sendo utilizadas em sistemas que gerenciam recursos da agricultura e de florestas, no que se refere à atividade fotossintética de grandes extensões de vegetação (BRANDÃO, BEZERRA, SILVA, 2007). Na agricultura, o estudo da variação da quantidade de carbono absorvida é fundamental para determinação de produtividade. Esses autores estimaram o acúmulo de biomassa vegetal em uma região localizada no município de Barbalha, Estado do Ceará, por meio de análise do NDVI, que foi tomado como indicador sensível à quantidade e qualidade da vegetação, e o Índice de Área Foliar, bom indicador de fitomassa.

Canavesi e Ponzoni (2007) analisaram a influência da topografia na relação entre dados radiométricos obtidos de imagens do sensor TM Landsat 5, sendo que o volume de madeira foi estimado para um povoamento de *Eucalyptus spp*; localizado no município de Capão Bonito, sudoeste do Estado de São Paulo. No desenvolvimento deste trabalho, o Fator de Iluminação foi obtido pela razão entre a imagem zenital e a imagem azimutal. Concluíram que os dados da banda 4 foram os que apresentaram maior correlação com a estimativa de volume de madeira por hectare e que, nas faixas iluminadas, essa correlação teve maior valor.

Sá et al. (2008) classificaram e quantificaram a cobertura vegetal na região do Araripe, polo gesso do extremo oeste do Estado de Pernambuco. Essa classificação foi realizada por meio do NDVI obtido de imagens do sensor TM Landsat 5, de janeiro de 2007. Concluíram que a região apresentava importantes modificações antrópicas de remoção da cobertura vegetal nativa, Bioma Caatinga, que foi principalmente utilizada como fonte de energia para as indústrias de gesso da região. As áreas degradadas, que sofreram alguma intervenção antrópica, foram

classificadas pelos autores visualmente, levando em consideração a textura e o padrão na imagem orbital. Na região estudada, os autores obtiveram para o NDVI o valor médio de 0,282, com desvio padrão 0,124, mediana 0,262; moda 0,1542 e observaram que o intervalo de variação foi [-0,740; 0,796]. Na conclusão, os autores inferem que 54% da área de estudo é composta por vegetação remanescente e o restante por área degradada.

Pesquisa realizada por Santiago et al. (2009) utilizando duas imagens do sensor TM LANDSAT 5, órbita 214 ponto 65 datadas de 05/06/1988 e 26/08/2006, apresentou análise das transformações que ocorreram na cobertura vegetal por meio dos índices de vegetação NDVI, SAVI além do IAF, no entorno da barragem de Botafogo, Estado de Pernambuco. Segundo os autores, as informações obtidas da cobertura vegetal durante o intervalo de 18 anos das imagens revelaram aspectos nas transformações da vegetação. Os índices de vegetação empregados apresentaram diferentes respostas para a mesma cena, na mesma data e em datas distintas. O NDVI identificou de melhor forma as mudanças na vegetação densa, o IAF as culturas de cana de açúcar e o SAVI um aumento da extensão de solo exposto.

Silva et al. (2009) estimaram, por meio de imagens do sensor TM Landsat 5, de 05/06/1988 e 26/08/2006, a presença de vegetação e de solo exposto em uma microrregião de Itamaracá litoral norte do Estado de Pernambuco que contém as cidades Igarassu, Itapissuma, Itamaracá e Araçoiaba. Tal estudo utilizou os índices de vegetação NDVI e SAVI além do IAF. Foram estabelecidas classes, e em relação a elas, foi observado que, nos três índices, a vegetação de mangue apresenta resposta similar à das faixas de agricultura e de vegetação esparsa. Também foi possível observar o aumento do solo exposto na área estudada.

Coltri et al. (2009) estudaram a relação dos índices de vegetação NDVI, PRI e CO_2flux com índices de biomassa para estimar a quantidade de carbono estocado acima do solo em lavouras de café, na região do município de Ribeirão Corrente, localizado na região nordeste do Estado de São Paulo. Nesse estudo, os índices NDVI e PRI foram combinados para gerar o índice CO_2flux . As correlações estabelecidas foram classificadas em função do valor do coeficiente de correlação R^2 como: muito fracas entre 0 e 0,19; fracas entre 0,20 e 0,39; moderadas entre 0,40 e 0,69; forte entre 0,70 e 0,89; e muito forte entre 0,90 e 1,0.

De Paula e Pereira Filho (2009) investigaram a relação entre índices de vegetação e valores de biomassa florestal, obtidos por meio de inventário, para desenvolver um método de estimativa de carbono. A área pesquisada foi o fragmento de Mata Atlântica Coimbra, localizado dentro da Usina Serra Grande no município de Ibateguara, Estado de Alagoas. Utilizaram duas imagens orbitais, uma de 2003 do sensor do satélite SPOT, e outra de 2007 do TM Landsat 5, para obter os mapas do NDVI, SAVI e o do Índice de Vegetação Aperfeiçoado (EVI – *Enhanced Vegetation Index*). Os autores realizaram regressão linear entre os índices de vegetação e o valor de carbono estimado em campo, mas obtiveram coeficientes de correlação baixos. Concluíram então que a regressão linear do carbono, a partir de índices espectrais, é significativa, mas com baixo poder de estimativa.

Ramos et al. (2010) avaliaram as localidades de áreas degradadas contidas no Parque Nacional Boqueirão da Onça (PNBO), situado na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco entre os municípios de Campo Formoso, Juazeiro, Sento Sé, Sobradinho e Uburanas, no Estado da Bahia. Para essa avaliação, usaram o NDVI gerado a partir de imagens do sensor TM Landsat 5 do mês de novembro de 2000 e 2009. Com esse índice, adotaram a classificação das áreas no interior do Parque como: degradadas, de transição e conservadas. Além disso, concluíram que o grau de degradação e ocupação do solo aumentou, principalmente na fronteira do parque onde ocorreu a substituição da cobertura vegetal natural por atividades econômicas como a pecuária, a agricultura e o garimpo.

Bolfe (2010) fundamentou seu estudo na hipótese de que variações da biomassa na vegetação de sistemas agroflorestais ocasionam variações nas propriedades espectrais de imagens orbitais destes, o que permite estabelecer correlação significativa entre índices de vegetação e estoque de carbono da área estudada. Segundo o autor, no estudo do comportamento espectral de um dossel são analisadas as relações entre a reflectância espectral e alguns parâmetros biofísicos. A partir disso, é possível o monitoramento da vegetação e a modelagem dos dados obtidos por meio de Sensoriamento Remoto. A pesquisa foi desenvolvida em áreas de produtores rurais vinculados à Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), localizada no distrito de Quatro Bocas, no município de Tomé-Açu, no Estado do Pará, e trabalhou basicamente com o desenvolvimento de agroflorestas.

Berra et al. (2011) desenvolveram modelos para estimar o volume arbóreo das florestas em uma área retangular localizada na região Leste do Estado do Rio Grande do Sul, por meio de análise de imagens orbitais do sensor TM Landsat 5 e dados obtidos de inventário florestal desse Estado. Foram tomados como variáveis independentes o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, o Índice da Razão e dados estatísticos alocados nas imagens considerando-se como variável dependente Volume Arbóreo Estimado, apresentado no modelo como sendo o valor dos pixels na imagem em metros cúbicos.

Novais et al. (2011) analisaram a cobertura vegetal por comparação do NDVI com o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI – *Normalized Difference Water Index*) por meio de imagens do sensor orbital TM Landsat 5, da Área de Preservação Ambiental (APA) de São Desidério, no Estado da Bahia. O NDWI vem sendo utilizado no monitoramento do estresse hídrico da vegetação, que está relacionado com a intensidade da atividade fotossintética. Obtiveram como resultados que os valores mais altos do NDWI representam a vegetação com maior teor de água em sua estrutura interna, e os mais altos valores do NDVI correspondem à vegetação mais fotossinteticamente ativa. Concluíram que apesar da área ser de conservação há grande degradação.

Costa et al. (2011) estudaram o comportamento da vegetação da Reserva Particular de Patrimônio Natural (RPPN) de Cafundó, localizada no município de Cachoeiro do Itapemirim no Estado do Espírito Santo, por meio de Sensoriamento Remoto, no período de 1987 a 2009. Nessa pesquisa, foram utilizadas imagens do sensor TM Landsat 5 para gerar imagens de NDVI e, por meio de subtração de pares delas, analisaram as mudanças da cobertura vegetal da reserva. A partir dessas novas imagens, foi inferido que 10,83% constituíam área desmatada, 78,42% de área de estabilidade e os 10,75% restantes de área de regeneração, no intervalo de tempo entre as imagens.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Floresta Estadual “*Edmundo Navarro de Andrade*”, antigo Horto Florestal de Rio Claro, está em quase sua totalidade contida no limite do município de Rio Claro, onde se desenvolveram as primeiras pesquisas com espécies de eucalipto que determinaram sua origem. Ela foi escolhida por apresentar densa cobertura de vegetação e ser uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável (UC) administrada pelo Instituto Florestal da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, com manejo sustentável de seus recursos.

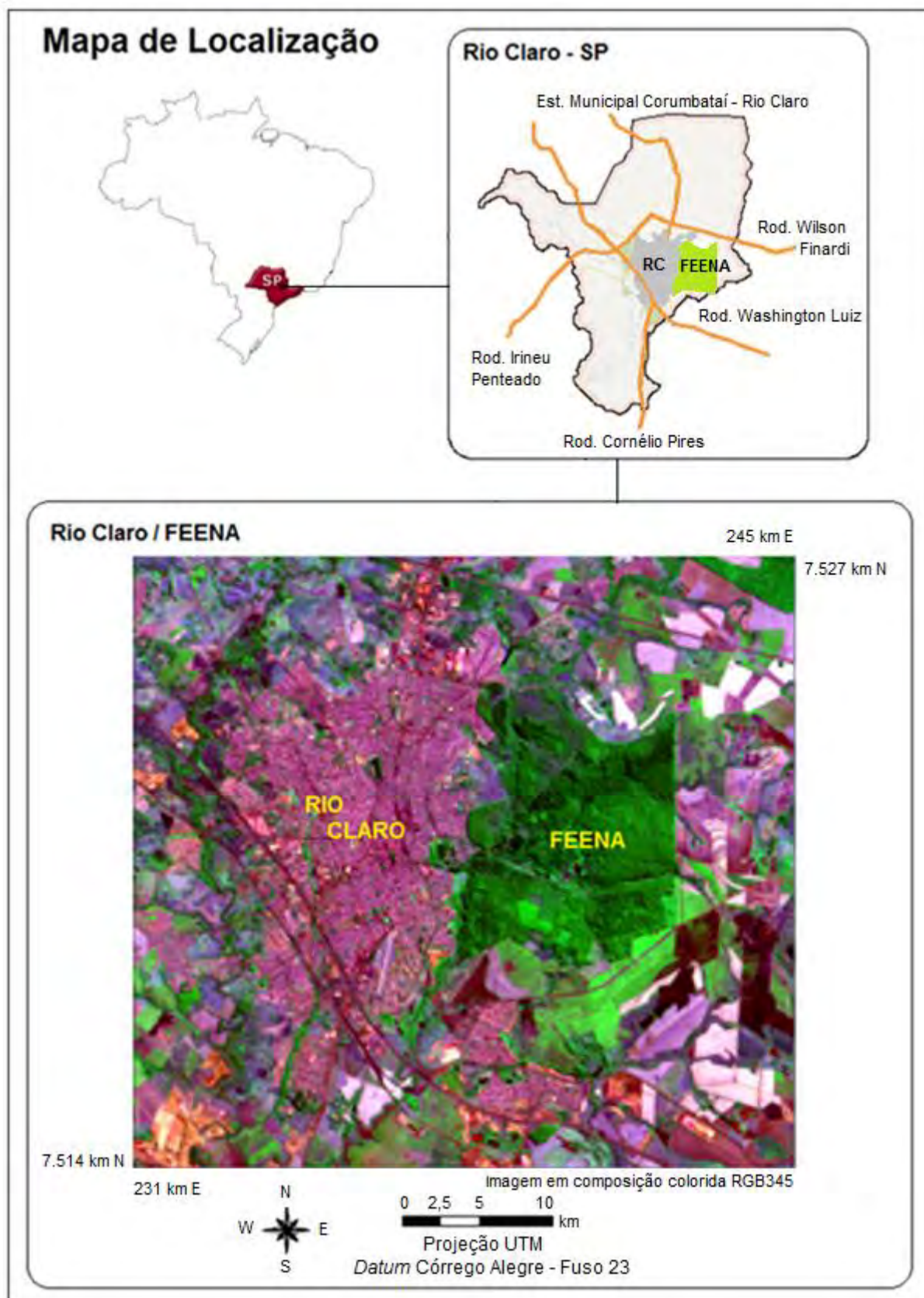
O município de Rio Claro está localizado no Centro-Leste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°05' e 22°40' de Latitude Sul e 47°30' e 47°55' de Longitude Oeste de Greenwich, com relevo predominantemente plano, possui área territorial de 498 km² e integra a Região Administrativa de Campinas. Seus Municípios vizinhos são: ao Norte Corumbataí e Leme, ao Sul Piracicaba, a Leste Araras e Santa Gertrudes e a Oeste Ipeúna e Itirapina.

O clima da região onde está localizada a FEENA, pode ser considerado tropical, com duas estações definidas – Cwa na classificação de Köppen, w: seca no inverno e a: mês mais quente com temperatura acima de 22°C, ou tropical alternativamente seco e úmido, caracterizado pelo inverno seco nos meses de julho, agosto, e setembro, e chuvas de verão, de setembro a março. Quanto à pluviosidade, mais de 80% das precipitações anuais ocorrem de outubro a março e sua média é da ordem de 1450 mm (MONTEIRO, 1973).

Atualmente a economia do município de Rio Claro baseia-se principalmente no cultivo da cana de açúcar e no setor industrial. A principal atividade industrial de Rio Claro está relacionada ao setor ceramista, além da diversidade em produtos industrializados do setor de borrachas especiais, cabos para indústria, doces, eletrodomésticos da linha branca, fibras de vidro, metalúrgicos, nutrição de animais, papelão, peças automobilísticas, produtos químicos e tubos de conexões de PVC (IBGE, 2010).

A Figura 2 apresenta a localização e os limites da cidade de Rio Claro e a Floresta Estadual “*Edmundo Navarro de Andrade*” em seu limite Leste.

Figura 2 - Carta Imagem da localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Breve histórico da FEENA

Na região de Rio Claro, em meados do século XIX, a cultura da cana de açúcar declinou e deu lugar ao cultivo do café. Esta, por sua vez, provocou desenvolvimento e atraiu investimentos, sendo um deles a estrada de ferro (DIAS, 2005).

No final do século XIX, o Brasil tornou-se o maior produtor e exportador mundial de café, sendo necessária a construção de meios de escoamento da produção desse produto do interior para o litoral do Estado de São Paulo. Para esse fim, foram então implantados sistemas ferroviários que, além do escoamento da produção do café, provocaram o desenvolvimento mais rápido da região. Mas, em função disso, muitas florestas naturais foram devastadas para a passagem de trilhos, obtenção de lenha para caldeiras das locomotivas e mais espaço para agricultura. Nesse contexto, surge o reflorestamento que deu origem à Floresta Estadual “*Edmundo Navarro de Andrade*”, nome dado em homenagem ao seu principal criador, localizada no lado leste do município de Rio Claro, Estado de São Paulo (GARCIA, 1992).

Em 1868, foi fundada a Companhia Paulista de Estradas de Ferro (CPEF) com a função de prolongar a estrada de ferro de Jundiaí mais para o interior. Esse prolongamento era fundamental para solucionar o problema de escoamento da produção de café, do interior para o porto de Santos. Esse prolongamento chegou à cidade de Rio Claro em 1876 e teve como consequência o incentivo à industrialização local, o que provocou a expansão da área urbana do município (REIS, ZANCHETA, PONTALTI, 2005; GARCIA, 1992).

Em 1882, a Companhia Paulista de Estradas de Ferro implantou suas oficinas no município de Rio Claro, local onde seriam produzidos vários componentes para suas locomotivas e vagões (GARCIA, 1992).

No início do século XX, a CPEF aumentou a utilização de madeira proveniente de desmatamento em reservas nativas, colocando em risco seus próprios interesses econômicos, pois essa matéria prima começou a ficar escassa na região. Nesse contexto, a Companhia Paulista de Estradas de Ferro contratou o engenheiro agrônomo Edmundo Navarro de Andrade para estudar e definir quais seriam as espécies vegetais mais adequadas para uso da Companhia, que se

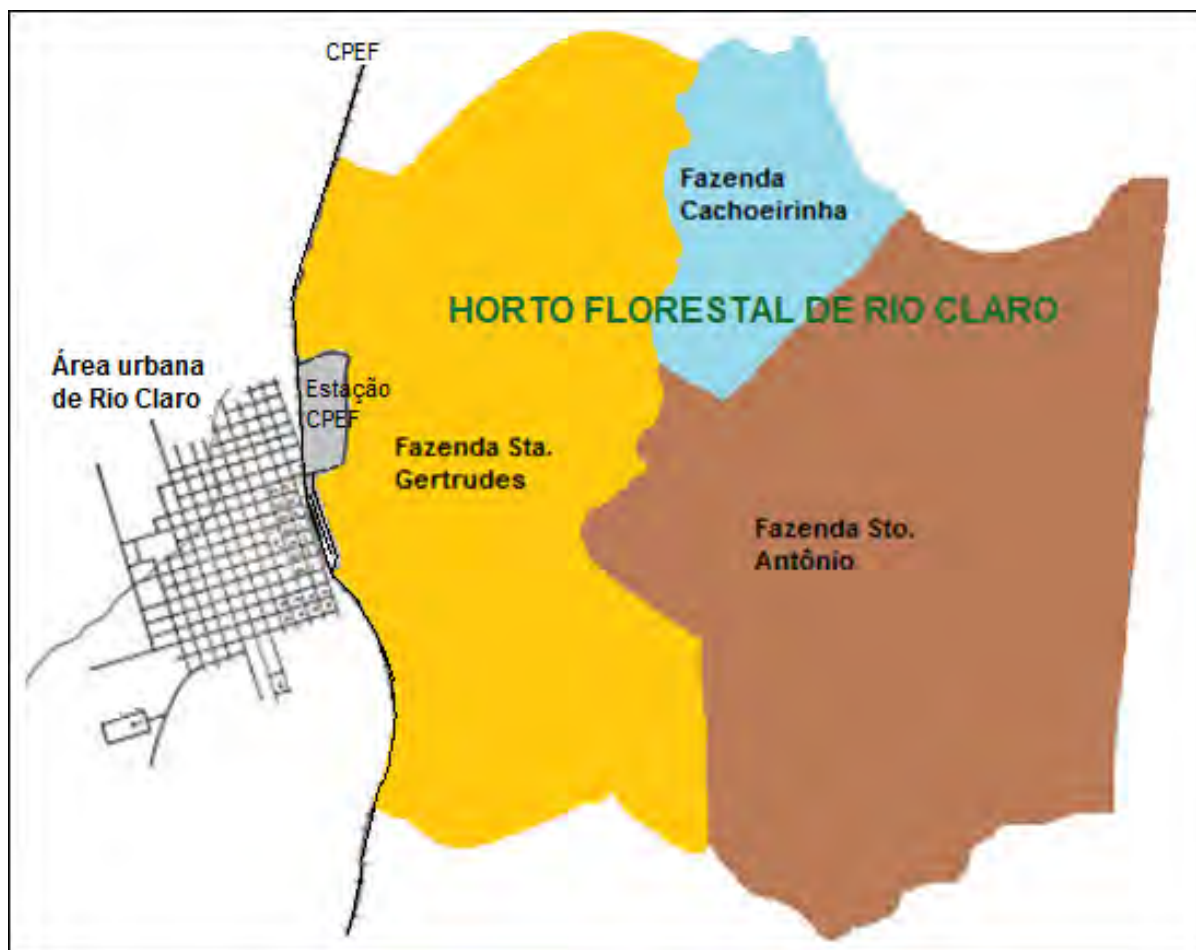
adaptassem bem à região e tomassem o lugar das florestas nativas desmatadas (REIS, ZANCHETA, PONTALTI, 2005).

Em 1904, Edmundo Navarro de Andrade deu início a reflorestamentos experimentais e, em 1909, à construção do Horto Florestal. A preocupação da CPEF era solucionar o problema de sua demanda por madeira para dormentes da estrada de ferro e do carvão usado em suas locomotivas (REIS, ZANCHETA, PONTALTI, 2005).

Em 1909, a Companhia Paulista de Estradas de Ferro comprou a fazenda Santa Gertrudes e deu início ao cultivo de espécies de eucalipto, o que originou o Horto Florestal de Rio Claro, constituindo-se em um banco de pesquisa em estudos de melhoramento genético para a comunidade científica desde essa data (GARCIA, 1992).

Em 1916, a CPEF adquiriu mais duas glebas de terras que faziam parte das fazendas Cachoeirinha e Santo Antonio (REIS, ZANCHETA e PONTALTI, 2005). A Figura 3 mostra a área ocupada pelas fazendas Santa Gertrudes, Santo Antônio e Cachoeirinha, que compuseram o Horto Florestal de Rio Claro, atual FEENA.

Figura 3 - Fazendas que deram origem ao Horto Florestal de Rio Claro



Fonte: Adaptado pelo autor do Plano de Manejo da FEENA de 2005.

Ao longo do tempo, o Horto Florestal de Rio Claro sofreu desapropriações destinadas à construção de novos bairros no Município de Rio Claro, mas, em 9 dezembro de 1977, foi tombado pela Secretaria Estadual de Cultura e, em 11 de junho de 2002, foi transformado na Floresta Estadual 'Edmundo Navarro de Andrade' (FEENA), pelo Decreto nº. 46.819, artigo 1º:

O 'Horto Florestal 'Edmundo Navarro de Andrade', localizado nos Municípios de Rio Claro e Santa Gertrudes, com área de 2.230,53 hectares, fica transformado na 'Floresta Estadual 'Edmundo Navarro de Andrade'', com a finalidade de proteger, conservar e manejar de forma sustentável todo o complexo florestal, ambiental e cultural ali existente, desde espécies vegetais, animais, cursos d'água, o Museu do Eucalipto e demais elementos dos componentes do acervo da área.

Assim, passou a ser uma Unidade de Conservação, prevista na Lei Federal nº. 9.985/200, sendo uma Unidade de Uso Sustentável, característica definida pelo artigo 2º desse decreto:

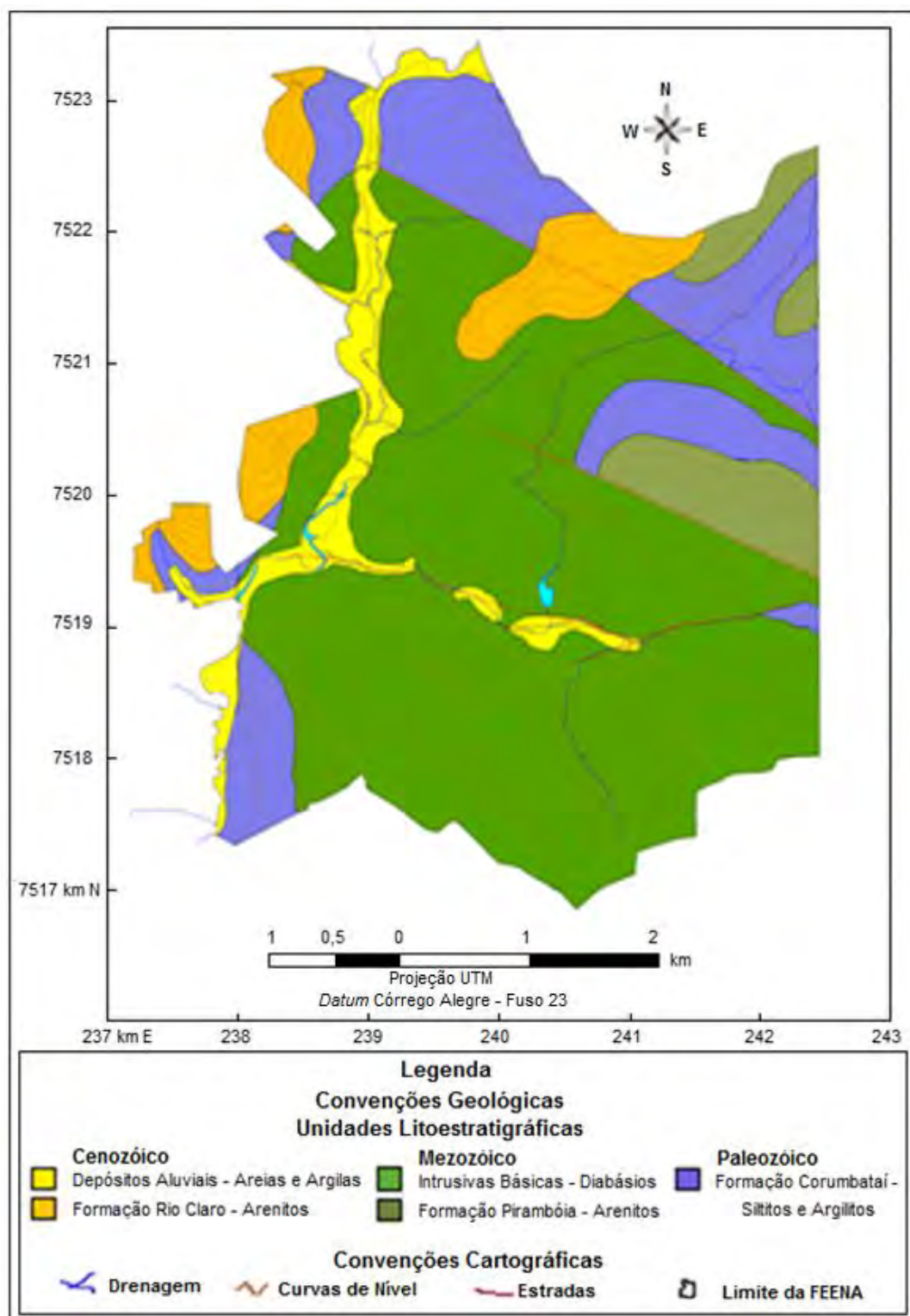
"[...] uso sustentável: exploração de ambiente de maneira a garantir a perenidade dos recursos ambientais renováveis e dos processos ecológicos, mantendo a biodiversidade e os demais atributos ecológicos, de forma socialmente justa e economicamente viável; [...]"

Segundo esse mesmo Decreto, a administração da FEENA ficou sendo exercida pelo Instituto Florestal da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e em 2009 passou à subordinação da Fundação Florestal, órgão vinculado à Secretaria do Meio Ambiente que tem como objetivo contribuir para a conservação, manejo e ampliação das florestas de proteção e produção do Estado de São Paulo.

3.2 Características geológicas, geomorfológicas e pedológicas da região

Segundo o Plano de Manejo da FEENA de 2005, na área da Floresta Estadual "Edmundo Navarro de Andrade", predominam as litologias vinculadas às Rochas Intrusivas Básicas do Mesozoico. Em várias porções menores, ocorrem litologias vinculadas às Formações Corumbataí, Rio Claro e Piramboia, Depósitos Aluviais às margens do Ribeirão Claro e afluentes, mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Mapa geológico da FEENA.



Fonte: Adaptado pelo autor do Plano de Manejo da FEENA de 2005.

A FEENA está inserida no compartimento de relevo denominado Depressão Periférica Paulista, Zona do Médio Tietê, constituída principalmente por arenitos. Essa unidade geomorfológica tem sua evolução morfogenética associada

ao trabalho de erosão das águas da chuva e dos rios, configurando uma unidade de relevo comprimida entre o Planalto Atlântico e o relevo de Cuestas. É uma área com desníveis entre 200 e 300 metros com aproximadamente 450 km de comprimento por 100 km de largura, possuindo altimetria que varia entre 500 e 600 metros (ALMEIDA, 1964).

Segundo o plano de manejo (2005), a FEENA situa-se a leste da mancha urbana de Rio Claro, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí, numa área com classes de relevo cujas declividades variam de 2% a 30%. Possui relevo com colinas amplas, destacando-se pequenas Cuestas e Morros Testemunhos. Em sua maior parte, apresenta topografia com vales suaves e amplos.

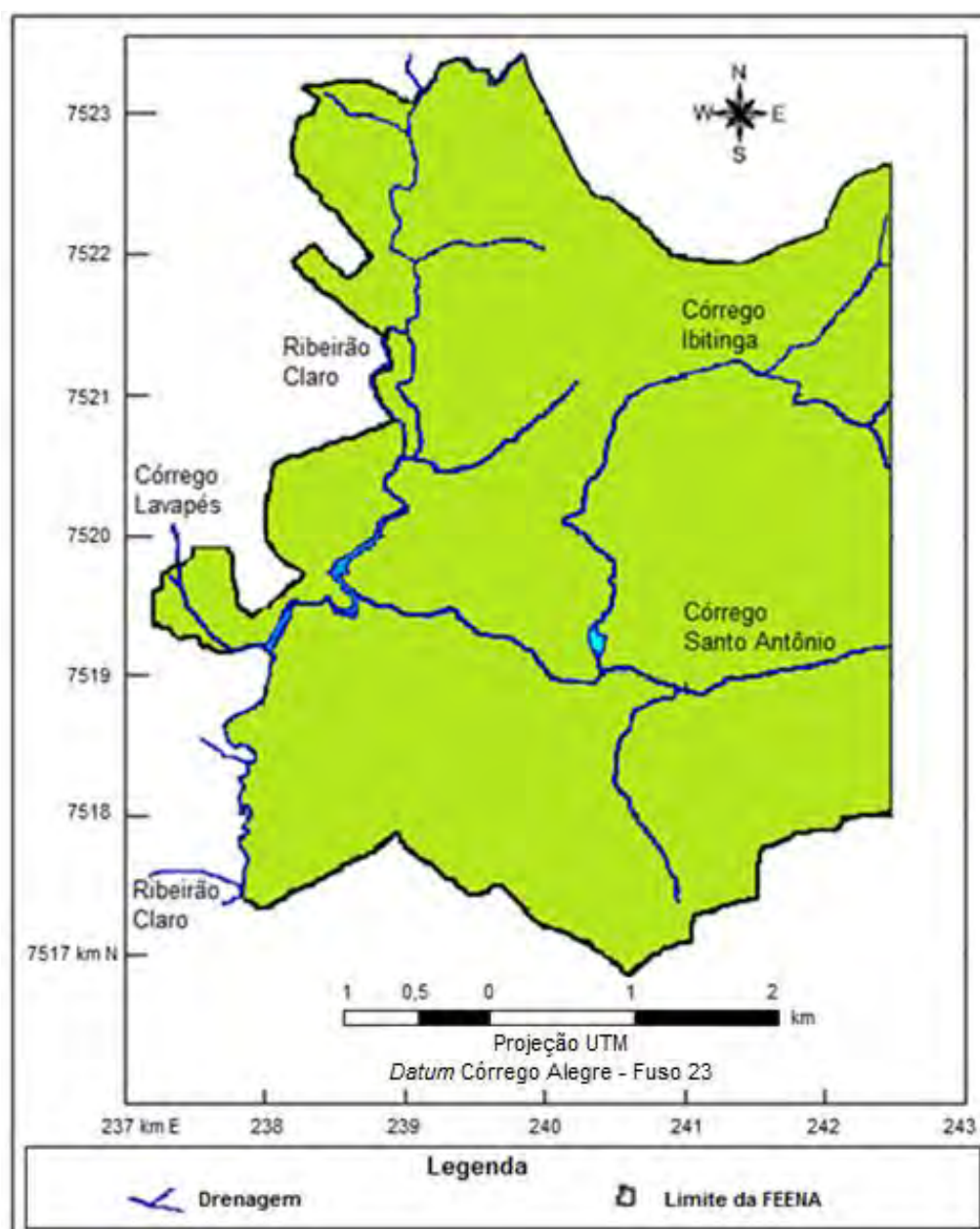
A FEENA esta localizada na região da bacia do rio Corumbataí, que, por sua vez, está contida na Bacia Sedimentar do Paraná, é composta principalmente por duas unidades pedológicas. Ao norte, solos com textura média arenosa e, ao sul, solos com textura argilosa e muito argilosa. (VALENTE, 2001; REIS, ZANCHETA, PONTALTI, 2005).

De acordo com Valente (2001), a Bacia do Rio Corumbataí possui uma extensão de 1.710 km² e abrange os municípios de Corumbataí, Ipeúna, Rio Claro, Santa Gertrudes e parte de Analândia, Charqueada, Itirapina e Piracicaba. O Rio Corumbataí nasce no município de Analândia, numa altitude aproximada de 1060 metros e, depois de percorrer aproximadamente 110 km, tem sua foz no Rio Piracicaba, sendo seus principais afluentes o rio Passa-Cinco, Cabeça e o Ribeirão Claro. Está localizada na zona hidrográfica do Estado de São Paulo que abrange a parte superior do Rio Tietê de sua cabeceira até a barragem de Barra Bonita. A Bacia ocupa posição de destaque na área econômica pela abundância de recursos vegetais e minerais não metálicos e na hídrica, por ser manancial de abastecimento dos municípios importantes contidos em sua área. Ela pode ser dividida em cinco sub-bacias: Alto Corumbataí, ao Norte; Passa-Cinco, a Oeste; Médio Corumbataí, a Sudeste; Ribeirão Claro, a Leste e Baixo Corumbataí, ao Sul.

A FEENA está localizada na Bacia do Ribeirão Claro, contida na Bacia do Rio Corumbataí; possui área aproximada de 270 km² de extensão e contém porções dos municípios de Araras, Corumbataí, Rio Claro e Santa Gertrudes. O Ribeirão Claro atravessa a FEENA no sentido Norte-Sul, deságua no rio Corumbataí, sendo em alguns trechos limite entre a floresta e a área urbana de Rio Claro e é responsável por aproximadamente 20% do abastecimento de água desse município.

Seu canal flui por um vale aberto de fundo achatado, onde se encontram planícies fluviais bem desenvolvidas e meandros abandonados. Os principais afluentes do Ribeirão Claro são os córregos Ibitinga, e Santo Antônio. Há ainda na área da FEENA o Lago Central decorrente do represamento do córrego Ibitinga; a Lagoa do Embaúba, decorrente das águas do córrego Santo Antônio; e o Lago de captação e tratamento de água do Departamento Autônomo de Água e Esgotos de Rio Claro, decorrente do represamento das águas do Ribeirão Claro, Figura 5 (REIS, ZANCHETA, PONTALTI, 2005).

Figura 5 - Hidrografia da FEENA



Fonte: Autor, adaptado do Plano de Manejo da FEENA de 2005.

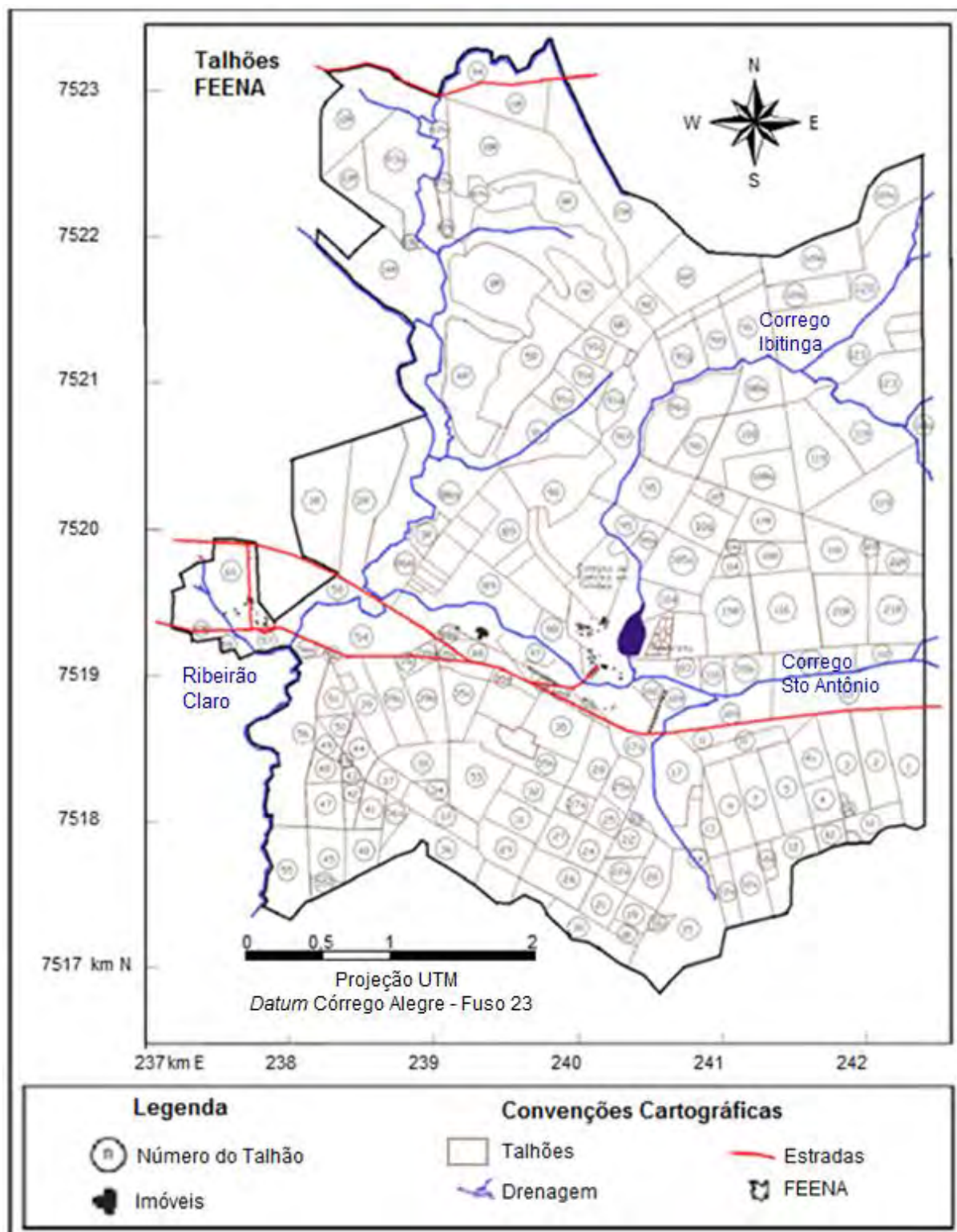
3.3 Cobertura do solo e uso da terra

A cobertura vegetal da Bacia do Rio Corumbataí, que contém a área de estudo, era composta majoritariamente por Floresta Estacional Semi-decidual e áreas menores com Cerrado. No início do século XX, a implantação de culturas de subsistência e de café iniciaram o processo de degradação da cobertura vegetal da Bacia. Posteriormente, a pastagem foi substituindo o café e, no final do mesmo século, ocorreu a presença da cultura da cana-de-açúcar e de frutas, além de reflorestamentos comerciais. Na região do Município de Rio Claro, há predomínio do bioma de transição entre o Cerrado e a Floresta Atlântica (VALENTE, VETTORAZZI, 2003).

De acordo com Valente (2001), na Bacia do Ribeirão Claro, que contém a FEENA, o uso e a cobertura do solo predominante é a cultura da cana-de-açúcar, seguido pelas áreas destinadas à pastagem, florestas plantada e nativa, fruticultura e culturas anuais, além de área urbana. A FEENA é remanescente dos reflorestamentos do antigo Horto Florestal de Rio Claro. Sua população arbórea é constituída, predominantemente, por mais de 60 espécies de híbridos do gênero *Eucalyptus* que foi introduzido no Brasil com fins ornamentais, mas, no início do século XX, passou a ser utilizado na produção de dormentes para as ferrovias e como lenha para alimentar as locomotivas.

Segundo o Plano de Manejo da FEENA de 2005 há 81 talhões com numeração variando entre 1 e 122 e 22 talhões numerados de 1-R a 22-R. As plantações tiveram início em 1909 e mais de 60 espécies de eucalipto foram plantadas, conforme está apresentado na Figura 6 e as quantidades de eucaliptos remanescentes, cerca de 40% em relação ao que foi plantado, separadas por décadas, estão apresentadas na Tabela 3.

Figura 6 - Divisão da FEENA em talhões



Fonte: Modificado pelo autor do Plano de Manejo - FEENA 2005.

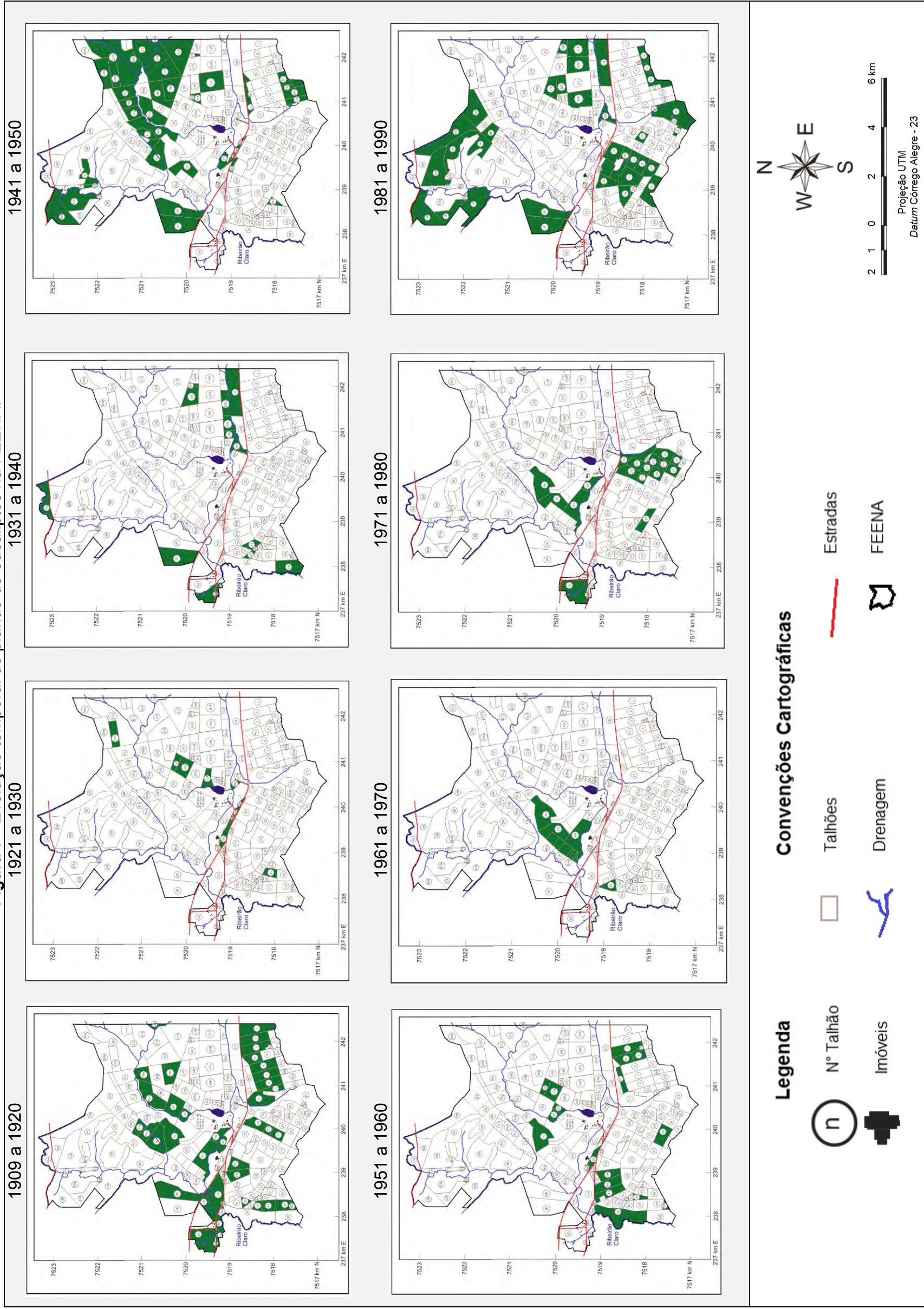
Tabela 3 - Quantidade de árvores plantadas e remanescentes

Período de Plantio	Quantidade Plantada	Situação em 1994
1909 – 1920	280.646	26.563
1921 – 1930	27.752	6.274
1931 – 1940	251.714	28.582
1941 – 1950	1.010.882	175.808
1951 – 1960	365.008	80.638
1961 – 1970	11.211	3.197
1971 – 1980	195.073	50.450
1981 – 1990	996.644	903.540
Total	3.138.930	1.275.052

Fonte: Autor, obtido do Plano de Manejo da FEENA de 2005

No anexo as Tabelas de 22 a 29, apresentam as discriminações de plantio de eucaliptos nos talhões da FEENA, entre os anos de 1909 e 1990, separadas em décadas, e a Figura 7, a localização dos talhões da FEENA, onde ocorreu esse plantio, separado por décadas.

Figura 7 - Evolução temporal do plantio de eucaliptos na FEENA.



Fonte: Autor, montado a partir do Plano de Manejo FEENA 2005

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Base Cartográfica

A base cartográfica foi composta pela Carta Topográfica de Rio Claro na escala 1:50.000, folha SF-23-m-l-4, com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), *Datum* Córrego Alegre, fuso 23, da Fundação IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia, primeira edição em 1969. A Carta Topográfica de Rio Claro foi fornecida pelo CEAPLA, em meio digital.

4.1.2 Dados meteorológicos

As variáveis meteorológicas utilizadas nesta pesquisa foram temperatura e pluviosidade referentes à região que contém a FEENA do período de 1984 a 2011. Os dados diários mensais e anuais dessas variáveis foram fornecidas pelo Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA), uma unidade do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP, campus de Rio Claro.

Segundo o CEAPLA, esses dados de pluviosidade de temperatura de 1954 a 1996 são originários do Posto Meteorológico, localizado no interior da FEENA, antigo Horto Florestal de Rio Claro e de 1994 a 2011, são provenientes da Estação Meteorológica do CEAPLA.

Os dados de temperatura, referentes ao Posto Meteorológico do Horto Florestal, apresentaram a temperatura máxima e mínima diária, sendo a média obtida em função desses valores, e os da Estação Meteorológica do CEAPLA, as médias mensais foram obtidas por meio das quatro medidas diárias disponíveis das 7:00, 9:00, 15:00 e 21:00 horas e, os dados de pluviosidade referentes aos dois locais apresentam uma única leitura diária.

A Estação Meteorológica do CEAPLA que está localizada nas coordenadas geográficas 22°23' Latitude Sul, 47°32' Longitude Oeste de Greenwich W e altitude de 626,5 metros, foi inaugurada em 1993, e a coleta de dados teve

início em janeiro de 1994. Atualmente, a Estação Meteorológica do CEAPLA faz parte da Rede de Postos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, sendo seu prefixo D4112M do DAEE.

4.1.3 Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens do sensor “*Thematic Mapper*” (TM), do satélite LANDSAT 5 referentes à órbita 220 ponto 075, com resolução espacial 30x30 metros e resolução radiométrica de 8 bits/pixel, em formato digital com extensão TIFF, do período de 1985 a 2011.

As imagens estão discriminadas na Tabela 4, com respectivas datas, horário de passagem e ângulo de elevação solar.

Tabela 4 - Dados das imagens utilizadas do sensor TM LANDSAT 5

TM Landsat 5 Órbita 220/075		
Data	Passagem Horário Greenwich	Ângulo de Elevação Solar (°)
10/08/1985	12:39:50	36,8444
15/07/1987	12:35:18	31,8273
04/07/1989	12:37:43	31,5224
12/09/1991	12:33:59	44,6047
13/06/1993	12:32:40	31,1860
05/07/1995	12:15:23	27,9268
10/07/1997	12:40:27	32,2715
01/08/1999	12:47:51	36,2277
05/07/2001	12:50:32	33,5188
15/10/2003	12:48:02	56,6753
16/07/2005	12:57:53	35,4920
22/07/2007	13:03:44	37,1124
12/08/2009	12:59:24	40,6735
18/08/2011	12:58:55	45,0494

Fonte: Dados de efemérides do Landsat 5 para a área de estudo (INPE)

Um dos critérios utilizados para a escolha das imagens foi ausência de nuvens no quarto quadrante, onde se encontra a área de estudo pesquisada. Além disso, foi dada preferência aos meses de junho, julho e agosto, contidos no período do ano considerado como seco, apenas as imagens dos anos de 1991 e de 2003 referem-se aos meses de setembro e outubro, respectivamente.

O sensor TM do satélite LANDSAT 5 possui separação espectral em sete bandas, área imageada de 185x185 km, e sua função principal é oferecer subsídios para mapeamentos temáticos na área de recursos terrestres. As resoluções e principais características das bandas espectrais das imagens estão apresentadas na Tabela 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Resoluções do sensor TM LANDSAT 5

Bandas Espectrais	Resoluções			
	Espectral (μm)	Espacial (m)	Temporal (dia)	Radiométrica (bits)
B1 – Azul	0.452 – 0.518			
B2 – Verde	0.528 – 0.609			
B3 – Vermelho	0.626 – 0.693	30		
B4 – Infrav. Próximo	0.776 – 0.904		16	8
B5 – Infrav. Médio	1.567 – 1.784			
B6 – Infrav. Termal	10.45 – 12.42	120		
B7 – Infrav. Médio	2.097 – 2.349	30		

Fonte: INPE

Tabela 6 - Discriminação das faixas espectrais do sensor TM Landsat 5

Banda	Algumas Características e Aplicações
B1	É a que penetra mais em corpos de água com alta transparência óptica. Absorvida pela clorofila e pigmentos fotossintéticos. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça e pode apresentar atenuação atmosférica.
B2	Apresenta boa penetração em corpos de água e pode ser usada para análise da quantidade e qualidade de sedimentos em suspensão.
B3	Apresenta bom contraste em diferentes tipos de cobertura vegetal. A vegetação verde, densa e uniforme verde absorvem muito a radiação dessa faixa e sua representação nas imagens é escura. Apresenta bom contraste entre áreas vegetadas e não vegetadas. É a banda mais utilizada para delimitar manchas urbanas e áreas agrícolas.
B4	Muito refletida pela vegetação verde, densa e uniforme, aparecendo bem claras nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade de dosséis vegetais e à morfologia do terreno. Utilizada para obtenção de informações geomorfológicas, geológicas e do solo, além de apresentar distinção entre áreas ocupadas com pinheiros e eucaliptos e identificar áreas agrícolas.
B5	Utilizada no estudo de estresse da vegetação em função de sua sensibilidade à umidade.
B6	Apresenta sensibilidade a fenômenos térmicos. É utilizada para detectar propriedades termais da água, da vegetação, do solo e de rochas.
B7	Usada na obtenção de informações geomorfológicas, geológicas e dos solos em função de sua sensibilidade à morfologia do terreno.

Fonte: INPE 2010

Para que as imagens fossem cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi efetuado cadastro e escolhidas as imagens apresentadas via catálogo. Depois de pedido, foram recebidos por e-mail os endereços onde as imagens puderam ser baixadas. No processamento das imagens orbitais, foram utilizados os programas IDRISI 3.2 e ENVI 4.5.

4.2 Métodos

Esta pesquisa envolveu análise da série temporal de índice de vegetação NDVI, da temperatura e da pluviosidade, além de estudo das correlações entre esse índice e as variáveis meteorológicas mencionadas, de uma área de reflorestamento, a Floresta Estadual “Edmundo Navarro de Andrade”, localizada no município de Rio Claro, Estado de São Paulo. Foram incorporadas à análise ferramentas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas.

A metodologia aplicada envolveu pré-processamento e processamento das imagens com o programa ENVI, um Sistema de Informações Geográficas, para que fossem obtidas imagens de índice de vegetação e o processamento e análise de dados meteorológicos por meio de planilhas eletrônicas.

4.2.1 Análise estatística

Para a análise da variabilidade das variáveis estudadas foram aplicadas medidas estatísticas de tendência central e de dispersão. Após esse tratamento foram obtidas as séries de dados meteorológicos e das médias do NDVI e tabelas e gráficos foram elaborados em planilhas do Excel, para serem utilizadas nos estudos de variabilidade e de tendência.

Foram calculadas a média (μ), o Desvio Padrão (DP) e o Coeficiente de Variação (CV), medidas representadas, respectivamente, pelas Equações 3, 4 e 5 (SPIGEL, 1978).

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (4)$$

$$CV = \frac{DP}{\mu} 100\% \quad (5)$$

Sendo μ a média; n o número de dados; x_i os valores dos dados para $i = 1, 2, \dots, n$; DP o desvio padrão; e CV o coeficiente de variação.

A média é a medida estatística de tendência central mais utilizada para representar um conjunto de dados de séries temporais.

Para se estabelecer se os dados estão concentrados em torno da média, são utilizadas as medidas de dispersão e, dentre elas, o desvio padrão, raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre a média e o valor dos dados, quanto menor for o desvio padrão maior será a concentração dos dados em torno da média. (SPIEGEL, 1978)

O coeficiente de variação determina o percentual do desvio padrão em relação à média. Segundo classificação de Pearson, para valores entre 0 e 15%, os dados são considerados altamente concentrados em torno da média; para valores entre 15 e 30% moderadamente concentrados e, para valores acima de 30% os dados são considerados altamente dispersos (SPIEGEL, 1978).

Com as séries temporais de dados meteorológicos e das médias do NDVI, foram elaboradas tabelas e gráficos em planilhas do Excel. Para identificar tendências dos dados na série, isto é, verificar se ocorre manutenção, aumento ou diminuição dos valores das variáveis meteorológicas dentro da série temporal (FERRARI, 2012), foi aplicada a técnica de regressão, baseada no método de mínimos quadrados, que ajusta a melhor curva a um conjunto de dados em um gráfico de dispersão. Além da equação, foi obtido para cada curva de ajuste e tendência, o coeficiente de determinação R^2 , que juntamente com as medidas da Estatística Descritiva mostram o tipo de tendência. A análise da tendência pode ser realizada pelo valor do coeficiente angular da equação da reta obtida pela utilização do método de regressão linear (SPIEGEL, 1978).

Segundo Spigel (1985) e Bussab (2010) o valor de R^2 , apresentado na Equação 6, próximo a zero, indica que praticamente não há correlação entre as variáveis e, quanto mais próximo a 1, mais significativa é a correlação e a curva de ajuste. Estatisticamente, o coeficiente de determinação R^2 fornece o percentual de dependência da variável dependente em função da independente.

$$R^2 = \frac{\sum(y_{estimado} - y_{m\ medio})^2}{\sum(y - y_{m\ medio})^2} \quad (6)$$

Sendo: R^2 o coeficiente de determinação; $y_{estimado}$ é o valor estimado, obtido pela equação da curva de tendência; $y_{m\ medio}$ é a média aritmética dos valores da variável dependente; e y representa os valores da variável dependente (DA SILVA, 1999).

4.2.2 Elaboração da Base Cartográfica e do Mapa da FEENA

A vetorização da Base Cartográfica de Rio Claro e dos limites dos talhões da FEENA foi realizada com o CAD *Autodesk Map*, aplicativo que integra funções de vetorização, edição e plotagem.

Em seguida, foi estruturado um banco de dados no *SPRING*, um Sistema de Informações Geográficas (SIG), com a projeção UTM/Córrego Alegre/Fuso 23 para a geração dos mapas da Base Cartográfica e dos Talhões da FEENA.

4.2.3 Tratamento dos dados meteorológicos

Os dados meteorológicos, relativos à temperatura e pluviosidade, fornecidos pelo CEAPLA, foram inseridos em planilhas do Excel e nelas reorganizados para posterior tratamento e análise.

Em função das diferentes localizações e formas de coleta, as médias mensais e as anuais foram calculadas separadamente para os dados relativos ao Posto do Horto no período de 1984 a 1993 e para os relativos à Estação do CEAPLA do período de 1994 a 2011.

Os dados de pluviosidade, referentes ao Posto do Horto Florestal e os da Estação do CEAPLA tiveram formas de leitura idêntica, apresentam dados diários que dão origem aos mensais e anuais e foram tratados sem distinção em relação à sua origem.

4.2.4 Determinação do NDVI

Para determinar as cartas imagem do NDVI foi realizado o tratamento e registro das imagens e a minimização do efeito da atmosfera.

4.2.4.1 Tratamento das imagens

Na geração das cartas imagens do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, foram utilizadas imagens do sensor TM do satélite orbital Landsat 5, órbita 220, ponto 075, do período de 1985 a 2011. Essas imagens no formato TIFF foram importadas no ENVI e posteriormente recortadas em formato retangular, contendo a área urbana de Rio Claro e a FEENA.

4.2.4.2 Registro das imagens

Após a importação e recorte das imagens no ENVI, foram geradas composições coloridas “falsa-cor”, para cada uma das imagens que compõem a série temporal, aplicando-se o Azul para a Banda 3, o Verde para a Banda 5 e o Vermelho para a Banda 4 (BGR354).

Com base na Carta Topográfica de Rio Claro georreferenciada, foram escolhidos os pontos de controle e obtidas as suas coordenadas para que fosse realizado o georreferenciamento.

O georreferenciamento foi efetuado com o programa ENVI pelo método polinomial com polinômio de grau um, projeção UTM Córrego Alegre – Fuso 23 S, e aplicação da técnica de interpolação do vizinho mais próximo. Em

todas as imagens, dos oito pontos de controle, apenas 5 foram escolhidos, de forma que fosse obtido o menor Erro Médio Quadrático (RMS).

Para que o georreferenciamento fosse mais preciso, a escolha dos oito pontos de controle foi realizada, obedecendo a uma distribuição mais uniforme possível na região da área da FEENA.

4.2.4.3 Minimização do efeito da atmosfera

Em seguida ao georreferenciamento, foi efetuada a minimização do efeito causado pela atmosfera por meio da aplicação do método de subtração do objeto escuro (DOS – Dark Object Subtraction), Equação 7, proposto por Chaves, em 1988, nas bandas B3 e B4 das imagens. A metodologia dessa correção assume que alvos com forte absorção de irradiação deveriam apresentar valor de radiação próximo a zero, o que geralmente não é observado nas imagens. A correção é feita pela subtração do menor valor de cinza obtido por meio do histograma da imagem original, sobre todos os pixels dela.

$$ND_{final} = ND_{inicial} - ND_{mínimo} \quad (7)$$

Sendo: ND_{final} , $ND_{inicial}$ e $ND_{mínimo}$ os números digitais final, inicial e mínimo, respectivamente.

4.2.4.4 Cálculo do NDVI

A série temporal dos mapas do NDVI entre 1985 e 2011, foi obtida pela aplicação da Equação 8 por meio do programa ENVI.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (8)$$

Sendo: RED o valor do ND da refletância na faixa do vermelho e NIR o do ND da refletância na faixa do infravermelho próximo.

Em seguida, foi feito novo recorte contemplando a área urbana de Rio Claro e a FEENA. As coordenadas UTM Córrego Alegre Fuso 23 do canto superior esquerdo (233.000, 7.527.000) e do canto inferior direito (242.000, 7.524.000) definiram esses recortes. Nesses mapas ficam claramente distinguidas a área urbana de Rio Claro e a Floresta.

Para obterem-se as médias, os desvios padrão, e as distribuições de frequência relativa do NDVI da série temporal de mapas foi definida no ENVI a FEENA como área de interesse, delimitando-a a partir do seu mapa de talhões georreferenciado.

Os valores das medidas estatísticas foram transportados para planilha eletrônica do Excel e, por meio delas, foram elaborados gráficos e curvas de ajuste e tendência com as respectivas equações e coeficientes de determinação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da variabilidade de parâmetros meteorológicos

5.1.1 Temperatura

Para a análise da variabilidade das variáveis climáticas estudadas, foi utilizada a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, além de gráficos de tendência mensais e anuais, do período de 1984 a 2011. Essas medidas são consideradas por Back (2001) as mais adequadas para expressar a variação dos dados referentes a um período de tempo. No caso das curvas de tendência, foi aplicada a regressão baseada no método de mínimos quadrados.

O tratamento dos dados de temperatura foi realizado separando-se os referentes ao Posto do Horto, no período de 1984 a 1993, e os da Estação do CEAPLA, no período de 1994 a 2011.

A Tabela 7 apresenta a média das temperaturas mensais e anuais do Posto Pluviométrico do Horto.

Tabela 7 - Médias da temperatura do Posto Meteorológico do Horto Florestal

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1984	24,2	24,8	23,0	20,8	20,0	18,4	18,2	18,2	18,5	21,8	22,2	21,7	21,0
1985	21,8	23,2	22,1	21,1	17,9	15,7	15,8	19,1	19,7	21,4	22,1	22,6	20,2
1986	23,2	22,9	21,1	22,1	21,2	18,3	16,9	18,9	19,8	20,8	22,4	22,1	20,8
1987	22,8	21,9	22,9	22,7	19,5	17,3	19,4	19,0	19,8	22,4	23,0	22,8	21,1
1988	23,6	23,0	22,8	21,7	19,7	16,8	15,7	18,5	21,7	21,0	21,7	22,8	20,8
1989	23,5	23,4	23,5	22,4	19,0	17,8	17,1	18,8	19,7	20,5	22,0	21,4	20,8
1990	23,9	25,7	24,5	22,9	18,3	18,4	18,1	19,6	18,2	21,3	23,7	19,2	21,2
1991	19,3	19,5	18,7	22,2	19,4	18,6	17,2	19,2	18,6	20,1	21,6	22,3	19,7
1992	21,3	20,8	24,0	29,9	18,6	18,0	16,6	17,5	18,6	19,9	20,3	20,1	20,5
1993	21,8	20,1	23,1	22,1	19,2	16,2	18,0	16,7	19,8	21,2	22,9	22,2	20,3
Média	22,5	22,5	22,6	22,8	19,3	17,5	17,3	18,5	19,4	21,0	22,2	21,7	20,6
DP	1,43	1,88	1,57	2,45	0,89	0,96	1,09	0,84	0,97	0,72	0,87	1,13	0,43
CV(%)	6	8	7	11	5	5	6	5	5	3	4	5	2

Fonte: Autor, dados do CEAPLA

Pode-se observar na Tabela 7 que as médias mensais de cada ano estão concentradas em torno de sua média geral, segundo a classificação de Pearson, pois o maior valor encontrado para o seu coeficiente de variação foi 11%, referente ao mês de abril. Além disso, a menor média anual de temperatura ocorreu no ano de 1985 e o coeficiente de variação das médias anuais foi 2%, indicando uma alta concentração dessas em relação à média geral 20,6°C.

A Tabela 8 apresenta a média das temperaturas mensais e anuais da Estação Meteorológica do CEAPLA.

Tabela 8 - Médias da temperatura da Estação Meteorológica do CEAPLA

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1994	24,4	26,2	23,9	22,3	20,7	17,0	19,2	20,7	24,1	25,4	24,8	25,6	22,9
1995	25,6	24,4	24,0	22,6	19,4	18,9	20,0	22,7	22,7	23,1	24,6	24,7	22,7
1996	25,6	25,2	24,5	23,0	19,3	18,2	17,5	20,6	21,3	23,5	23,8	25,1	22,3
1997	24,3	25,6	24,0	22,4	19,7	17,9	19,1	20,7	23,5	24,2	25,4	25,9	22,7
1998	26,4	25,5	25,6	23,1	19,4	17,7	18,9	21,9	22,6	22,4	24,5	25,2	22,8
1999	25,1	24,6	25,2	22,5	19,4	18,0	19,6	20,3	22,6	23,2	23,8	25,4	22,5
2000	25,1	24,8	24,4	23,1	20,2	20,0	17,6	20,4	22,0	26,3	24,6	24,8	22,8
2001	26,0	26,0	25,8	24,4	20,0	19,1	19,5	21,6	22,9	24,3	25,6	24,7	23,3
2002	24,6	23,8	26,4	25,6	21,1	20,9	18,8	22,8	21,8	27,8	25,2	25,9	23,7
2003	25,0	27,0	24,9	23,5	19,8	20,6	19,8	19,5	23,3	24,6	24,4	25,6	23,2
2004	24,2	24,0	23,8	23,3	18,9	18,4	18,3	20,7	25,4	22,6	24,5	24,9	22,4
2005	24,8	25,8	25,1	24,3	21,7	20,1	18,9	22,1	21,9	25,2	24,5	24,5	23,2
2006	25,9	24,7	25,3	22,9	19,0	19,1	19,8	22,2	22,2	24,5	24,6	25,4	23,0
2007	24,7	26,1	26,3	24,2	19,9	20,0	18,7	21,6	25,1	26,5	24,2	25,5	23,5
2008	24,4	25,2	24,5	22,8	19,6	19,5	19,4	22,0	21,8	24,9	25,1	24,6	22,8
2009	24,5	25,4	25,6	23,2	21,7	17,5	19,4	20,5	23,0	23,9	26,6	25,2	23,0
2010	25,5	26,6	25,6	23,2	20,1	18,7	20,4	21,2	23,9	23,3	24,8	25,7	23,3
2011	24,0	24,1	22,5	21,6	17,5	15,4	17,8	19,5	20,4	22,2	21,8	23,1	20,8
Média	25,0	25,3	24,9	23,2	19,9	18,7	19,0	21,2	22,8	24,3	24,6	25,1	22,8
DP	0,68	0,88	0,97	0,90	0,98	1,35	0,81	0,97	1,24	1,47	0,93	0,65	0,61
CV(%)	3	3	4	4	5	7	4	5	5	6	4	3	3

Fonte: Autor, dados do CEAPLA

Na Tabela 8 as médias mensais de cada ano também apresentam alta concentração em torno de sua média geral, segundo a classificação de Pearson, pois o maior valor encontrado para o seu coeficiente de variação foi 7%, referente ao mês de junho. A maior média de temperatura ocorreu no ano de 2002, o coeficiente de variação foi 3% e a média anual geral ficou em 22,8°C, 2,2 graus acima da média

dos dados de temperatura referentes ao Horto, representados na Tabela 7, o que já era esperado, em virtude do Posto se encontrar no interior do Horto.

Em decorrência dos anos das imagens orbitais estudadas, foi obtida a média da temperatura anual entre o ano anterior e o ano da imagem. A Tabela 9 apresenta essas médias bianuais.

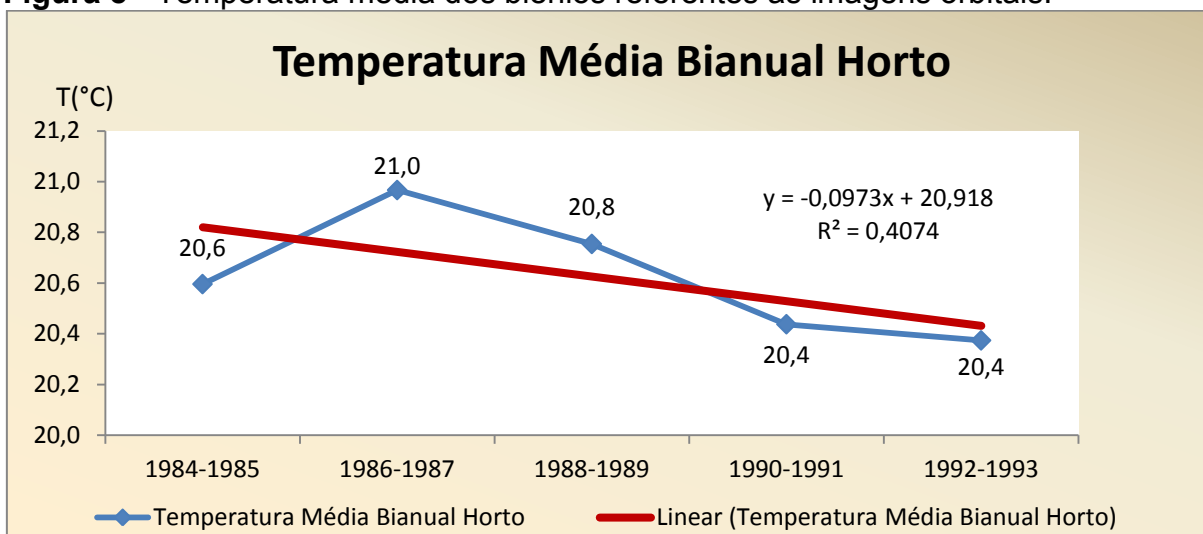
Tabela 9 - Médias bianuais da temperatura da região da área de estudo

Local	Biênio	Média
Horto	1984-1985	20,6
	1986-1987	21,0
	1988-1989	20,8
	1990-1991	20,4
	1992-1993	20,4
CEAPLA	1994-1995	22,8
	1996-1997	22,5
	1998-1999	22,6
	2000-2001	23,0
	2002-2003	23,4
	2004-2005	22,8
	2006-2007	23,3
	2008-2009	22,9
	2010-2011	22,0

Fonte: Autor, dados do CEAPLA

A Figura 8 apresenta o gráfico das temperaturas médias bianuais do Posto Meteorológico do Horto.

Figura 8 - Temperatura média dos biênios referentes às imagens orbitais.

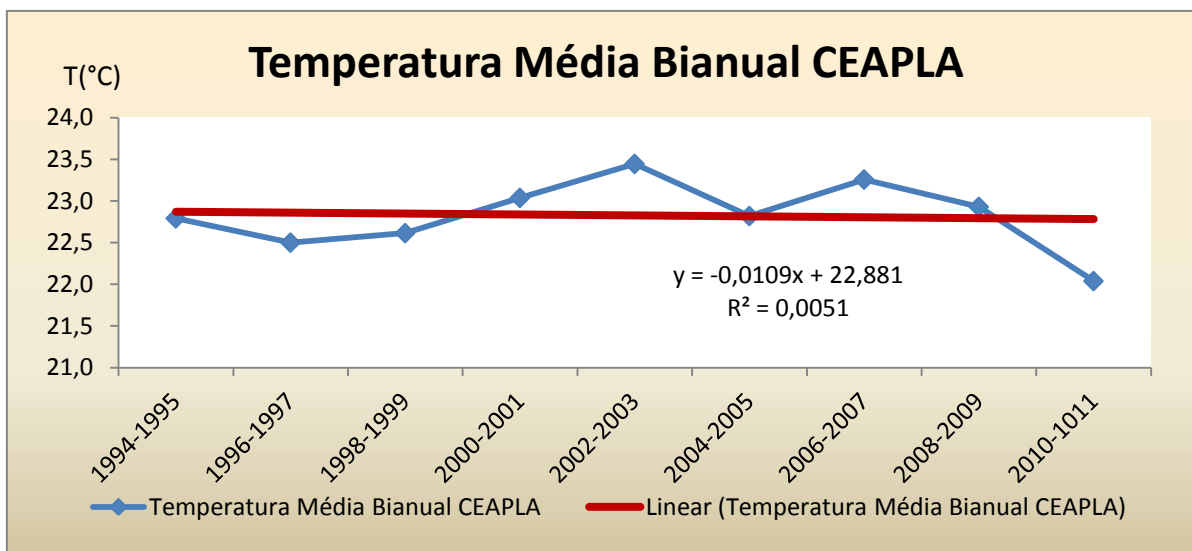


Fonte: Autor, dados do CEAPLA

O gráfico da Figura 8 mostra que a reta de mínimos quadrados, ajustada para a temperatura média bianual dos dados referentes ao Horto, tem baixa tendência de decréscimo, evidenciado pelo seu coeficiente negativo, $a = -0,0973$. O coeficiente de determinação, que explica a variação da temperatura média bianual, $R^2 = 0,407$, indica que a reta de tendência tem baixo ajuste da temperatura em relação aos dados.

A Figura 9 apresenta o gráfico das temperaturas médias bianuais da Estação Meteorológica do CEAPLA.

Figura 9 - Temperatura média dos biênios referentes às imagens orbitais.

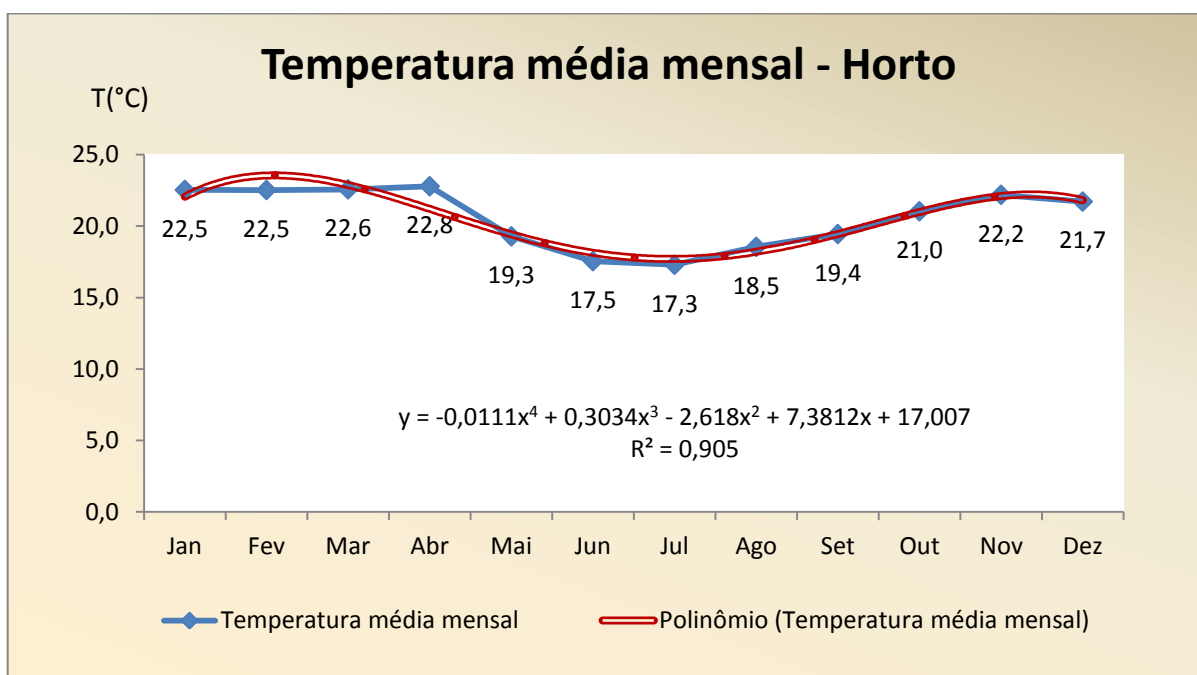


Fonte: Autor, dados do CEAPLA

O gráfico da Figura 9 mostra que a reta de mínimos quadrados ajustada para a temperatura média bianual dos dados referentes à Estação Meteorológica do CEAPLA tem baixa tendência de decréscimo, evidenciado pelo seu coeficiente negativo $a = -0,0109$, mas próximo a zero e o seu coeficiente de determinação, $R^2 = 0,0051$, indica que a reta de tendência tem baixo ajuste em relação ao tempo.

Com as médias mensais da temperatura referente ao Posto do Horto e à Estação do CEAPLA, apresentadas nas Tabelas 7 e 8, os respectivos gráficos foram elaborados e apresentados nas Figuras 10 e 11, cada qual com sua curva de tendência.

Figura 10 - Médias das temperaturas médias mensais referentes ao Horto



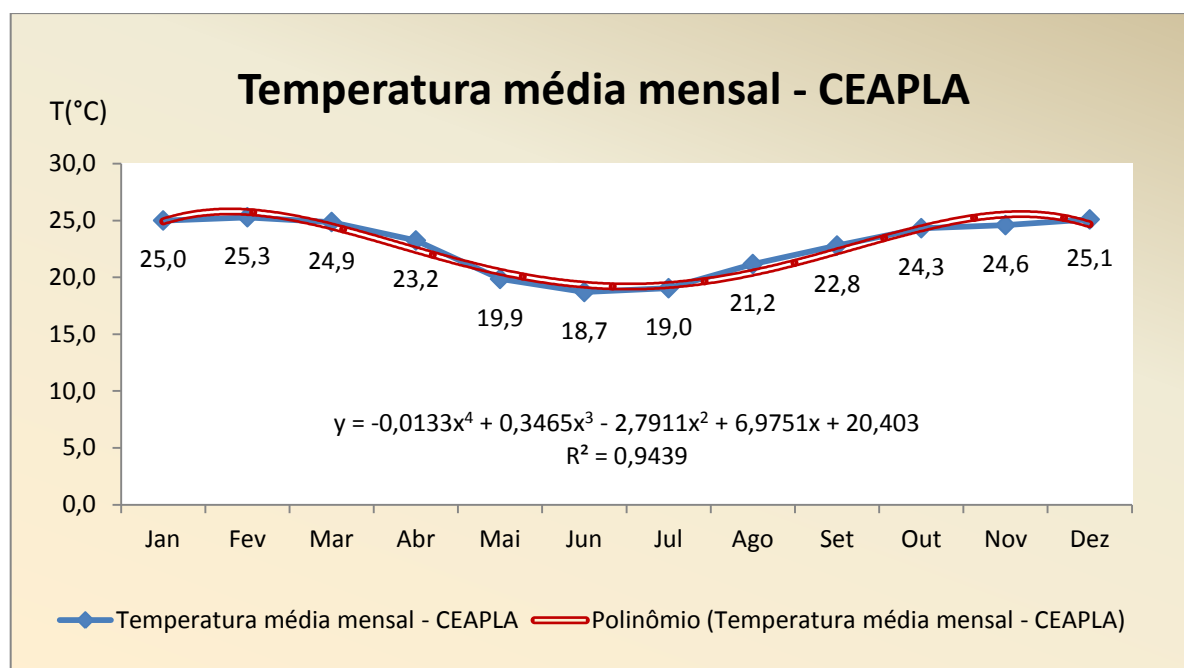
Fonte: Autor, dados do CEAPLA

O gráfico da Figura 10 mostra que a curva de mínimos quadrados, ajustada para a temperatura média mensal do Posto Meteorológico do Horto Florestal, é um polinômio de grau quatro, apresentado na Equação (9), com 90% de ajuste aos dados, fato confirmado pelo seu coeficiente de determinação $R^2 = 0,905$.

$$y = -0,01x^4 + 0,3x^3 - 2,6x^2 + 7,3x + 17 \quad (9)$$

Pelo gráfico da Figura 10 constata-se que os meses de menor média de temperatura foram junho, julho e agosto, com médias no período inferiores a 19°C; os quatro primeiros meses do ano e os dois últimos foram os mais quentes, com médias de temperatura acima dos 21,5°C.

Figura 11 - Médias das temperaturas médias mensais à Estação do CEAPLA



Fonte: Autor, dados do CEAPLA

O gráfico da Figura 11 mostra que a curva de mínimos quadrados, ajustada para a temperatura média mensal referente aos dados da Estação do CEAPLA, é um polinômio de grau quatro, apresentado na Equação (10), com alto ajuste aos dados da série, fato confirmado pelo seu coeficiente de determinação $R^2 = 0,943$.

$$y = -0,01x^4 + 0,3x^3 - 2,8x^2 + 7,0x + 20,4 \quad (10)$$

Foram testadas, para o ajuste, curvas de tendência linear e polinomial com variação de grau de 2 a 6. Acima do grau 4, o valor do coeficiente de determinação R^2 apresentou variação inferior a 0,03, e abaixo desse grau, a variação foi superior a 0,27; assim, foi escolhida como curva de tendência o polinômio com menor grau que apresentasse R^2 acima de 0,9.

De acordo com os dados das Tabelas 7, referente ao Posto do Horto, o maior valor do desvio padrão, $2,45^{\circ}\text{C}$, das médias mensais ocorreu no mês de abril e o menor valor, $0,84^{\circ}\text{C}$, em agosto. O maior coeficiente de variação, 8%, ocorreu no mês de outubro. Esses valores indicam, segundo classificação de Pearson, que há uma grande concentração das temperaturas médias mensais em torno de suas médias, nos dados referentes ao Posto do Horto Florestal.

Segundo os dados referentes à Estação Meteorológica do CEAPLA, apresentados na Tabela 8, o maior valor do desvio padrão, $1,47^{\circ}\text{C}$, das médias mensais ocorreu em outubro e o menor valor, $0,65^{\circ}\text{C}$, em dezembro. O maior coeficiente de variação, 7%, ocorreu no mês de outubro. Esses valores indicam, segundo classificação de Pearson, que há uma grande concentração das temperaturas médias mensais em torno de suas médias, nos dados referentes à Estação meteorológica do CEAPLA.

Analisando-se o gráfico da Figura 11, constata-se que os meses com menor média de temperatura foram maio, junho e julho, que tiveram média no período entre 19 e 20°C ; os três primeiros meses do ano e os três últimos foram, no período, os mais quentes, com médias de temperatura variando entre 24 e 25°C ; e os meses de abril, agosto e setembro apresentam médias $23,2$, $21,2$ e $22,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

As imagens orbitais escolhidas para o estudo da variação do NDVI têm período bianual e a primeira refere-se ao ano de 1985. Foi obtida então, em função dessa série temporal de imagens, a Tabela 10 que apresenta média mensal do ano da imagem e do ano anterior a ela. Os cinco primeiros biênios referem-se aos dados de temperatura do Posto do Horto e os demais da Estação do CEAPLA.

Tabela 10 - Média das temperaturas média mensais.

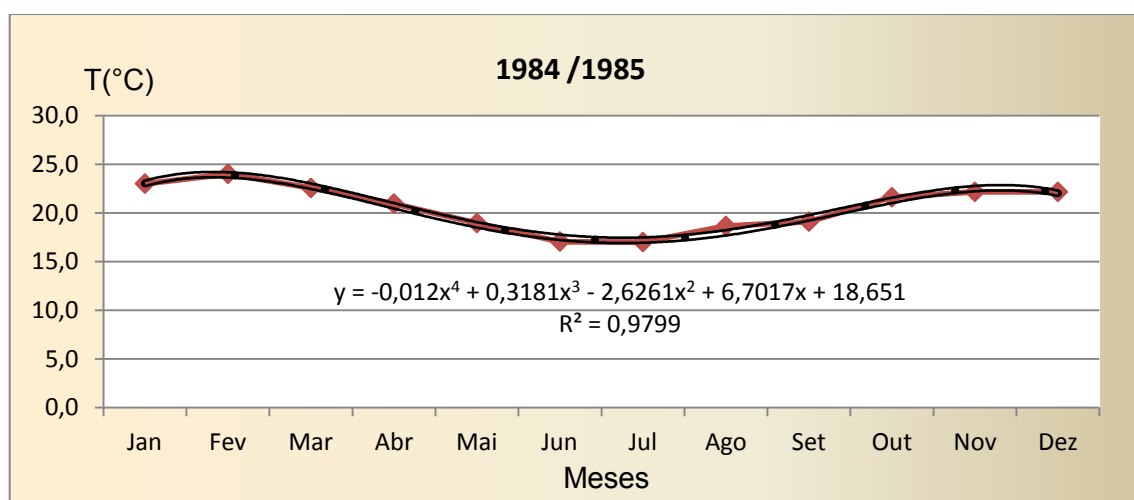
Temperatura Média Mensal/Bianual													
	Período	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Horto	1984-1985	23,0	24,0	22,6	21,0	19,0	17,1	17,0	18,7	19,1	21,6	22,2	22,2
	1986-1987	23,0	22,4	22,0	22,4	20,4	17,8	18,2	19,0	19,8	21,6	22,7	22,5
	1988-1989	23,6	23,2	23,2	22,1	19,4	17,3	16,4	18,7	20,7	20,8	21,9	22,1
	1990-1991	21,6	22,6	21,6	22,6	18,9	18,5	17,7	19,4	18,4	20,7	22,7	20,8
	1992-1993	21,5	20,4	23,6	26,0	18,9	17,1	17,3	17,1	19,2	20,6	21,6	21,2
CEAPLA	1994-1995	25,0	25,3	24,0	22,5	20,1	17,9	19,6	21,7	23,4	24,2	24,7	25,1
	1996-1997	25,0	25,4	24,3	22,7	19,5	18,0	18,3	20,6	22,4	23,9	24,6	25,5
	1998-1999	25,8	25,0	25,4	22,8	19,4	17,8	19,2	21,1	22,6	22,8	24,1	25,3
	2000-2001	25,5	25,4	25,1	23,8	20,1	19,5	18,5	21,0	22,4	25,3	25,1	24,7
	2002-2003	24,8	25,4	25,7	24,6	20,4	20,7	19,3	21,1	22,5	26,2	24,8	25,8
	2004-2005	24,5	24,9	24,5	23,8	20,3	19,3	18,6	21,4	23,6	23,9	24,5	24,7
	2006-2007	25,3	25,4	25,8	23,6	19,5	19,5	19,3	21,9	23,6	25,5	24,4	25,5
	2008-2009	24,4	25,3	25,0	23,0	20,7	18,5	19,4	21,3	22,4	24,4	25,8	24,9
2010-2011	24,8	25,3	24,1	22,4	18,8	17,0	19,1	20,4	22,2	22,8	23,3	24,4	

Fonte: Autor, dados do CEAPLA

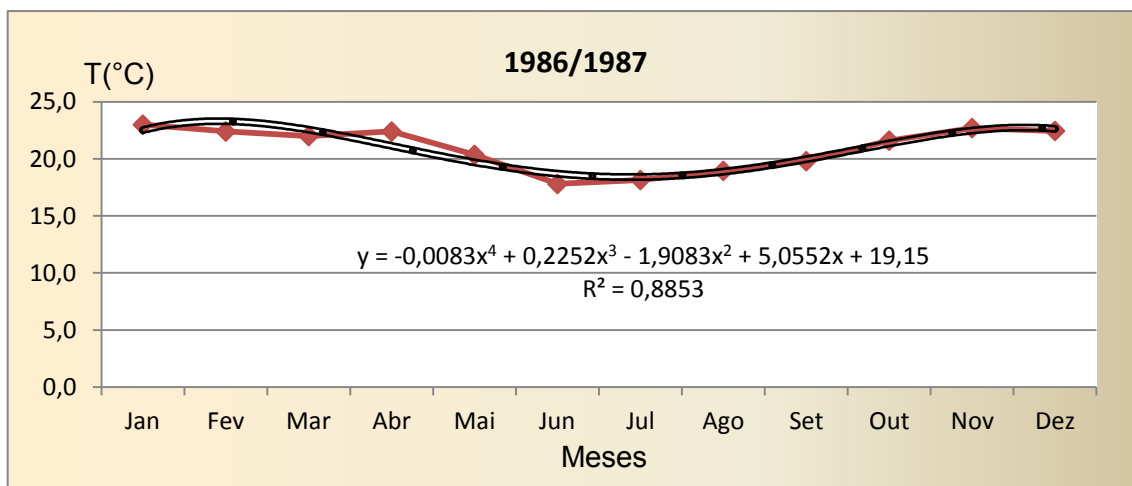
A partir da Tabela 10, foram gerados os gráficos para cada um dos biênios, apresentados na Figura 12, juntamente com as suas curvas de tendência, polinômios do quarto grau.

Figura 12 - Média das temperaturas médias mensais.

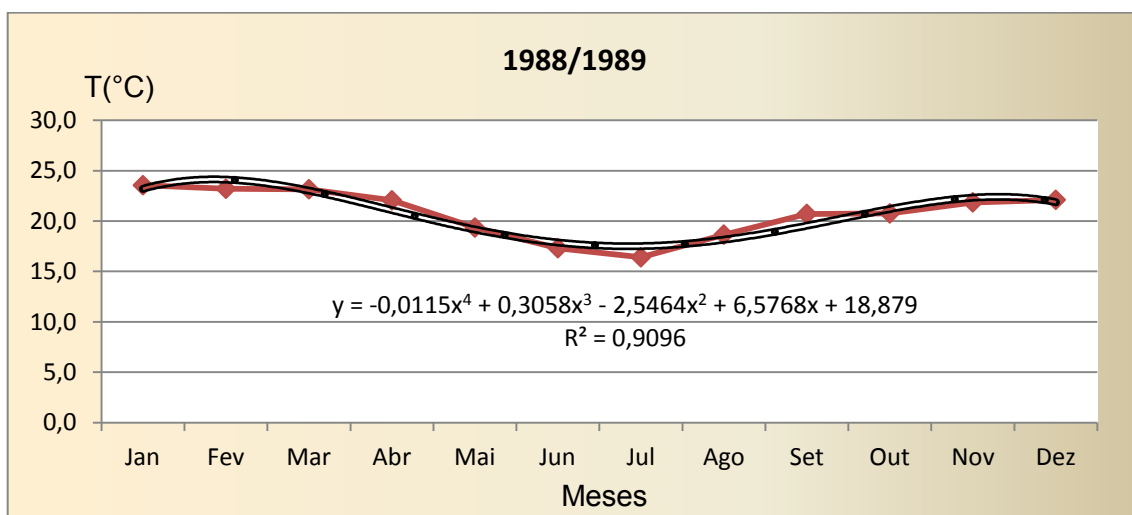
(12A)



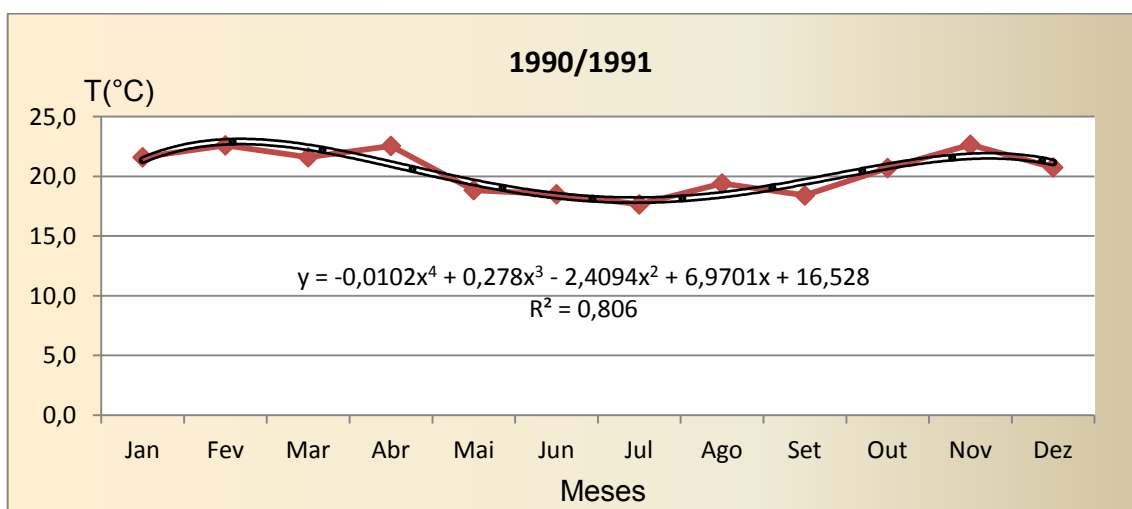
(12B)



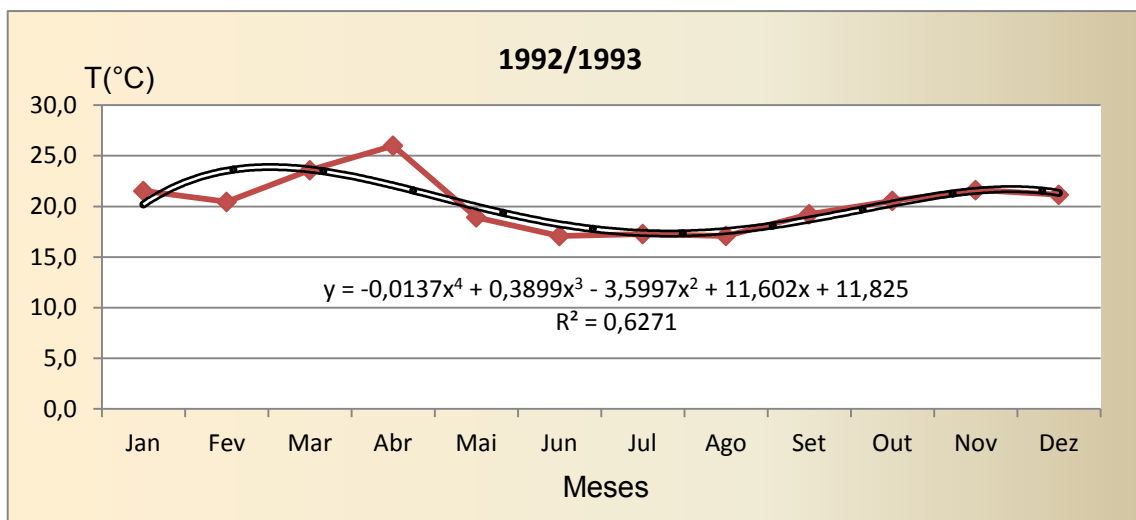
(12C)



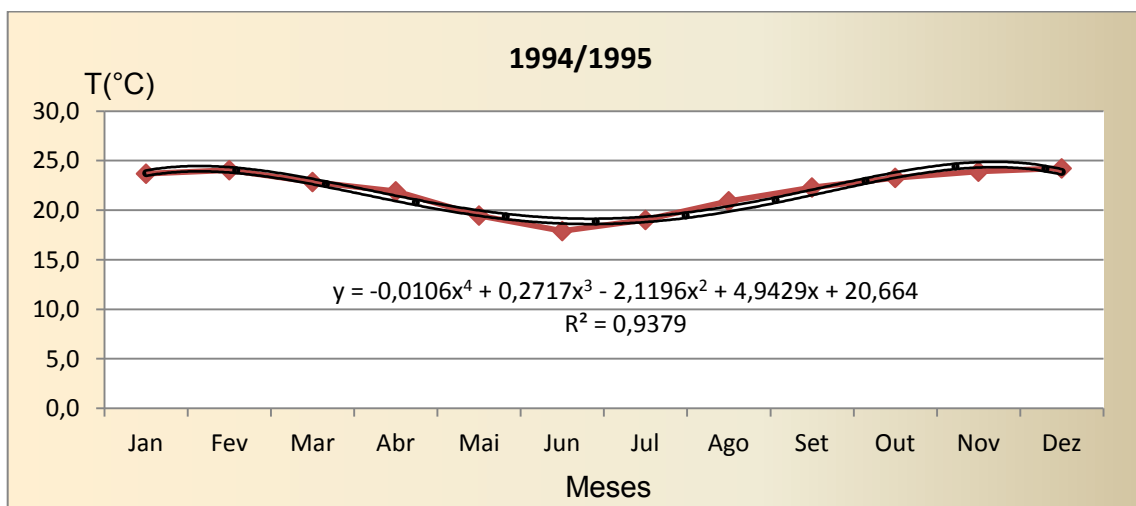
(12D)



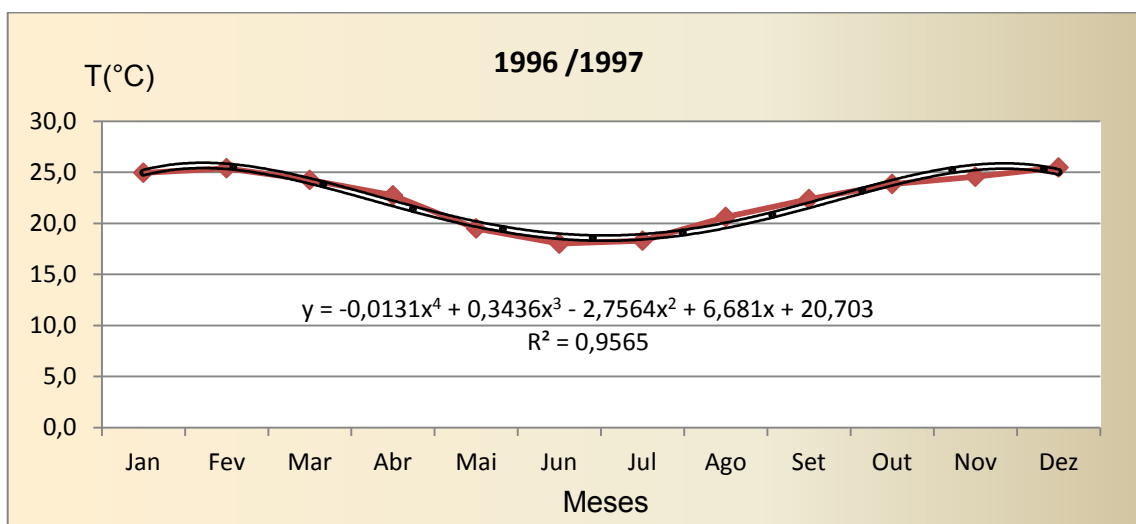
(12E)



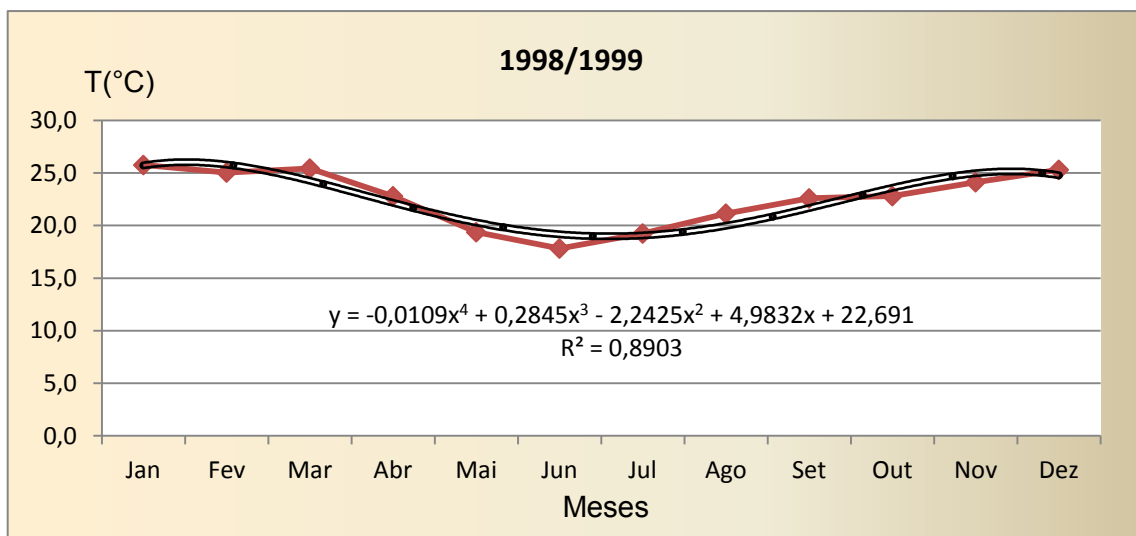
(12F)



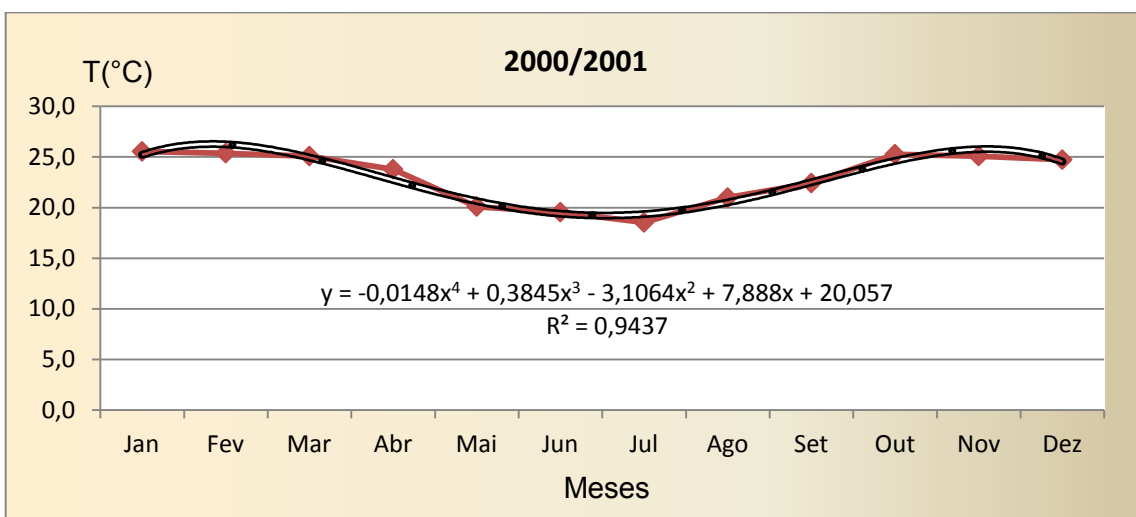
(12G)



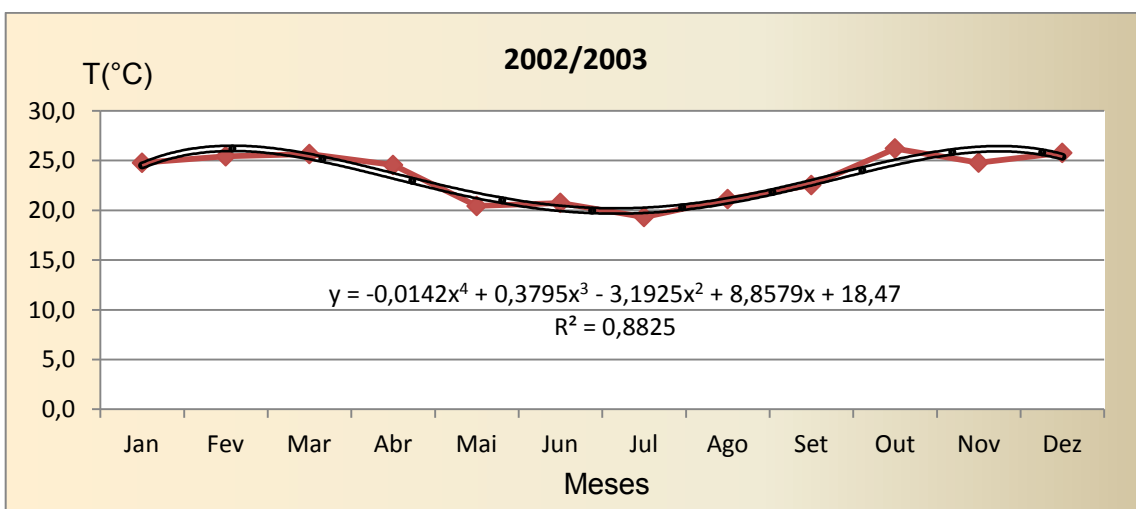
(12H)



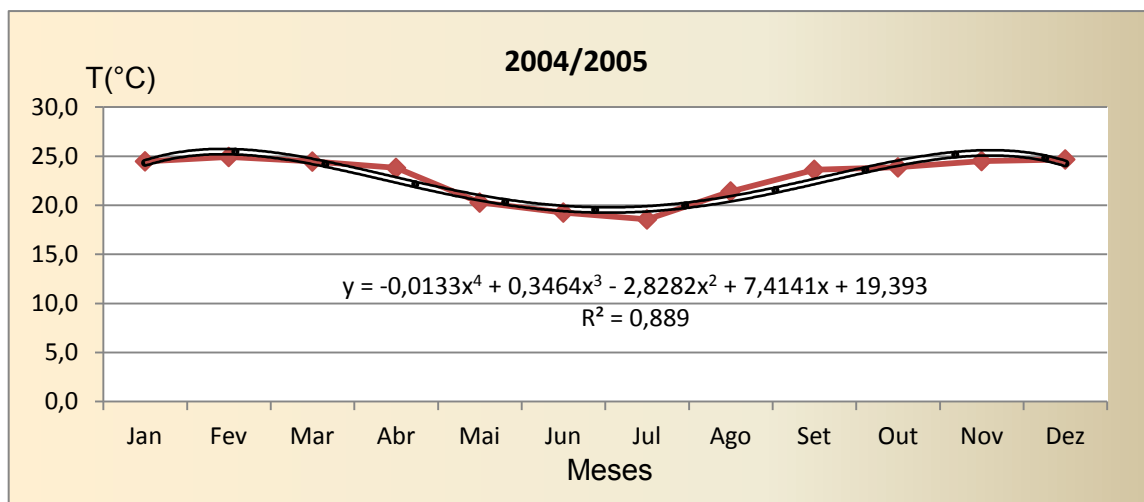
(12I)



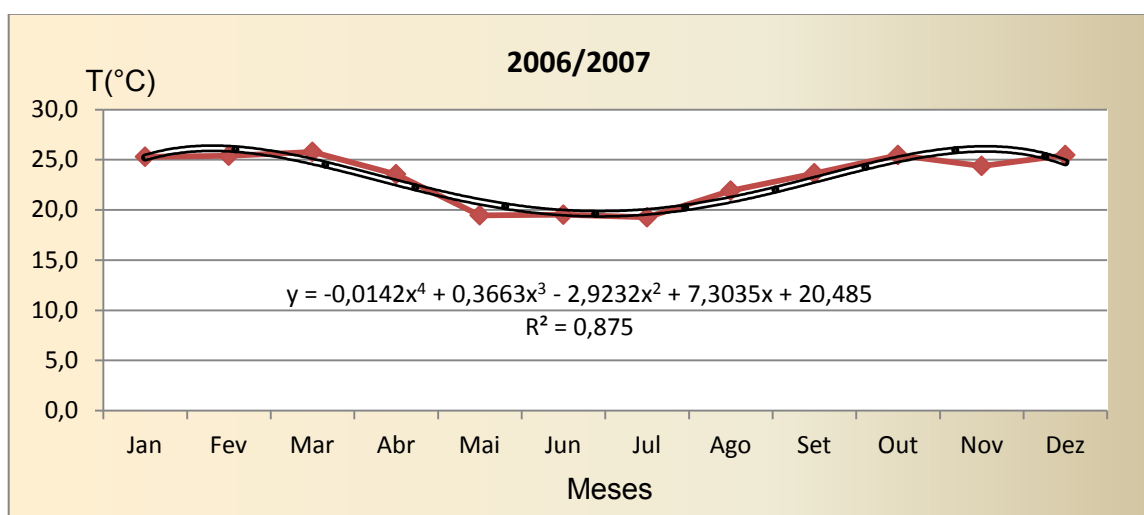
(12J)



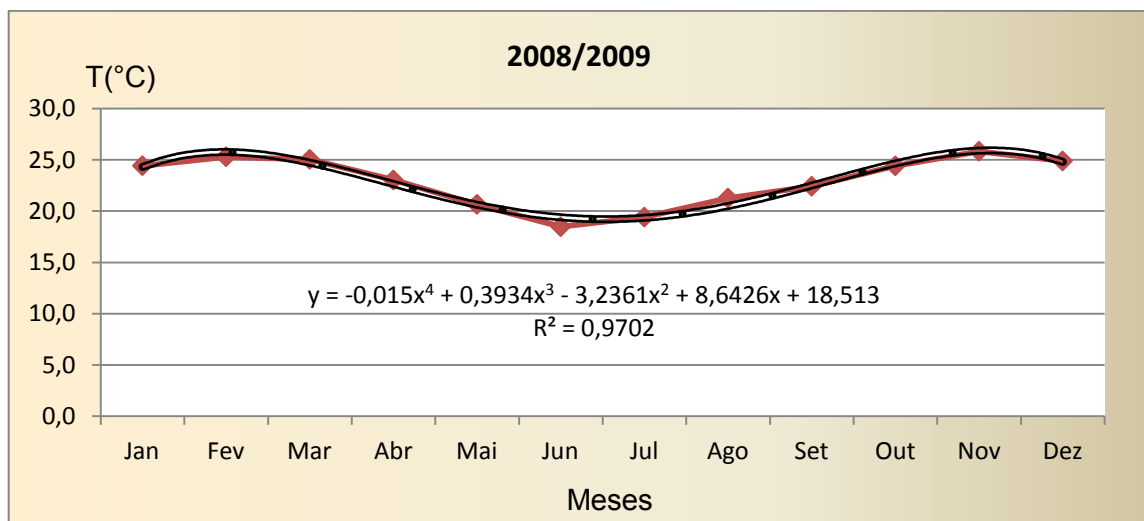
(12K)

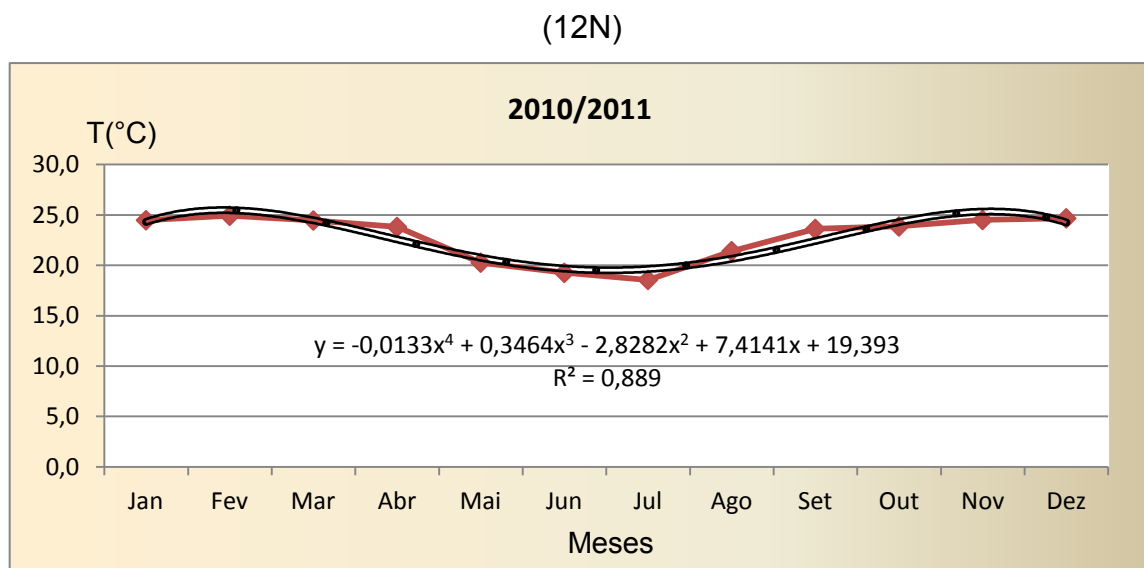


(12L)



(12M)





Fonte: Autor, dados do CEAPLA

Foram testadas para cada biênio curvas de tendência linear e polinomial com variação de grau de 2 a 6. Acima do grau 4, somente o biênio 1992-1993 apresentou variação do coeficiente de determinação 0,22. Nos demais biênios, o valor de R^2 , apresentados na tabela 21, apresentou variação inferior a 0,08; assim, foi escolhida como curva de tendência os polinômios de quarto grau.

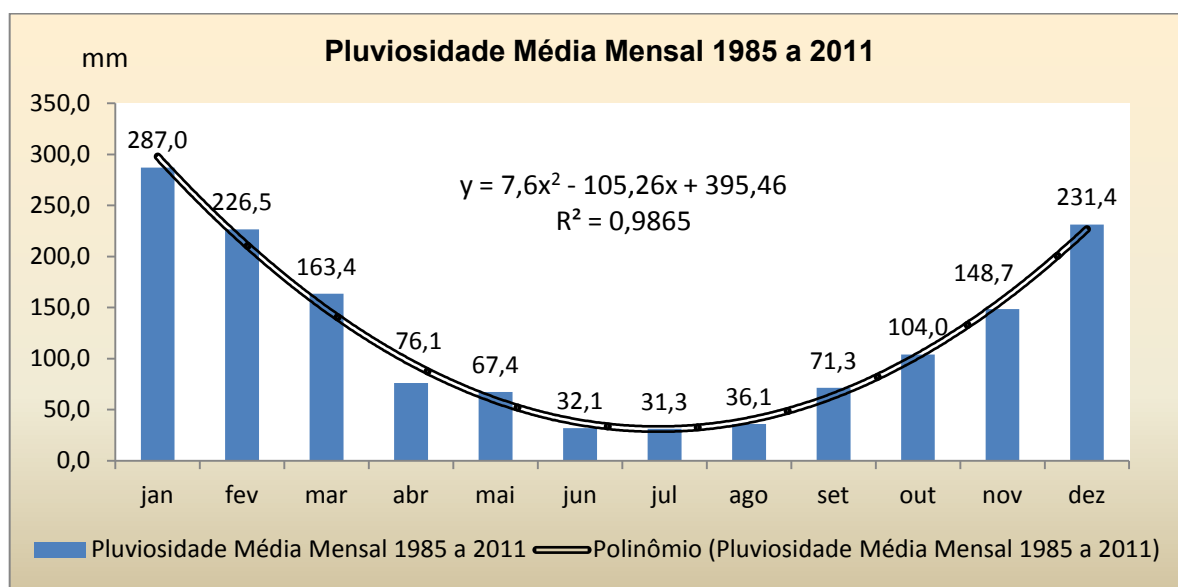
Pode-se observar que todos os gráficos da Figura 12 são similares, com valor mínimo nos meses de maio, junho ou julho, e não ocorreu grande variação na média mensal, para cada mês, da temperatura. Somente o biênio 1992/93 teve o valor do coeficiente de determinação abaixo de 0,7; e somente o biênio 1990/91, inferior a 0,82. Em todos os demais biênios, o valor de R^2 foi superior a 0,88, o que indica ótimo ajuste das curvas em relação às médias mensais bianuais da temperatura.

5.1.2 Pluviosidade

De acordo com a Tabela 20, em anexo na página 123, os valores da pluviosidade mensal no período de 1984 a 2011 apresentam alta dispersão em relação à sua média, apenas o coeficiente de variação referente a dezembro ficou em 28,7% abaixo de 30%, valor que estatisticamente indica dispersão moderada. Todos os outros meses apresentaram valores de coeficiente de variação acima de 38%.

Os três primeiros e os três últimos meses dos anos entre 1985 e 2011 apresentaram-se, pelo gráfico da Figura 35, como os mais chuvosos com média de pluviosidade acima de 100 mm; os meses de junho, julho e agosto apresentaram média de pluviosidade entre 30 e 40 mm, compondo o período seco do ano; e os meses de abril, maio e setembro tiveram as média de pluviosidade 76,4, 67,4 e 71,3, respectivamente.

Figura 13 - Média mensal da pluviosidade entre 1985 e 2011



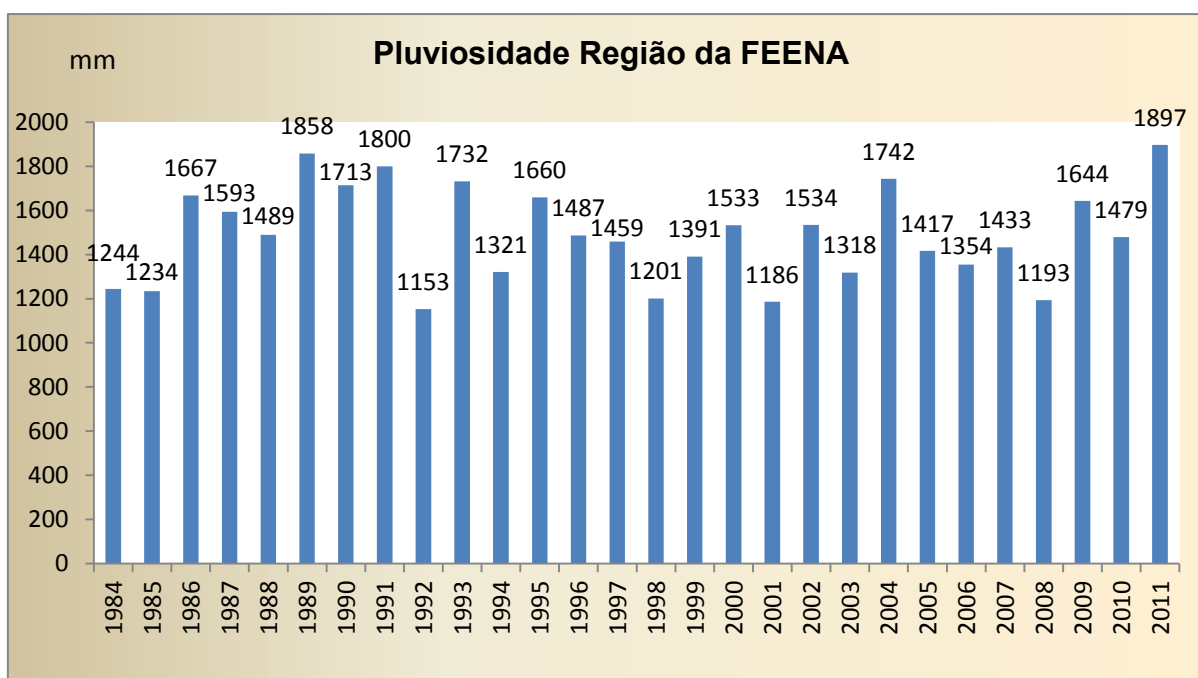
Fonte: Autor, com dados do CEAPLA

O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9865$ indica que a curva de tendência tem alto ajuste em relação aos dados da série.

No contexto anual, a média da pluviosidade ficou em 1475 mm e o coeficiente de variação 13,7%, o que indica baixa dispersão em torno da média anual. O ano de 1992 foi o menos chuvoso com pluviosidade de 1153 mm, e 2011 foi o ano mais chuvoso do período com 1897 mm, o que definiu a amplitude total de 744 mm.

Os valores da pluviosidade anual na região onde se localiza a FEENA, no período de 1984 a 2011, podem ser observados no gráfico da Figura 14.

Figura 14 - Pluviosidade anual na região da FEENA



Fonte: Autor, com dados do CEAPLA.

Dos anos representados no gráfico da figura 14, 12 apresentam valor anual da pluviosidade inferior à média, e 16, acima.

Para analisar a correlação entre a pluviosidade e o NDVI, na FEENA, foram calculadas as médias de pluviosidade para cada biênio referente às imagens orbitais, apresentadas na Tabela 11. Foram usadas as médias do ano das imagens e do ano anterior.

Tabela 11 - Média do valor da pluviosidade anual em cada biênio.

Média de precipitação pluviométrica	
Biênio	Pluviosidade (mm)
1984 - 1985	1239,2
1986 - 1987	1630,3
1988 - 1989	1673,7
1990 - 1991	1756,7
1992 - 1993	1442,5
1994 - 1995	1490,5
1996 - 1997	1472,6
1998 - 1999	1295,9
2000 - 2001	1359,6
2002 - 2003	1426,2
2004 - 2005	1579,5
2006 - 2007	1393,8
2008 - 2009	1418,3
2010 - 2011	1687,7
Média	1475,4

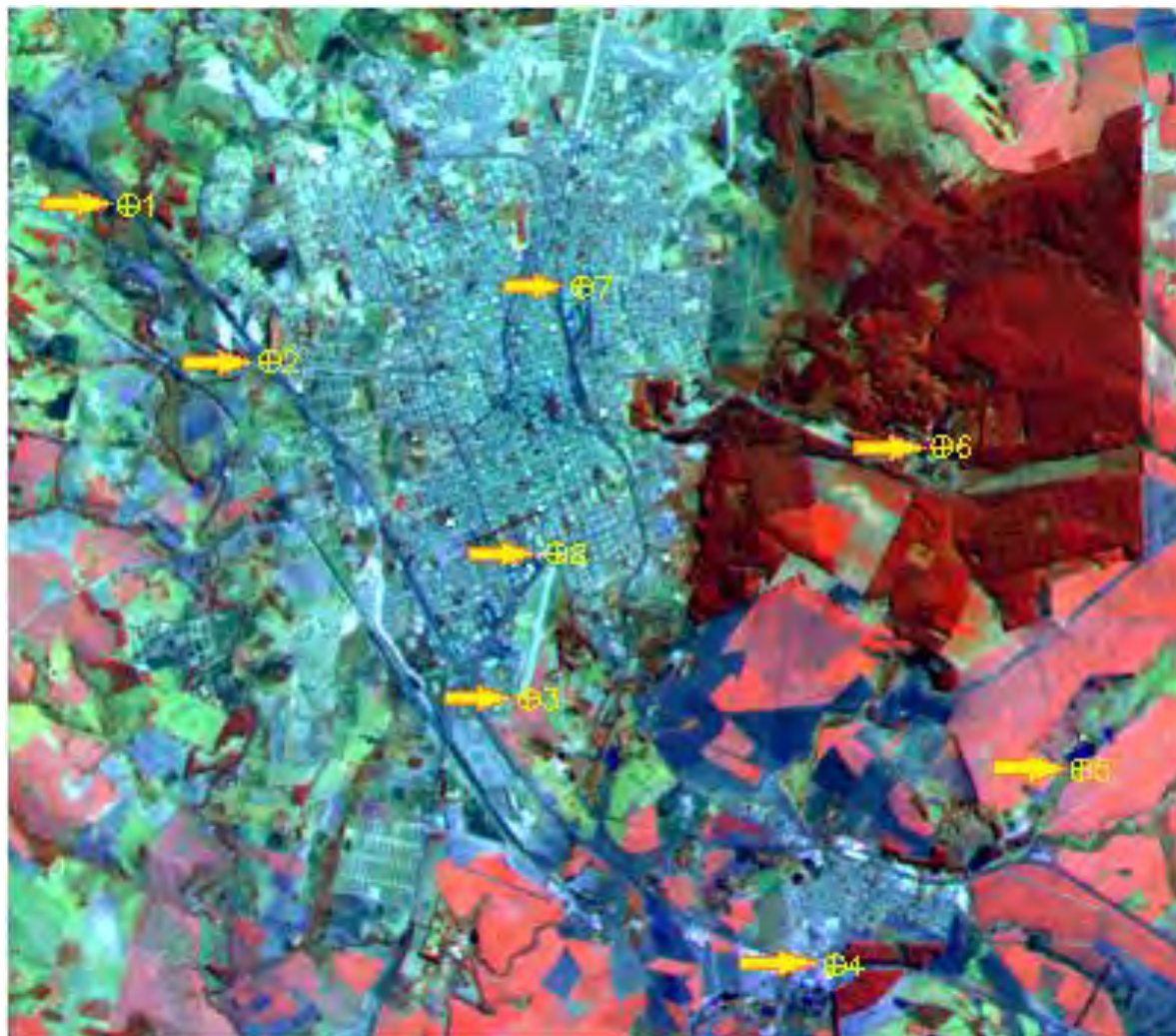
Fonte: Autor, planilhas obtidas com dados do CEAPLA.

O balanço hídrico mostrou que, na região onde se encontra a FEENA, a evapotranspiração real de 1.100 mm apresenta déficit de 8% das necessidades hídricas da planta tomada como referência, grama batatais (*Paspalum notatum*). Os déficits concentram-se no período de abril a agosto, mais intensamente em junho (CEAPLA, 2010).

5.2 As imagens geradas por NDVI

A localização dos pontos de controle utilizados no georreferenciamento esta representada na Figura 15.

Figura 15 - Localização dos pontos de controle nas imagens.



Fonte: Autor, imagem falsa cor RGB453 de TM Landsat 1985.

Desses pontos de controle da Figura 15, em cada uma das imagens, foram eliminados três pontos de forma todos os Erros Quadráticos Médios ficaram abaixo de 0,356, com média 0,157, conforme esta apresentada na Tabela 12.

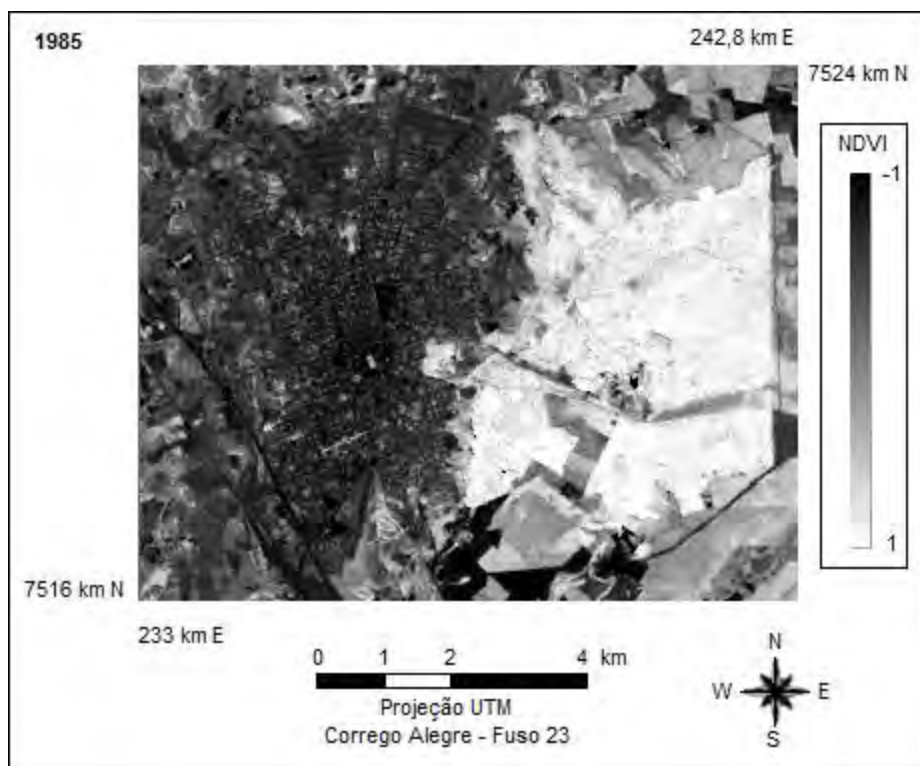
Tabela 12 - Erro Quadrático Médio do Georreferenciamento

Ano	RMS
1985	0,180980
1987	0,205402
1989	0,077796
1991	0,344283
1993	0,130166
1995	0,176158
1997	0,355270
1999	0,111271
2001	0,141144
2003	0,061553
2005	0,128138
2007	0,066806
2009	0,089945
2011	0,129130
Média	0,157003

Fonte: Autor, georreferenciamento das imagens no programa ENVI.

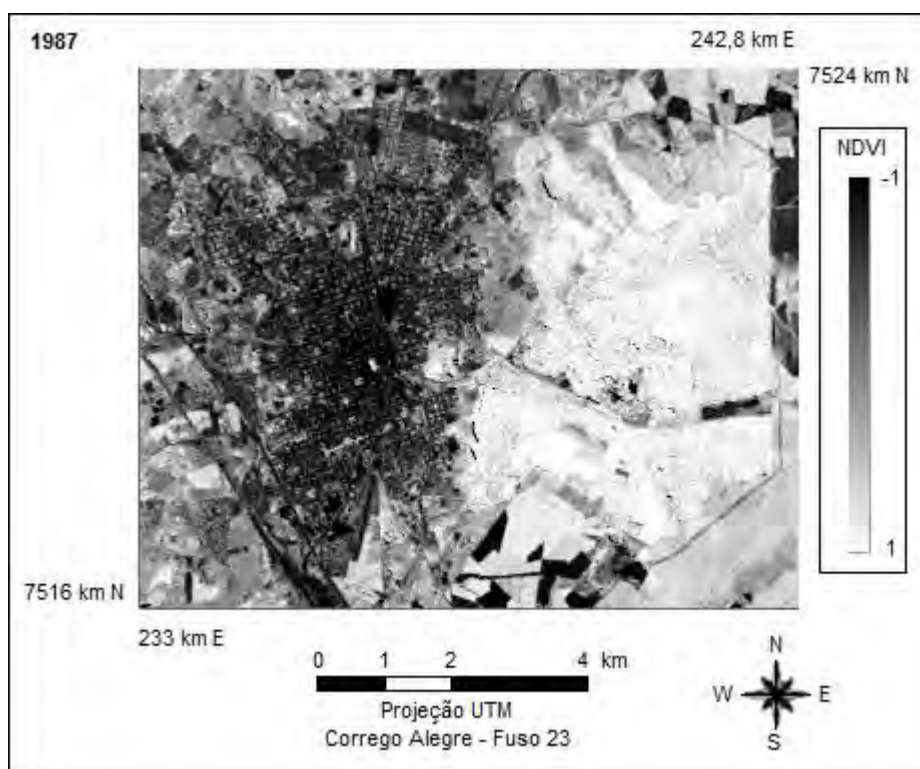
Após o georreferenciamento e a aplicação da correção atmosférica, foi obtida a série temporal das cartas imagem do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, apresentadas nas Figuras 16 a 29. Nas figuras é possível distinguir claramente a área urbana com níveis de cinza mais escuro e valores de NDVI próximos ao valor -1 , indicando baixa densidade ou ausência de vegetação, e a FEENA, com valores de NDVI mais próximos ao valor 1 , representados por níveis de cinza mais claros, o que indica alta densidade e atividade fotossintética da vegetação.

Figura 16 - Carta imagem do NDVI de 1985 da região da FEENA/Rio Claro



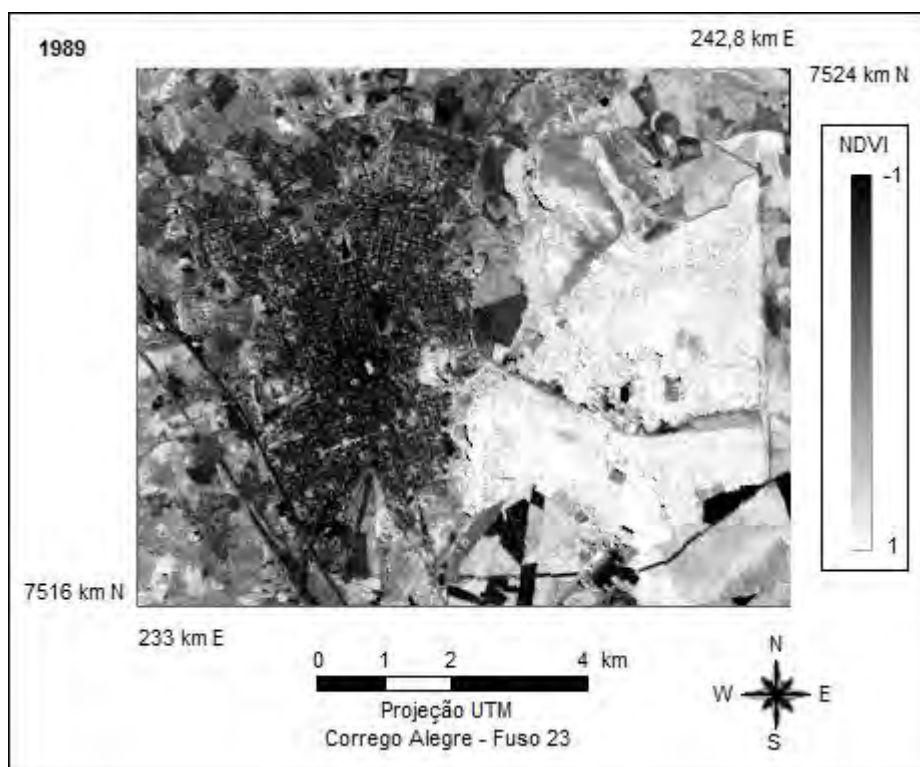
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17 - Carta imagem do NDVI de 1987 da região da FEENA/Rio Claro



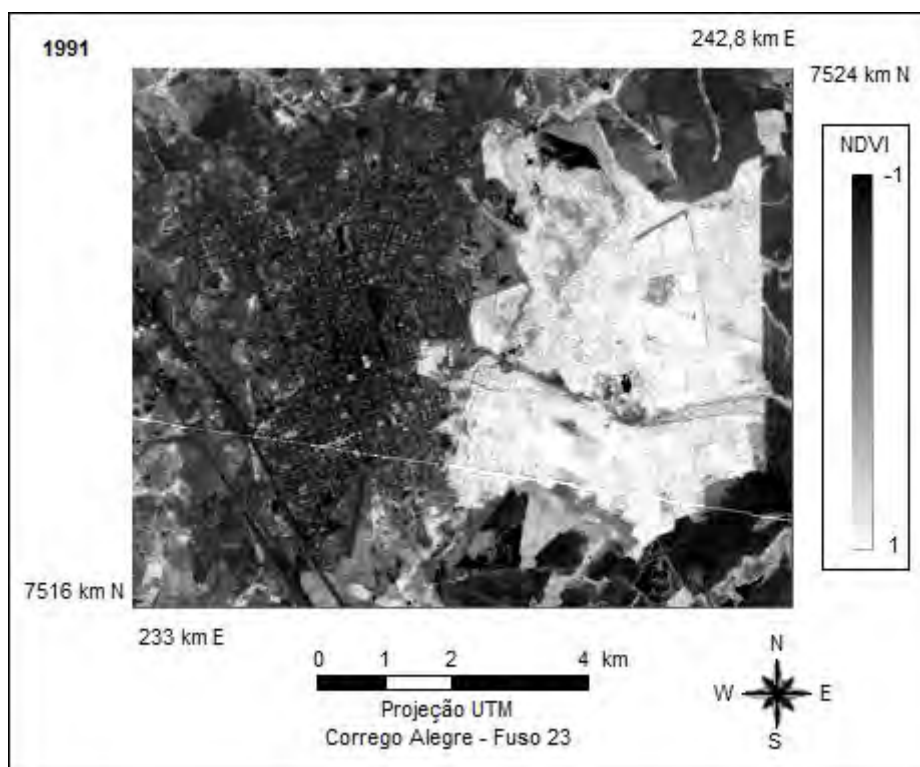
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 18 - Carta imagem do NDVI de 1989 da região da FEENA/Rio Claro



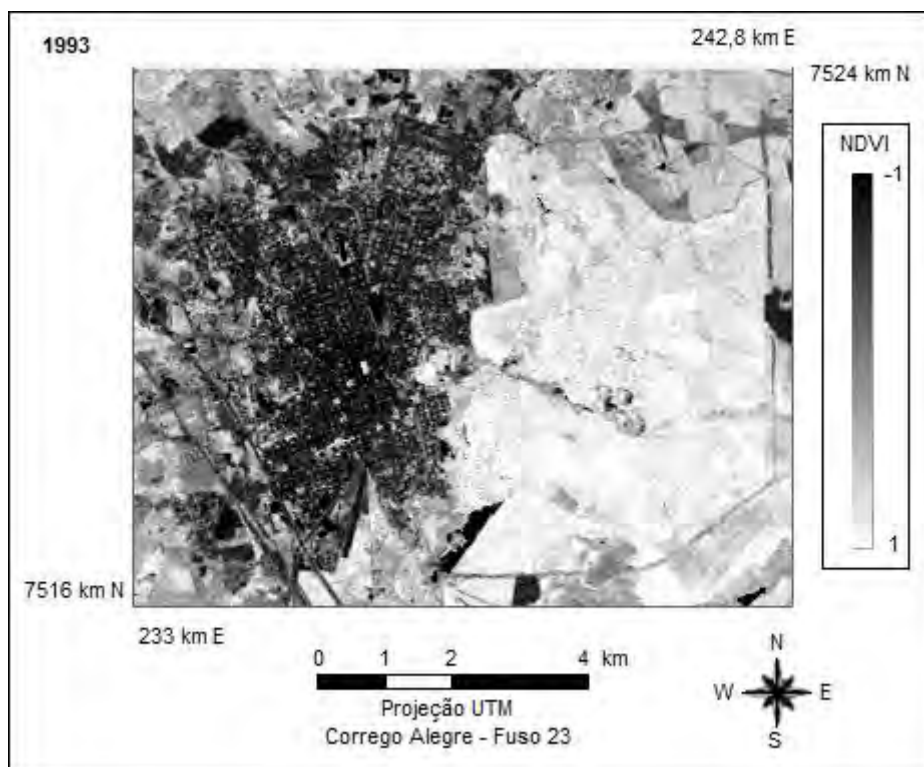
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 - Carta imagem do NDVI de 1991 da região da FEENA/Rio Claro



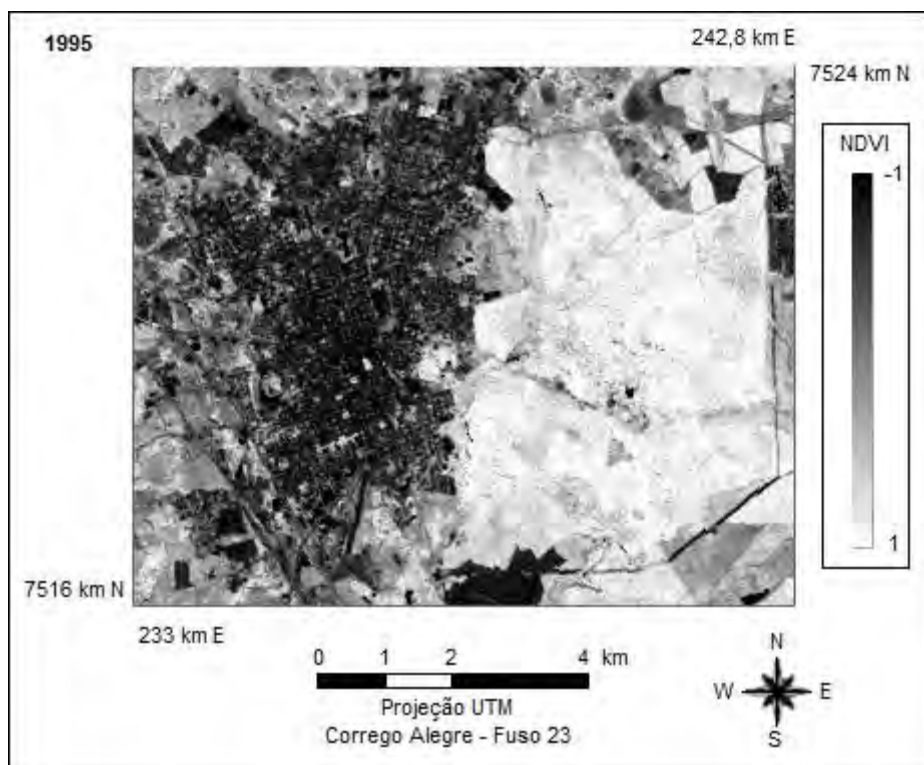
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 - Carta imagem do NDVI de 1993 da região da FEENA/Rio Claro



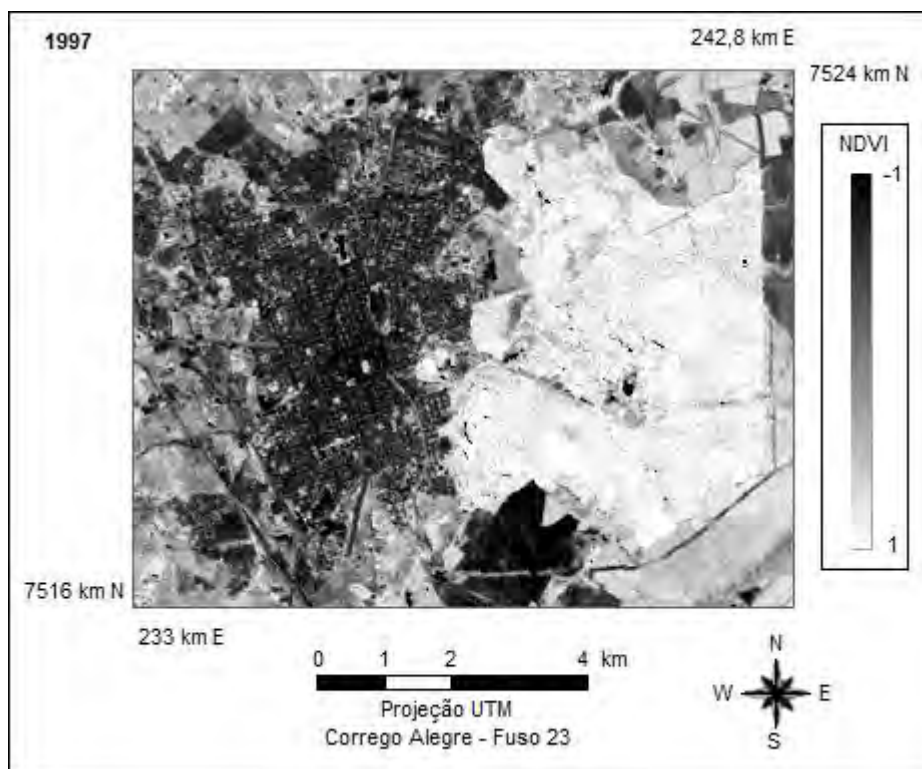
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 21 - Carta imagem do NDVI de 1995 da região da FEENA/Rio Claro



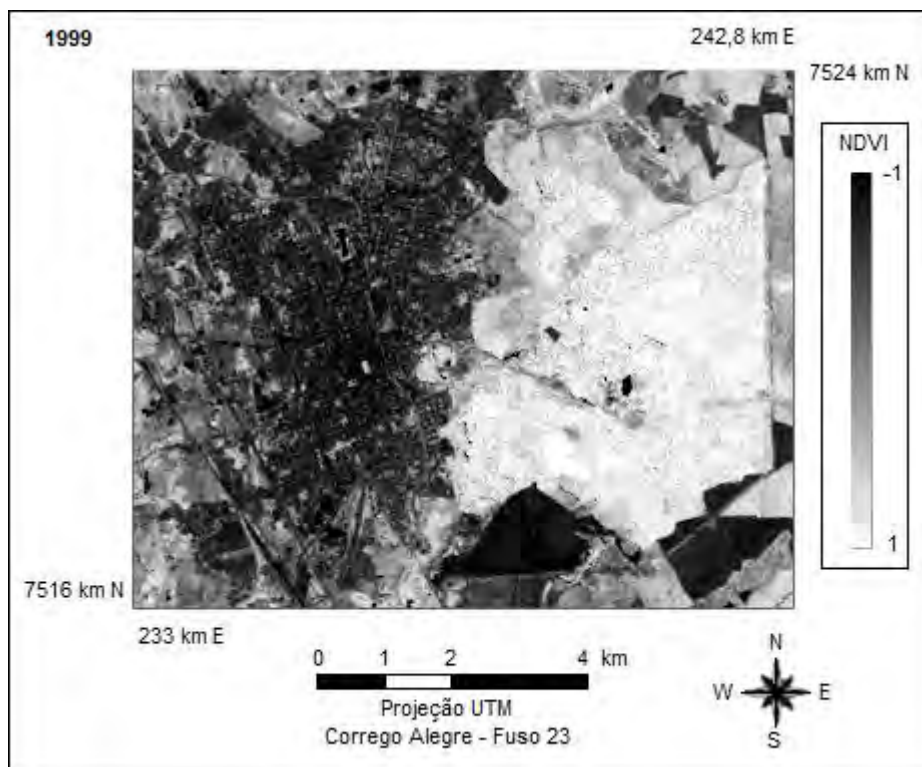
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 - Carta imagem do NDVI de 1997 da região da FEENA/Rio Claro



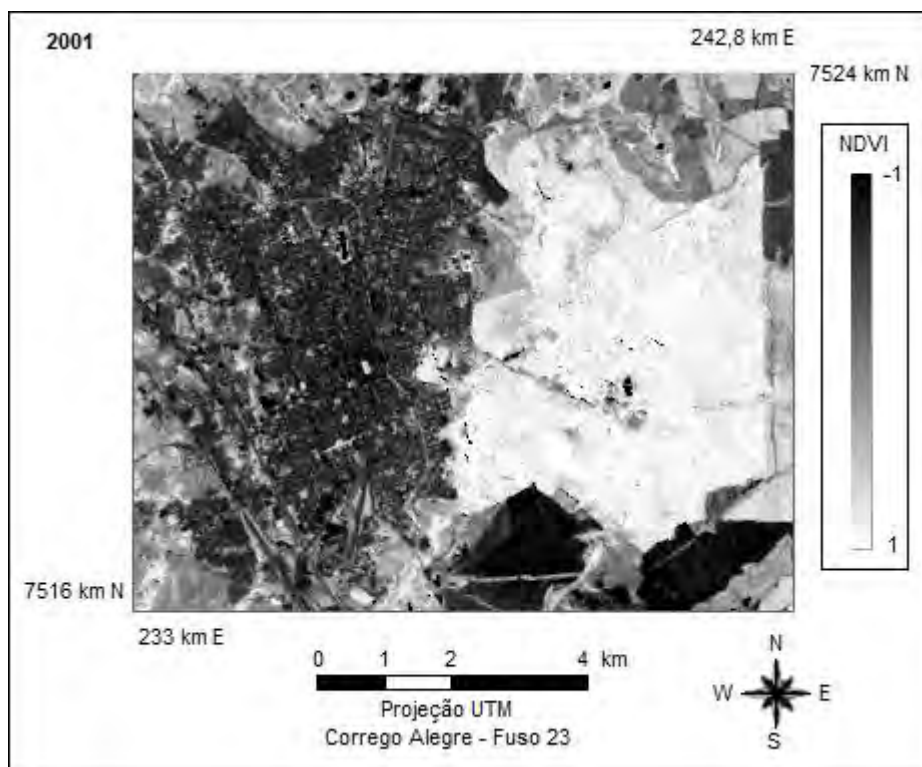
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 - Carta imagem do NDVI de 1999 da região da FEENA/Rio Claro



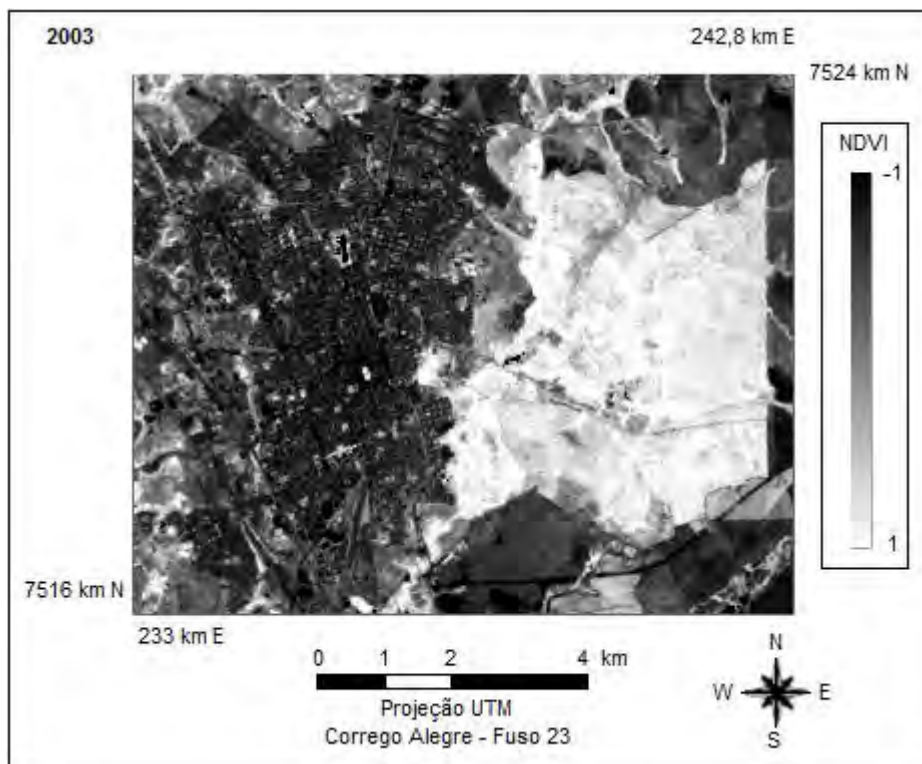
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 24 - Carta imagem do NDVI de 2001 da região da FEENA/Rio Claro



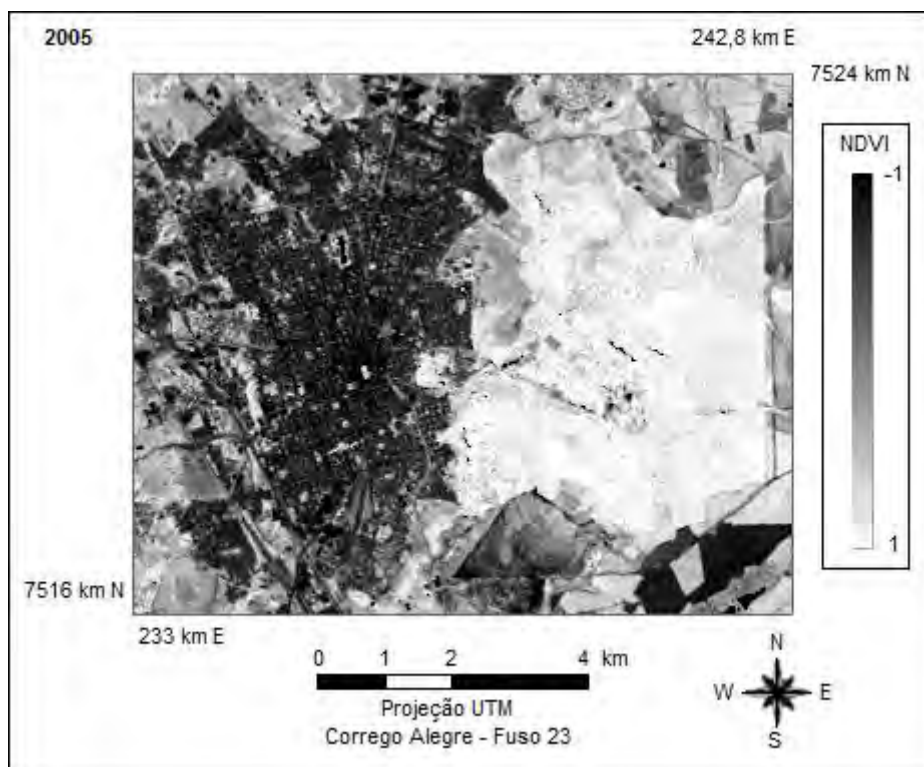
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 25 - Carta imagem do NDVI de 2003 da região da FEENA/Rio Claro



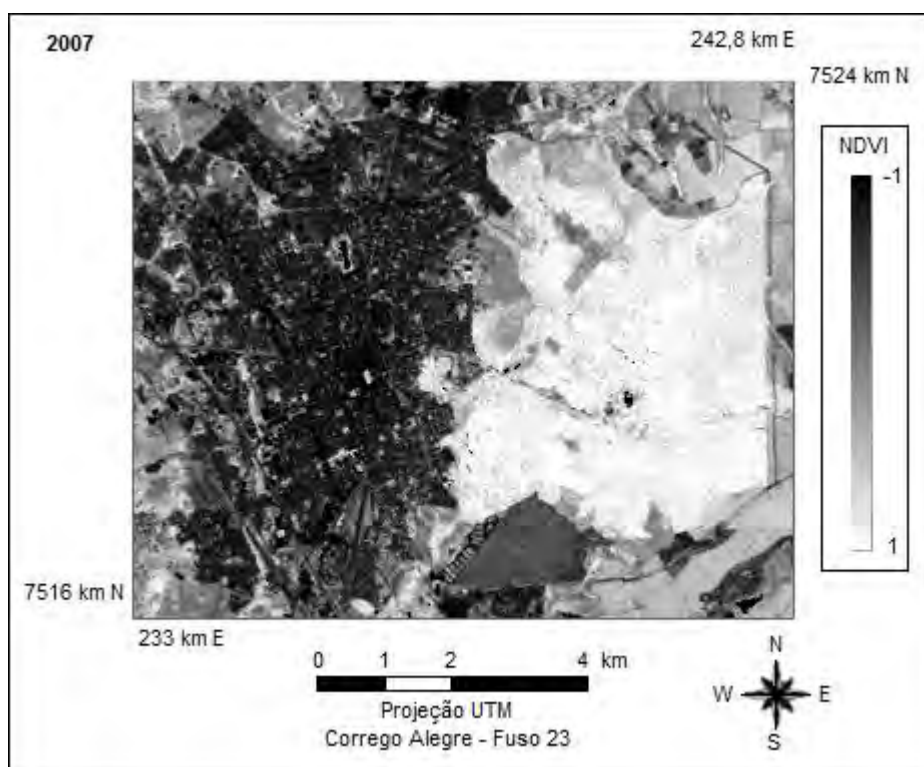
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 26 - Carta imagem do NDVI de 2005 da região da FEENA/Rio Claro



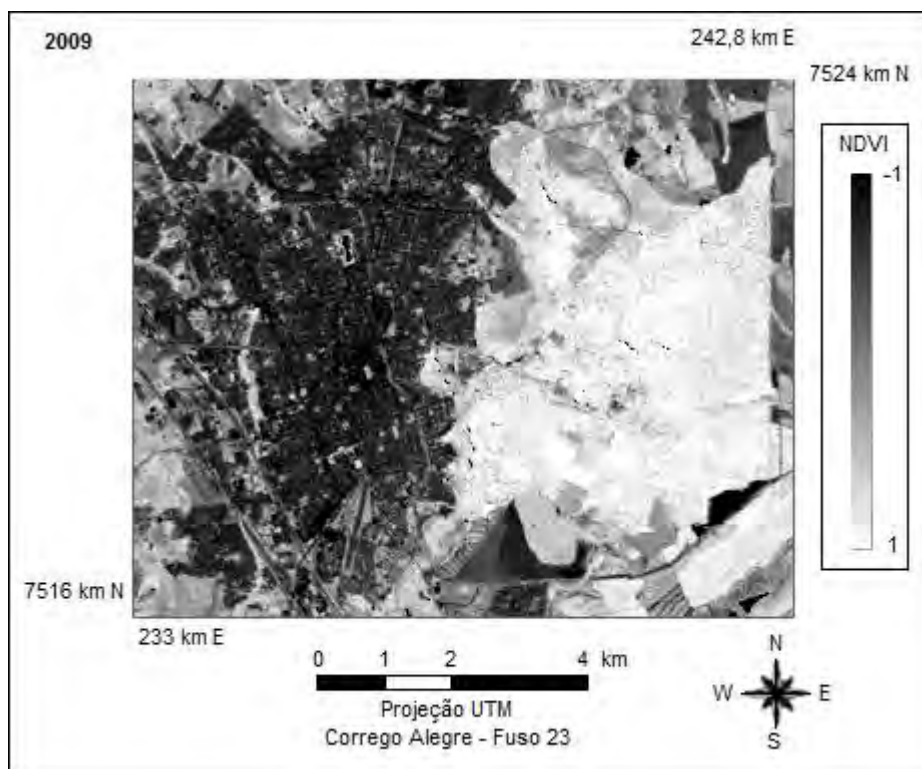
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 27 - Carta imagem do NDVI de 2007 da região da FEENA/Rio Claro



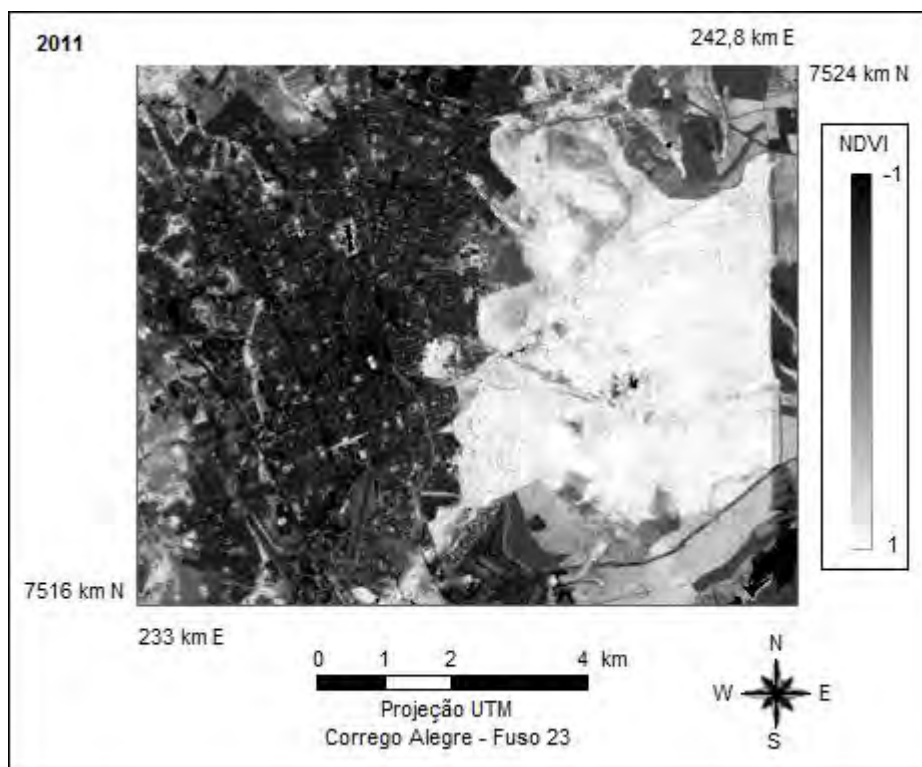
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 - Carta imagem do NDVI de 2009 da região da FEENA/Rio Claro



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 - Carta imagem do NDVI de 2011 da região da FEENA/Rio Claro



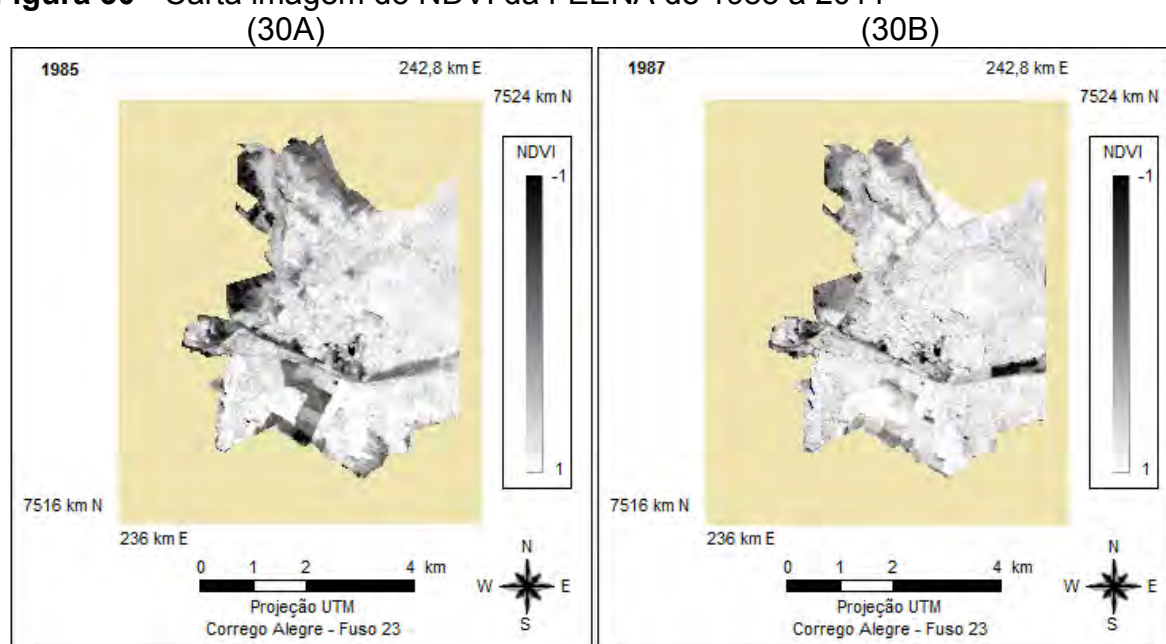
Fonte: Elaborada pelo autor

Nessa série temporal de cartas imagens do NDVI da FEENA, pelo nível de cinza mais escuro, é possível identificar talhões onde ocorreu corte de todas as árvores e, nos mapas subsequentes, observar que esses mesmos talhões apresentam nível de cinza que se tornam mais claros no decorrer do tempo, o que indica surgimento e crescimento de árvores.

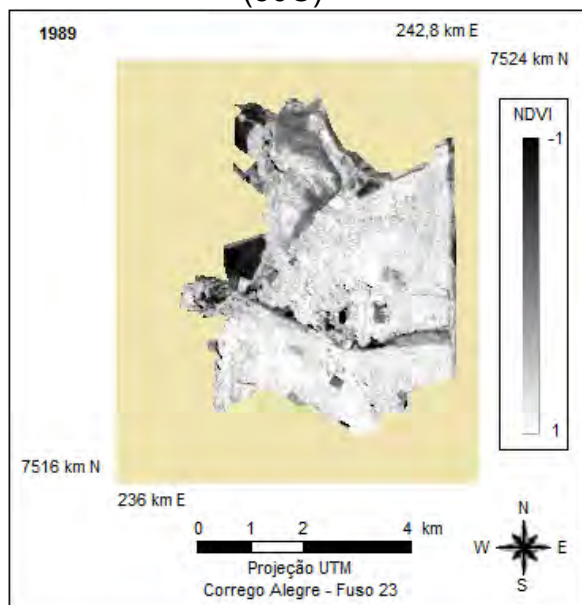
5.3 Análise da cobertura vegetal da FEENA por meio do NDVI

Para cada uma das cartas imagens do NDVI, foi definida, no programa ENVI, a área de interesse, por meio do mapa georreferenciado dos talhões. A Figura 30 até apresenta a série de mapas do NDVI da FEENA.

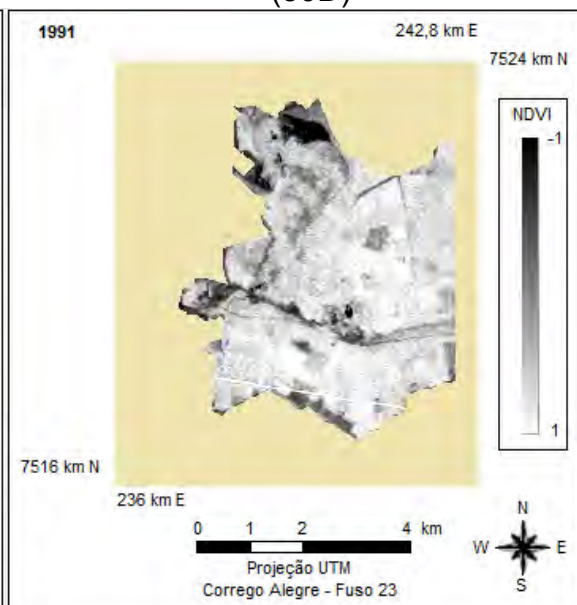
Figura 30 - Carta imagem do NDVI da FEENA de 1985 a 2011



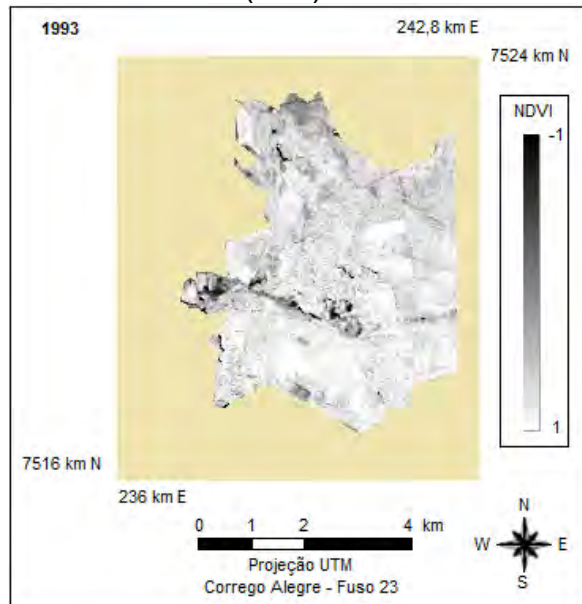
(30C)



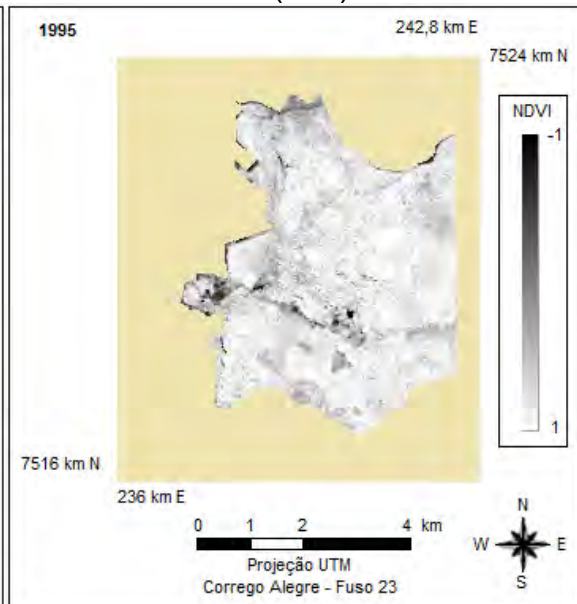
(30D)



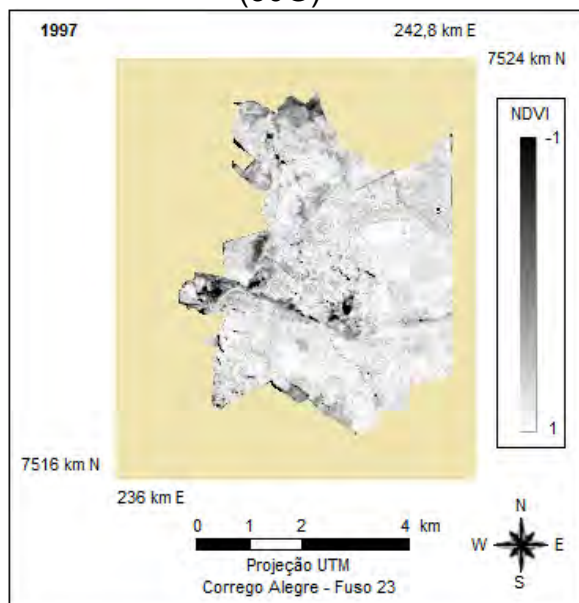
(30E)



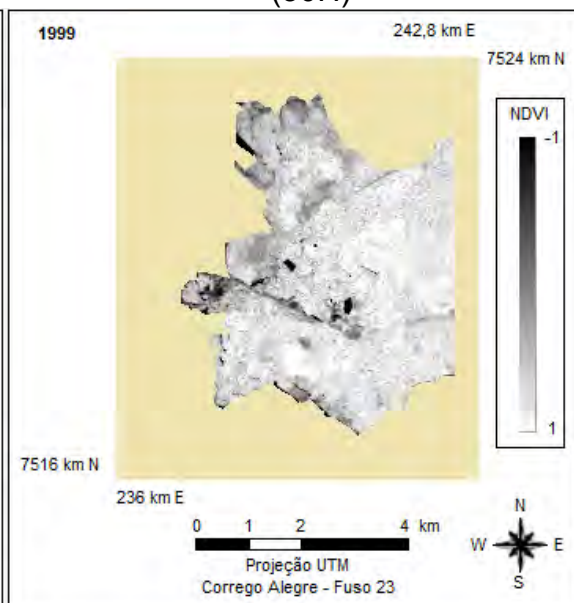
(30F)



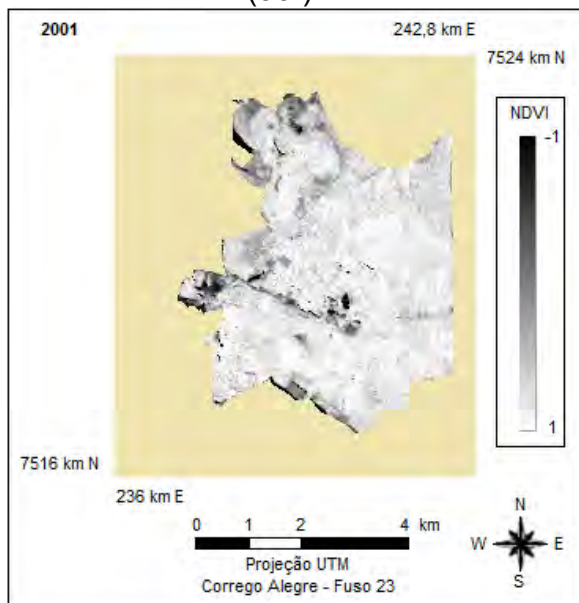
(30G)



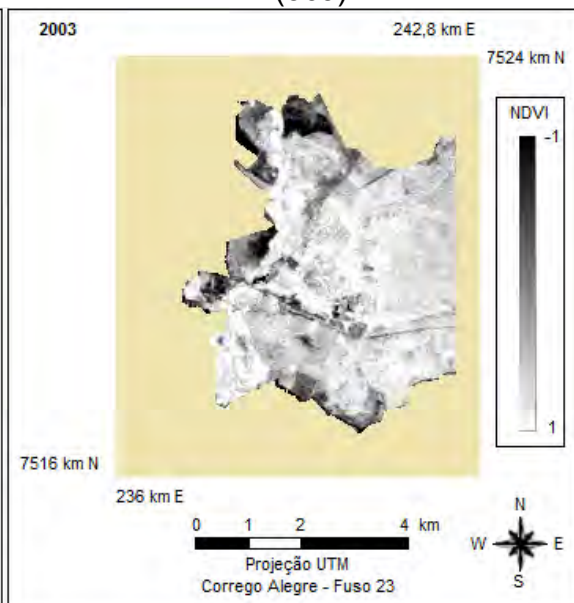
(30H)

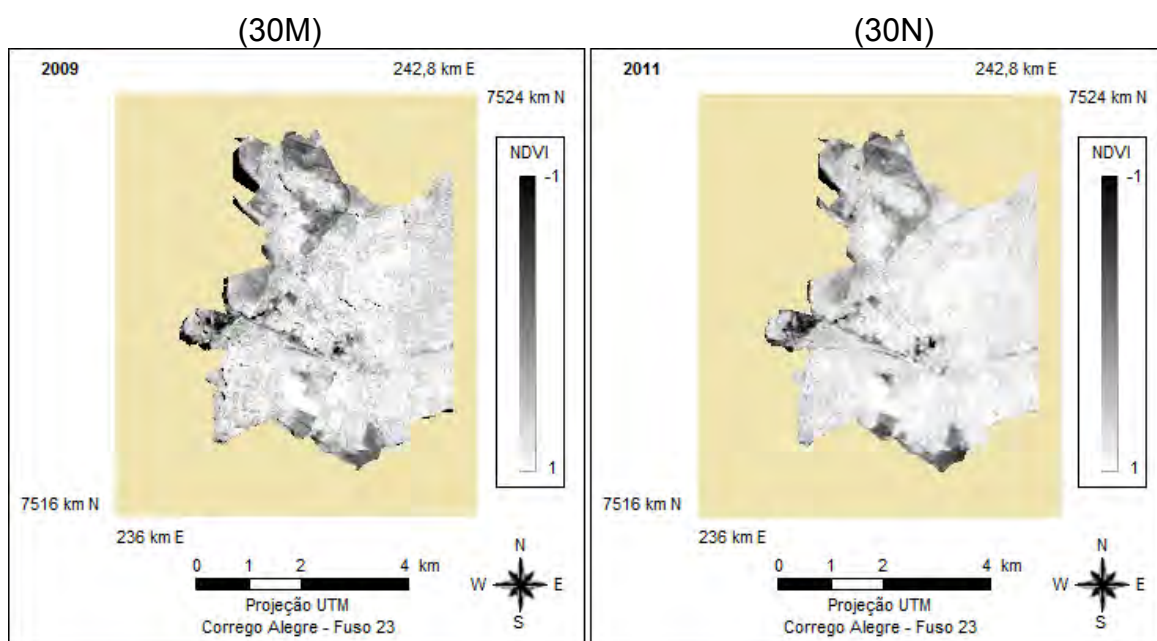
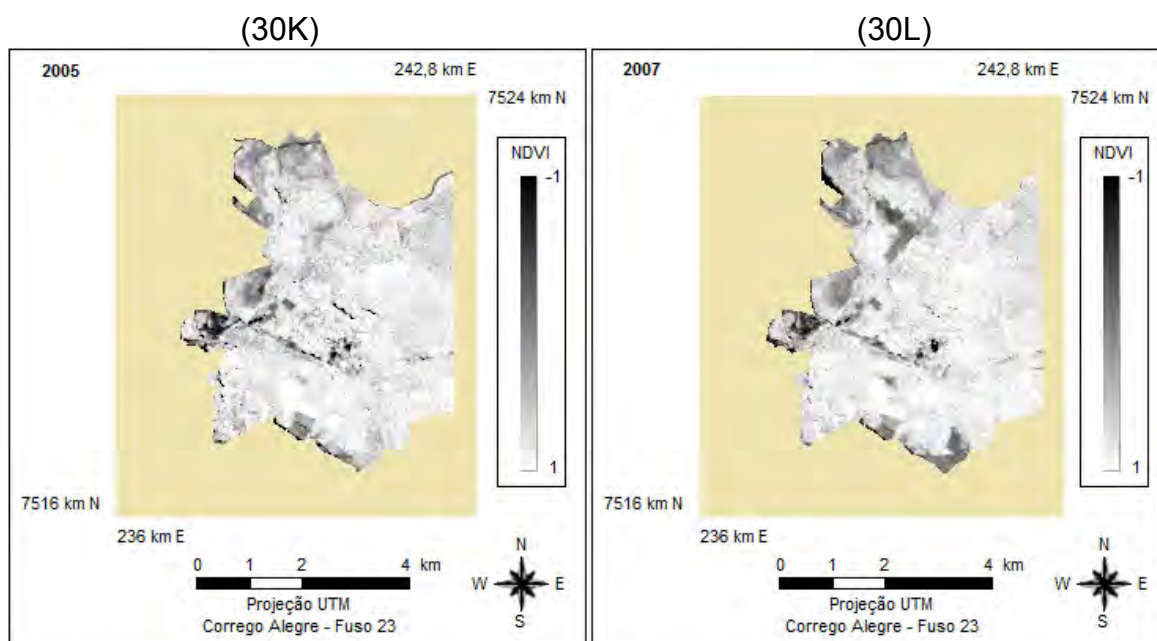


(30I)



(30J)





Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores da média e do desvio padrão foram obtidos, por meio do menu ferramentas básicas do programa ENVI, para cada uma das cartas imagens do NDVI e a partir dessas duas medidas, foram determinados os coeficientes de variação apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados estatísticos do NDVI

Ano	Média	Desvio Padrão	CV (%)
1985	0,65	0,186	29
1987	0,67	0,163	24
1989	0,65	0,206	32
1991	0,65	0,187	29
1993	0,69	0,131	19
1995	0,70	0,119	17
1997	0,68	0,148	22
1999	0,66	0,144	22
2001	0,70	0,169	24
2003	0,65	0,215	33
2005	0,67	0,140	21
2007	0,70	0,151	21
2009	0,66	0,165	25
2011	0,69	0,156	23

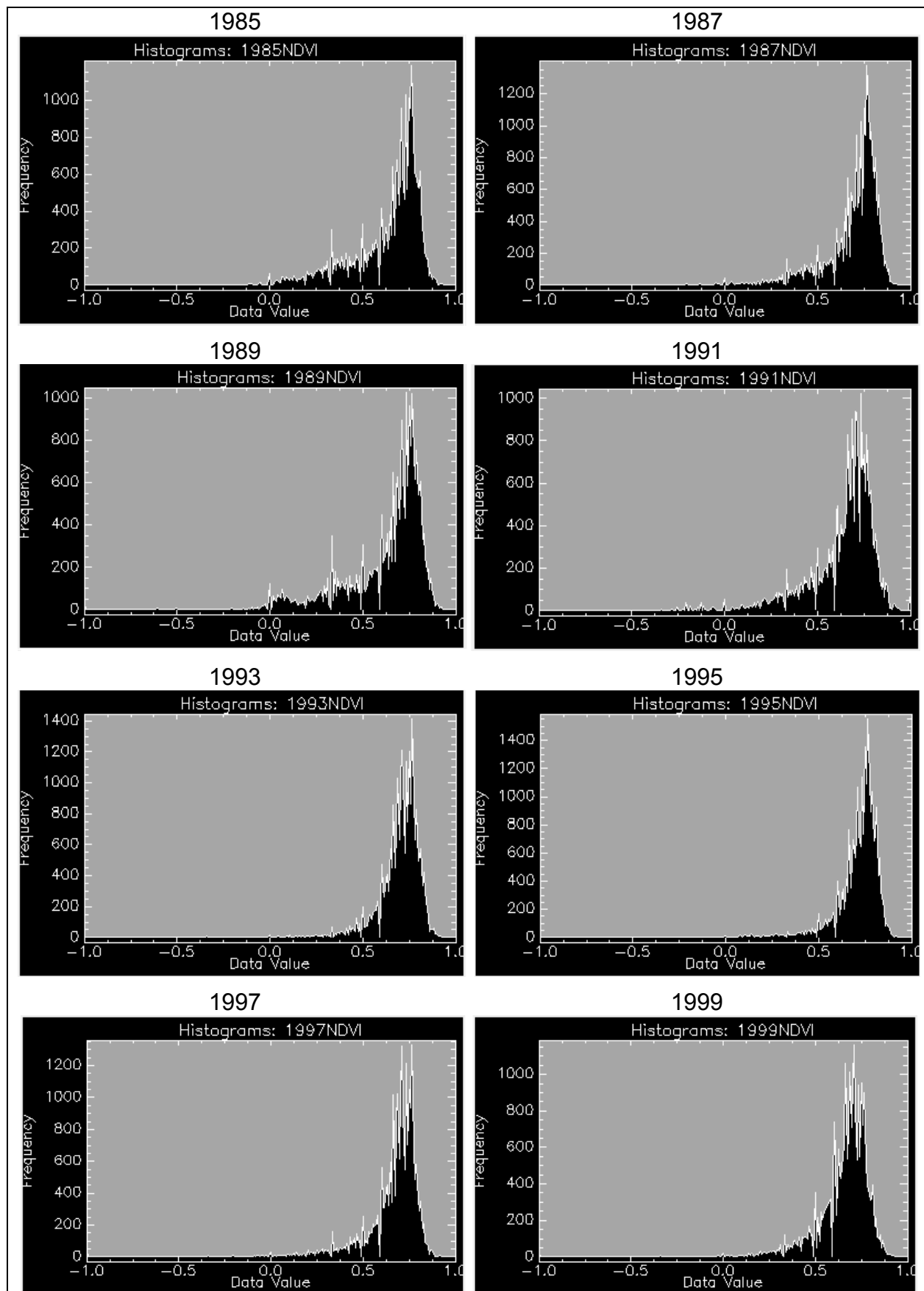
Fonte: Autor, dados de mapas NDVI no ENVI.

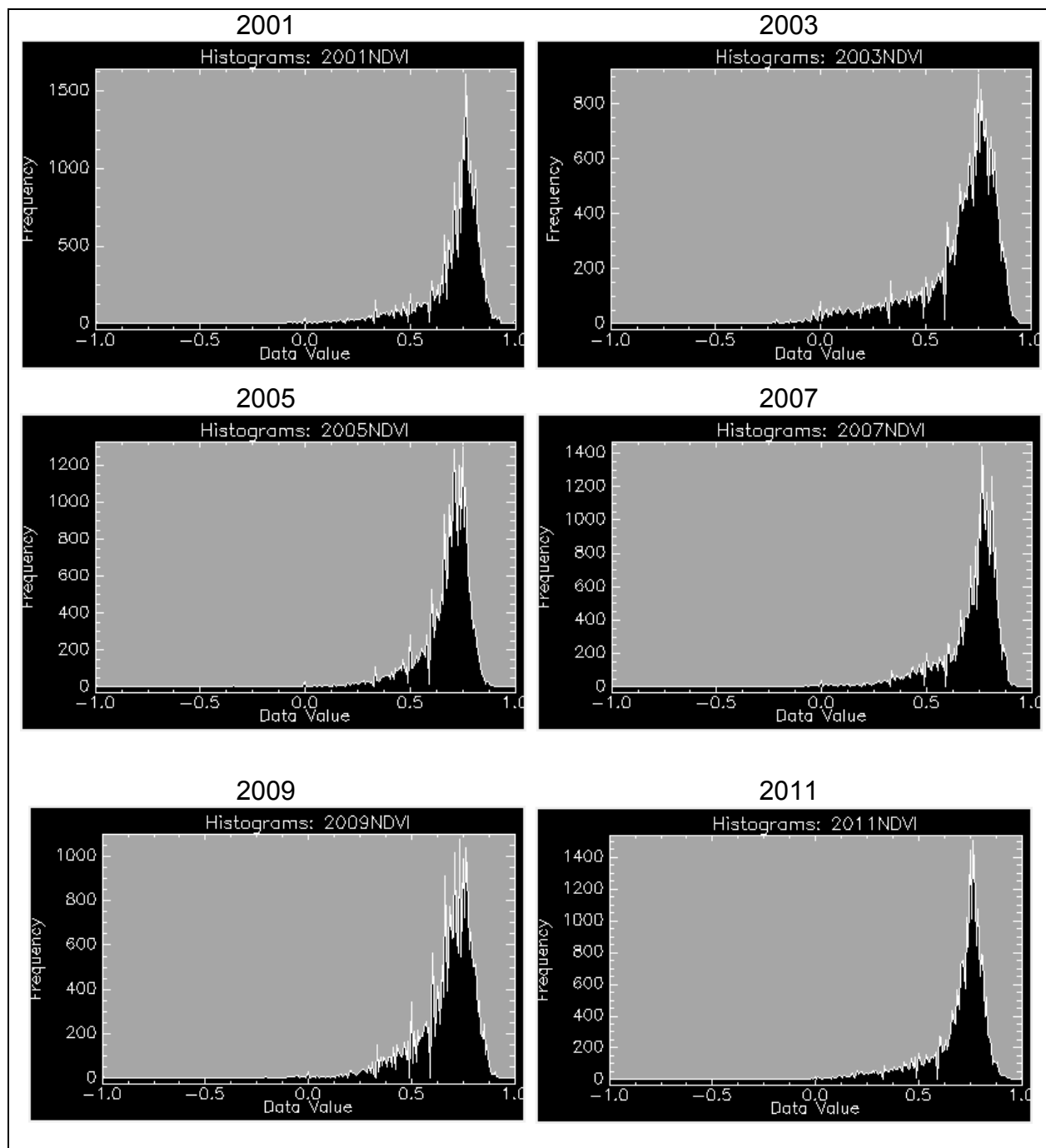
Na Tabela 13, os coeficientes de variação do NDVI de 1989 e 2003 têm percentual acima de 30%, o que segundo a classificação de Pearson indica alta dispersão em relação à média. Nos demais anos, o coeficiente de variação indica concentração moderada em torno da média, pois variam entre 15 e 30%, não havendo anos em que os dados apresentassem alta concentração em torno da média.

O resultado já era esperado em função das características intrínsecas ao NDVI e da diversidade dos alvos da área mensurados por esse índice: cursos de água, estradas pavimentadas, solo exposto e construções. Além disso, por essa mesma tabela, é possível constatar que todas as médias de NDVI variam entre 0,65 e 0,70, o que indica que, nesse período, a FEENA manteve alta atividade fotossintética e densidade de sua vegetação, o que ocorre para valores de NDVI acima de 0,5.

A Figura 31 apresenta os histogramas do NDVI restrito à área da FEENA para cada um dos anos das cartas imagens da série temporal.

Figura 31 - Histogramas do NDVI de 1985 a 2011





Fonte: Autor, mapas de NDVI, programa ENVI

Observa-se na Figura 31 que o histograma do ano de 2003 apresenta valores para o NDVI com frequência abaixo de 850, enquanto os demais histogramas apresentam valores máximos de frequência acima de 1000. Pode-se sugerir que, especificamente nesse ano, a vegetação na FEENA apresentou menor intensidade fotossintética e menor densidade.

Os histogramas apresentam curvas leptocúrticas (pontigudas), o que indica alta concentração dos dados em torno dos valores das medidas de tendência central. Além disso, a assimetria deles é negativa, ou seja, a calda da curva está à esquerda das medidas de tendência central, o que indica que os valores de NDVI estão acima de zero. Isso é confirmado pela Tabela 14, que apresenta os valores das frequências relativas do NDVI para cada um dos anos das imagens nos intervalos $[-1; 0,5)$ e $[0,5; 1]$.

Tabela 14 - Frequência relativa do NDVI na FEENA

Ano	Frequências relativas do NDVI (%)	
	Intervalo $[-1; 0,5)$	Intervalo $[0,5; 1]$
1985	21	79
1987	12	88
1989	21	79
1991	18	82
1993	4	96
1995	5	95
1997	11	89
1999	12	88
2001	11	89
2003	19	81
2005	10	90
2007	11	89
2009	14	86
2011	12	88
Média	13	87

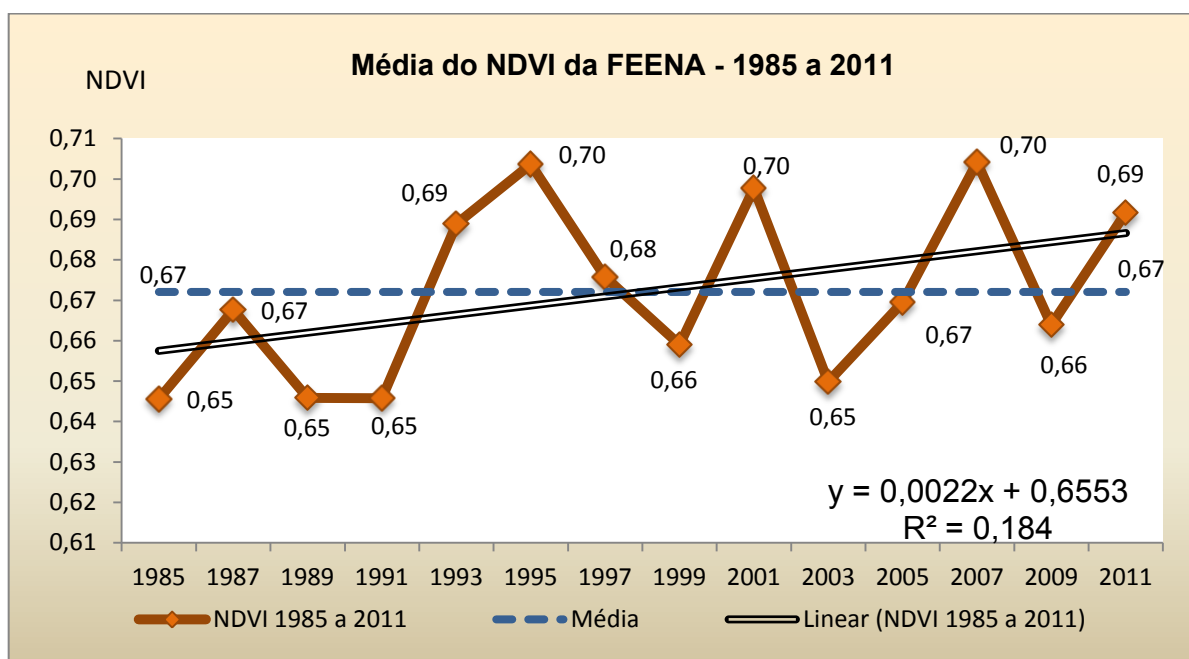
Fonte: Autor, imagens NDVI, ENVI e planilha Excel.

Na série de histogramas da Figura 31 da página 97, diferenciam-se, de acordo com a Tabela 13 na página 96, os referentes aos anos de 1985, 1989, 1991 e 2003, que apresentaram a menor média 0,65 e os maiores coeficientes de variação, respectivamente, 29, 32, 29 e 33%, os quais indicam alta dispersão dos dados em torno da média.

Os valores percentuais do NDVI entre 0,5 e 1 confirmam que, no decorrer do período estudado, a vegetação da FEENA manteve grande atividade fotossintética e alta densidade.

A Figura 32 apresenta o gráfico das médias do NDVI de imagens com intervalos de dois anos no período de 1985 a 2011. A reta de mínimos quadrados ajustada para as médias do NDVI no período, praticamente não define uma tendência, pois seu coeficiente angular é 0,0022, muito próximo zero. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,184$ indica baixo ajuste da curva de correlação linear do NDVI em relação aos dados da série.

Figura 32 - Médias e curva de tendência do NDVI na FEENA

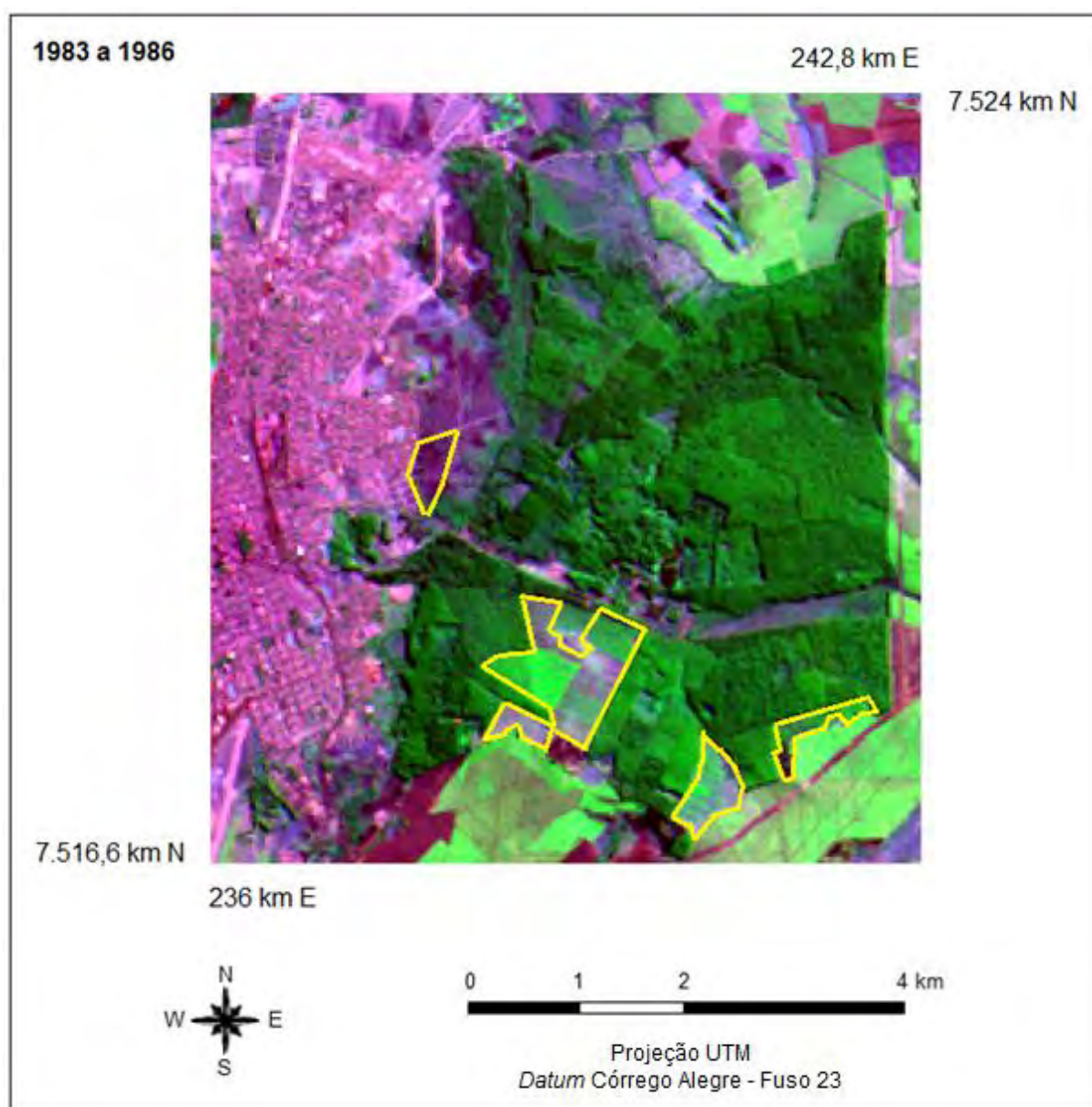


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do NDVI da FEENA

Como medidas estatísticas para o NDVI da FEENA das imagens da série foram obtidas a amplitude total 0,05; média 0,67; desvio padrão 0,02 e coeficiente de variação 3,13%. Esses valores confirmam que há grande concentração dos dados em torno da média. Além disso, há 6 anos com valores inferiores à média e o mesmo número com valores superiores. Pode-se inferir a partir dos valores das medidas estatísticas obtidos que a média é uma boa representação para o conjunto de dados.

As Figuras 33, 34 e 35 apresentam a indicação dos talhões nas imagens da FEENA, respectivamente, em 1985, 1987 e 1989, onde ocorreu o plantio de eucaliptos. Em seguida a cada figura, a identificação desses talhões, o ano de plantação e a quantidade plantada, remanescente em 1994, estão apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17.

Figura 33 - Talhões do plantio de 1983 a 1986



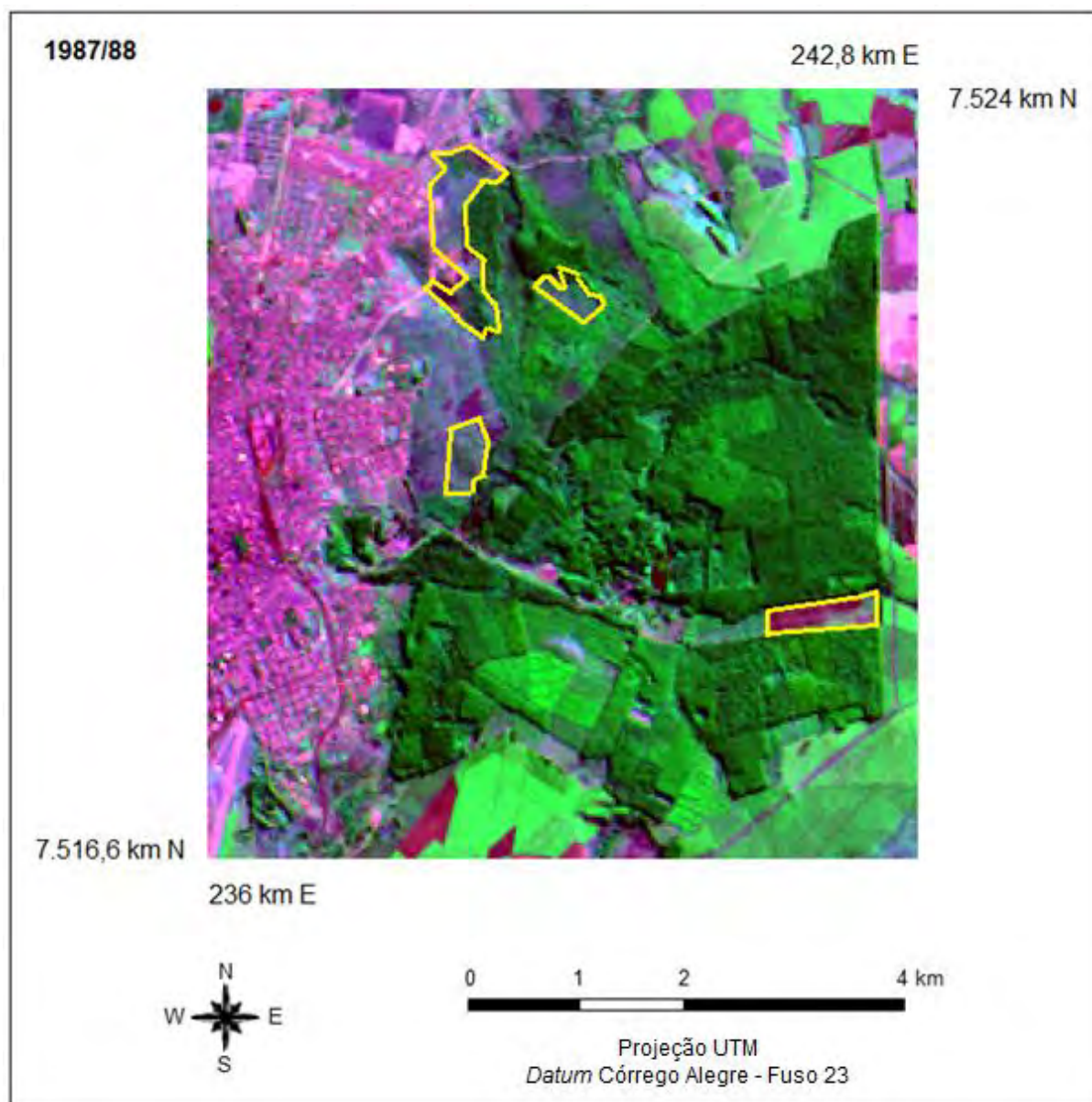
Fonte: Autor, imagens composição colorida RGB345 - TM Landsat

Tabela 15 - Discriminação do plantio nos talhões em 1983/84

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
12/15/16/35/38/1-R	1983	91.268
29/31/32/33/34/35-B/35-C/36	1984	29.962

Fonte: Autor, dados do plano de manejo FEENA/2005

Figura 34 - Talhões do plantio de 1987 e 1988



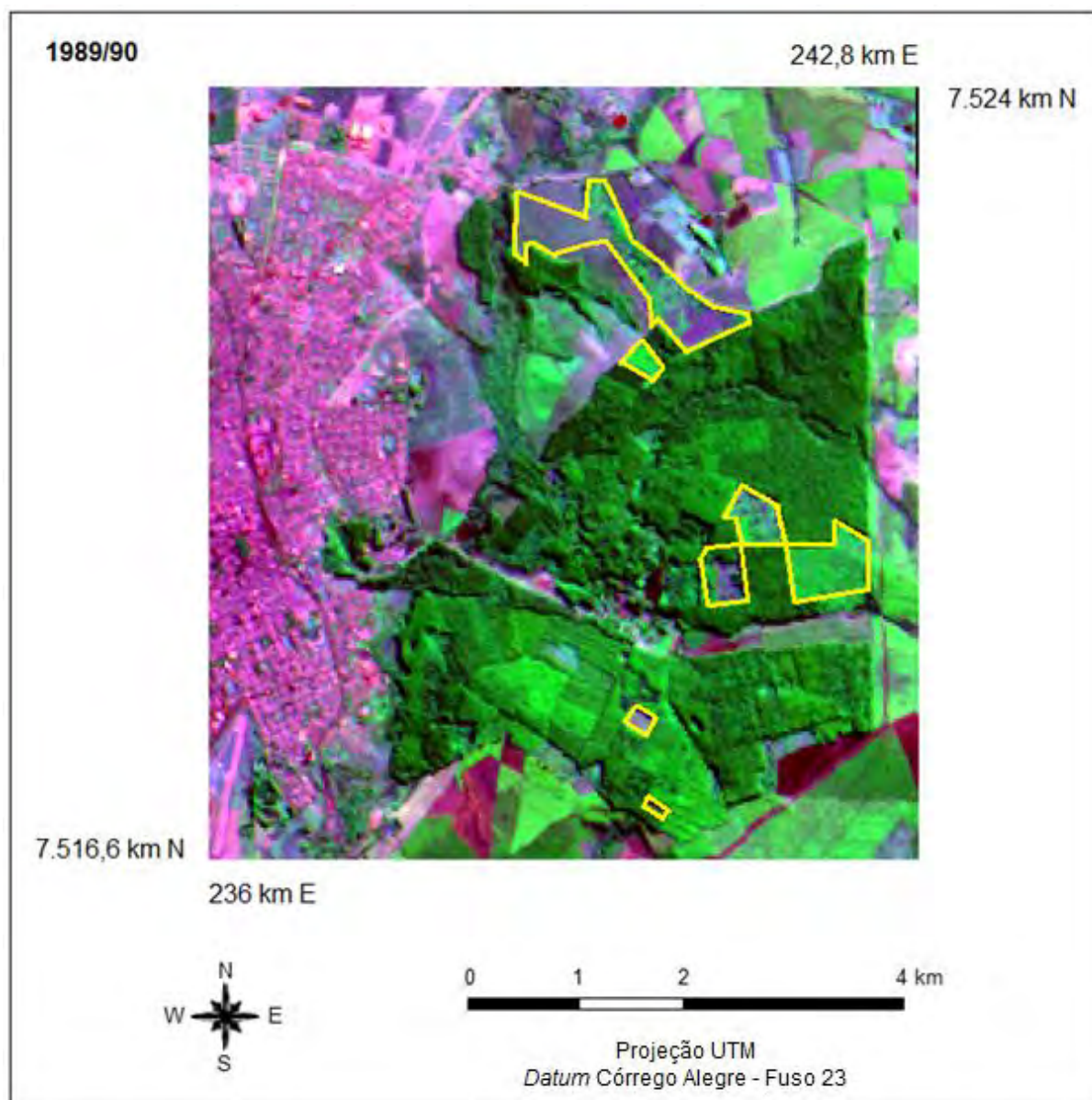
Fonte: Autor, imagens composição colorida RGB345 - TM Landsat

Tabela 16 - Discriminação do plantio nos talhões em 1987/88

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
111	1987	9.923
2-R/7-R/9-R/12-R/13-R/14-R	1988	296.879

Fonte: Autor, dados do plano de manejo FEENA/2005

Figura 35 - Talhões do plantio de 1987 e 1988



Fonte: Autor, imagens composição colorida RGB345 - TM Landsat

Tabela 17 - Discriminação do plantio nos talhões em 1989/90

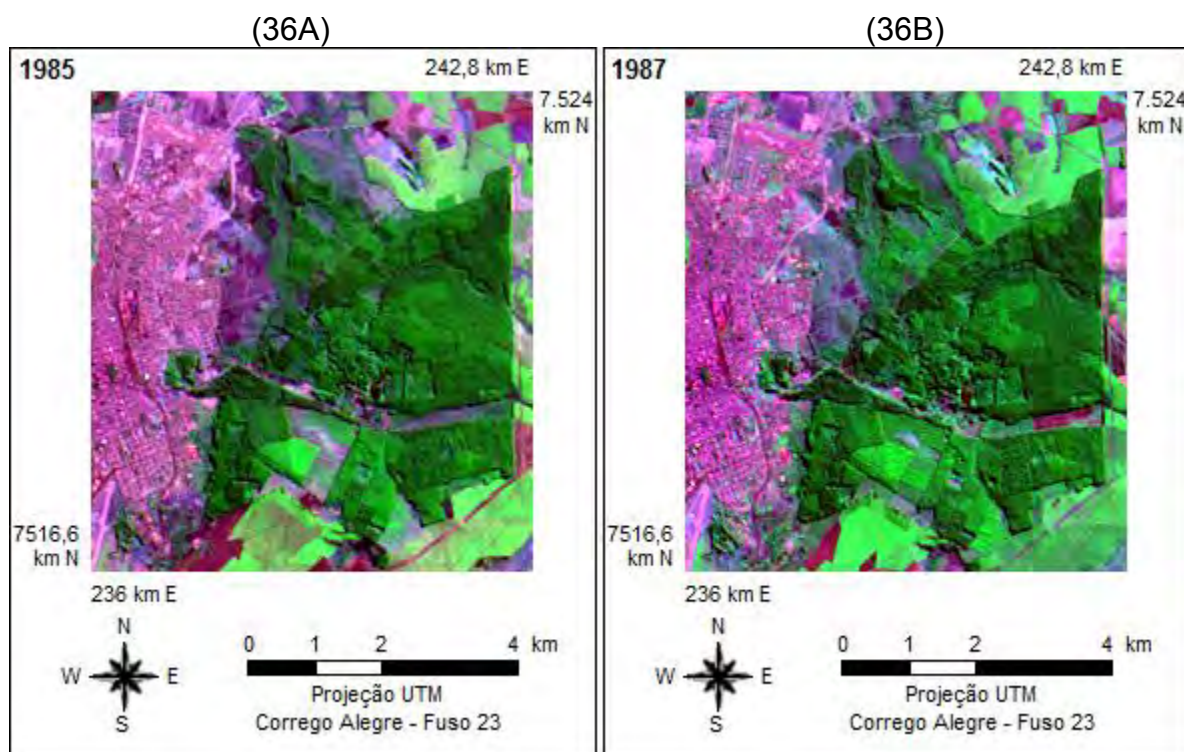
Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
18/25/6-R/10-R/15-R/16-R/17-R	1989	324.539
109/18-R/19-R/20-R/21-R/22-R	1990	150.969

Fonte: Autor, dados do plano de manejo FEENA/2005

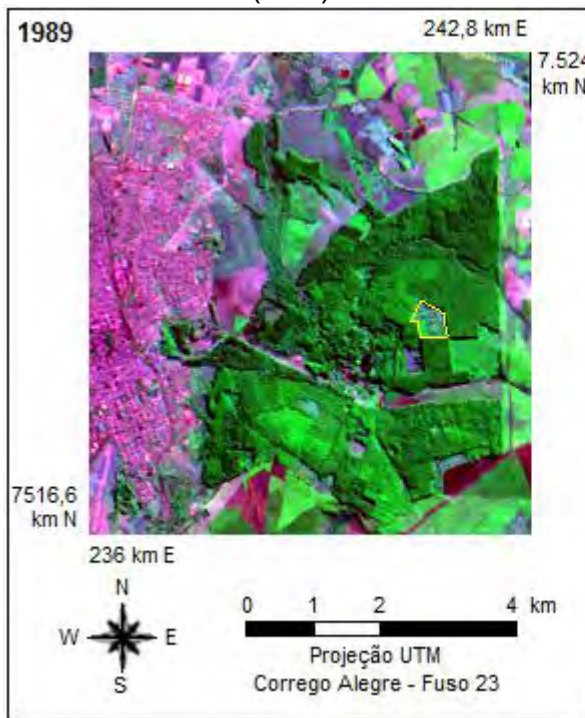
Nos anos das imagens das figuras 33, 34 e 35, respectivamente 1985, 1987 e 1989, as médias do NDVI tiveram como respectivos valores 0,65, 0,67 e 0,65, de acordo com a Tabela 13 na página 96, uma variação de 0,02, que corresponde a percentual menor que 3,1%, muito baixo em relação à média do período, o que indica que a atividade fotossintética e a densidade da vegetação foram mantidas altas durante o desenvolvimento das árvores.

A Figura 36 apresenta a série temporal completa das imagens composição colorida R3G4B5 da FEENA para ilustrar o desenvolvimento do manejo da vegetação nos talhões, que podem ser diferenciados, no período de 1985 a 2011.

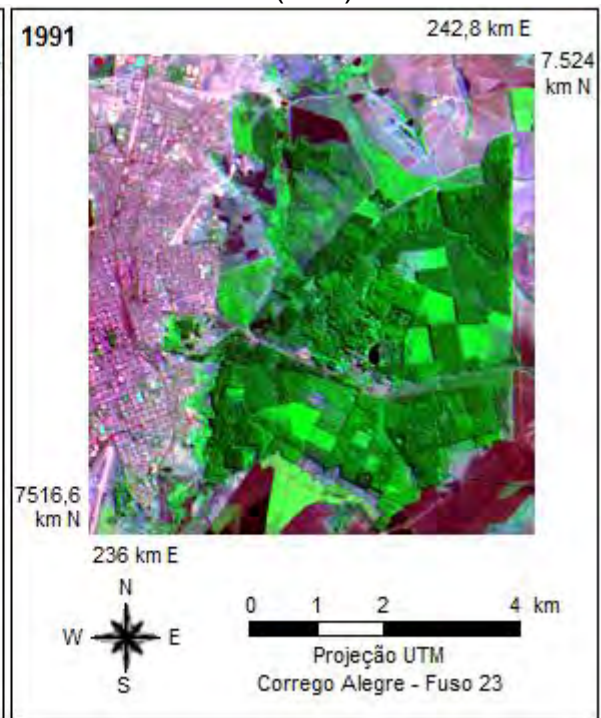
Figura 36 - Imagens “falsa cor” R3G4B5 da FEENA de 1985 a 2001



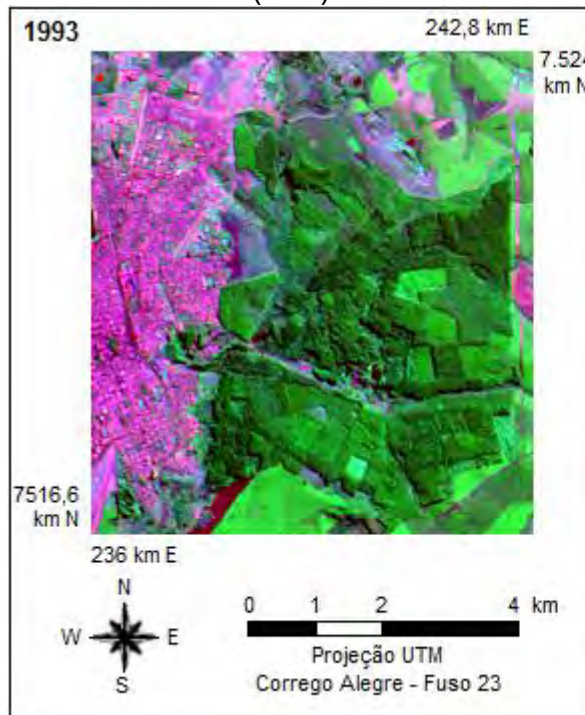
(36C)



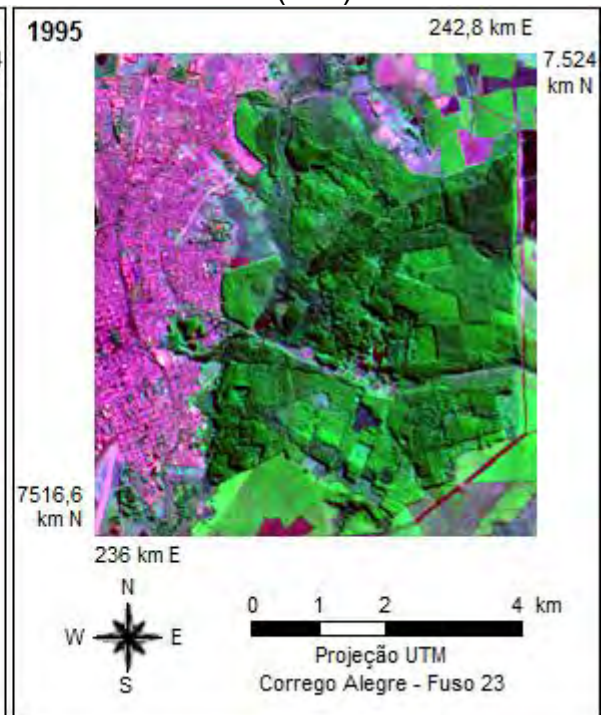
(36D)



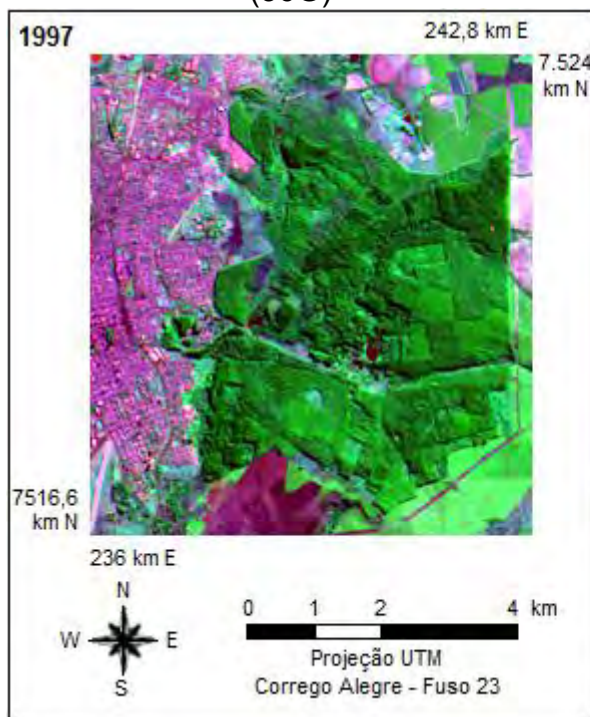
(36E)



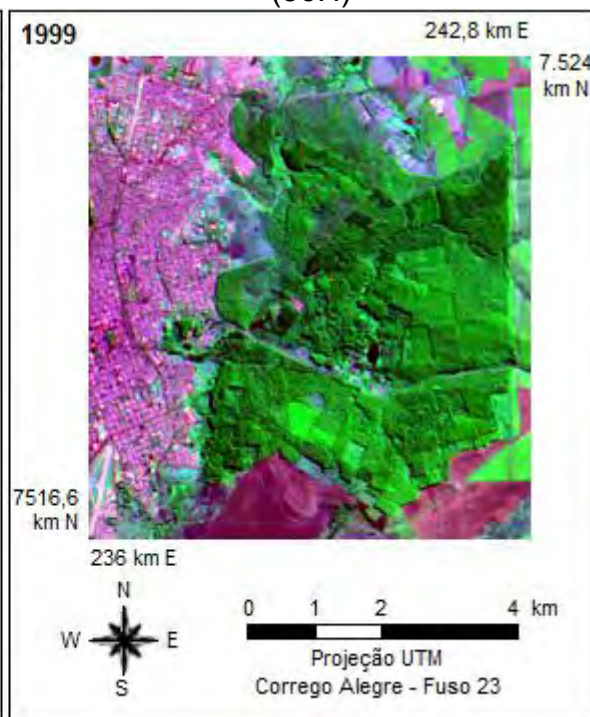
(36F)



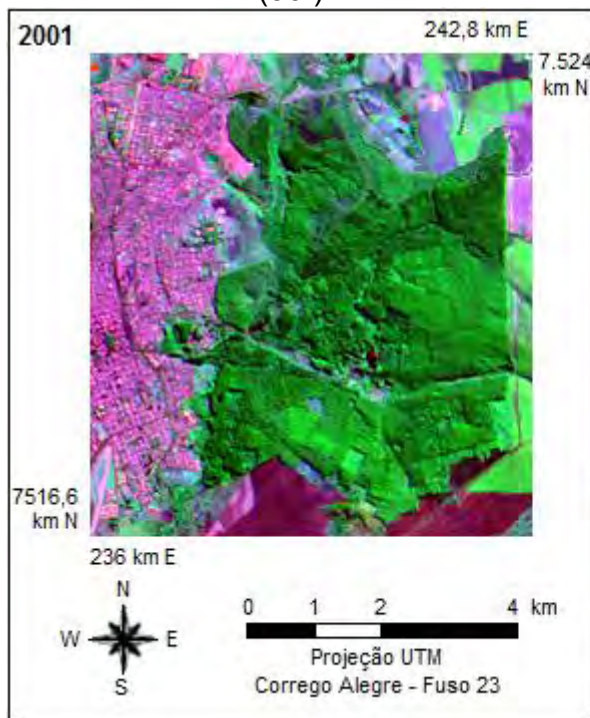
(36G)



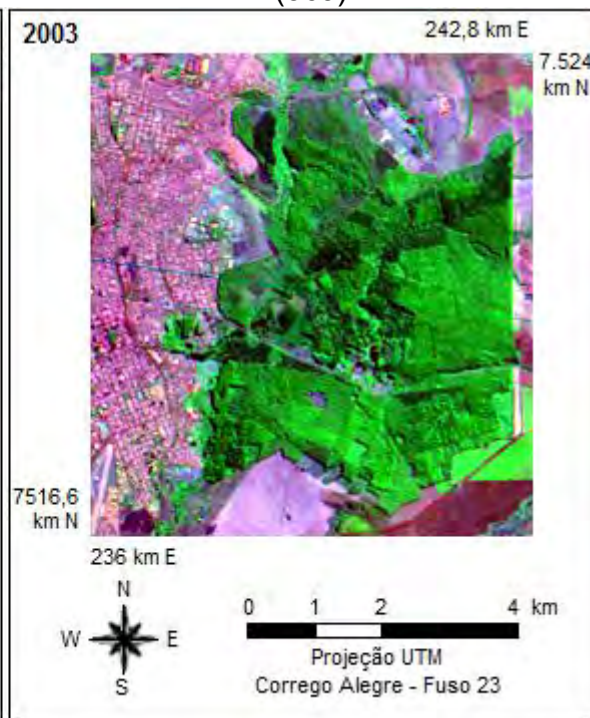
(36H)



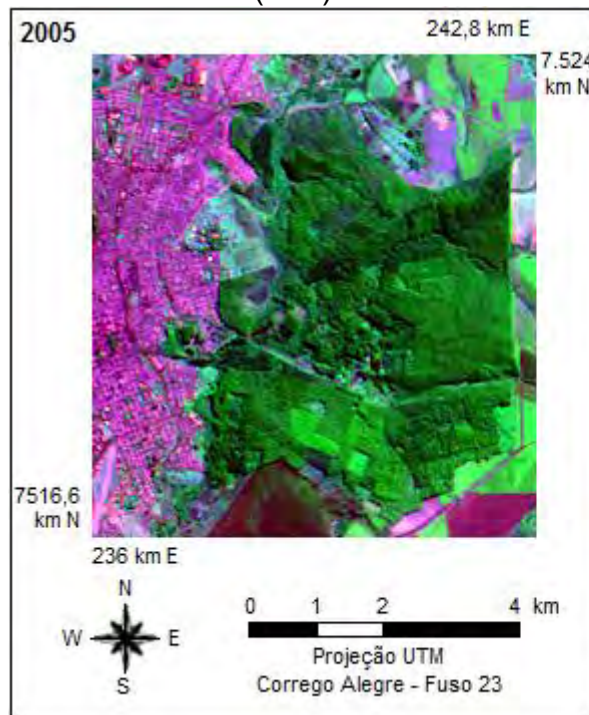
(36I)



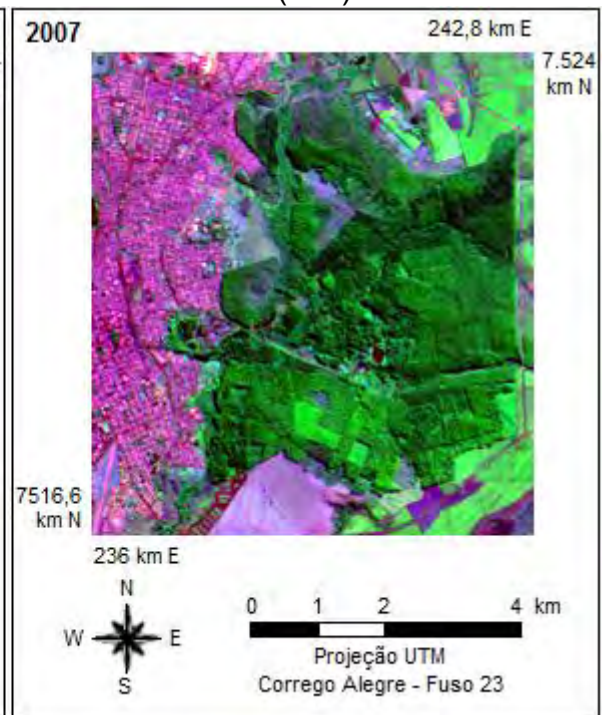
(36J)



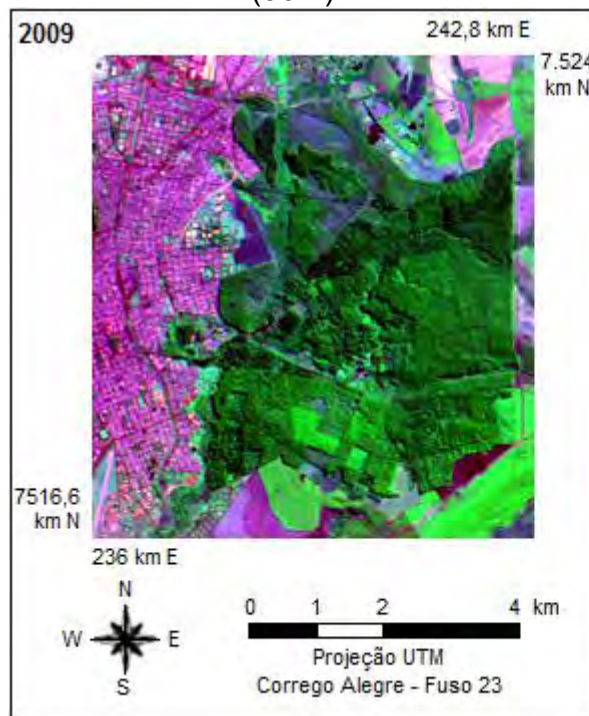
(36K)



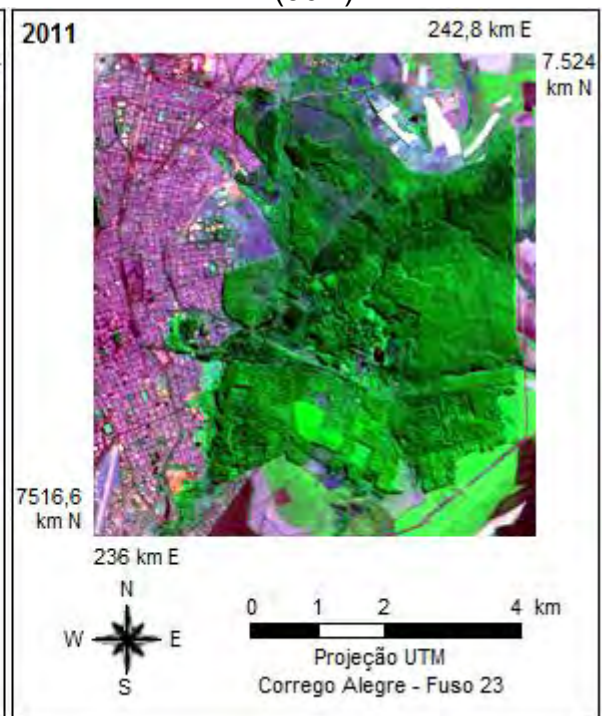
(36L)



(36M)



(36N)



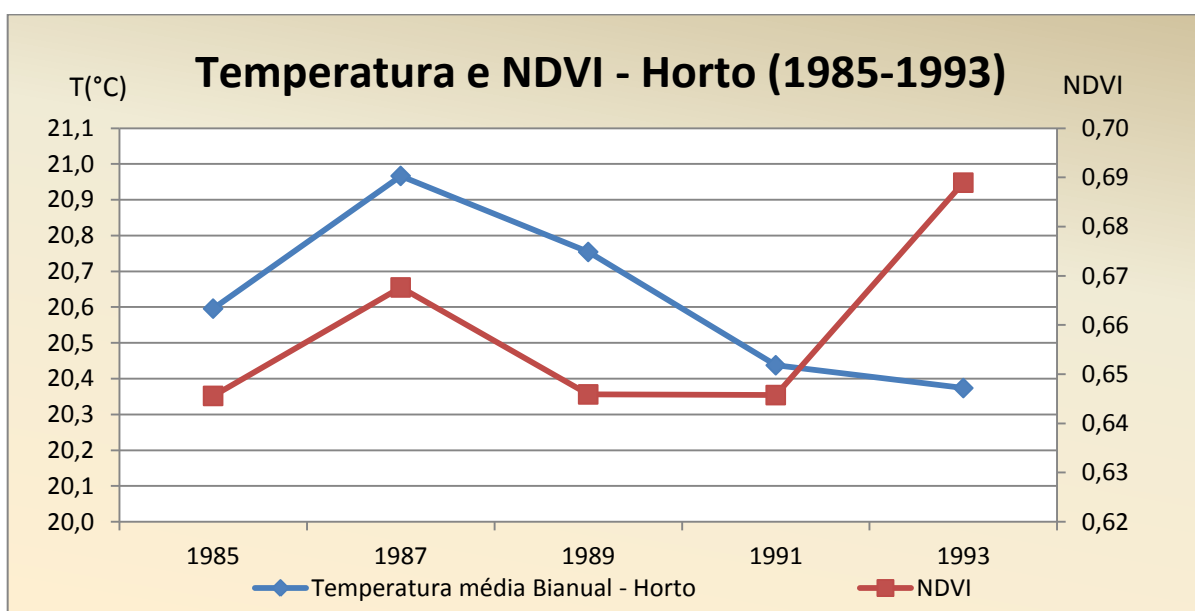
Fonte: Autor, Imagens composição colorida

Pode ser acompanhado, por exemplo, o desenvolvimento da vegetação nos talhões 17-R e 18-R da FEENA delimitados na Figura 36C. Após plantio, a partir de 1989 a cada imagem subsequente esses mesmos talhões apresentam menor destaque e nos últimos anos da série dessas imagens, já não é possível diferenciá-los dos demais. Isso pode ter corroborado para que a média do NDVI se mantivesse entre 0,65 e 0,70.

5.4 Relação entre a temperatura e o NDVI

Com a série de valores das médias do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada das imagens, dos anos correspondentes a média bianual da temperatura dos dados do Posto do Horto, foi gerado o gráfico da Figura 37, onde estão representadas as duas variáveis.

Figura 37 - NDVI e pluviosidade do Posto do Horto Florestal

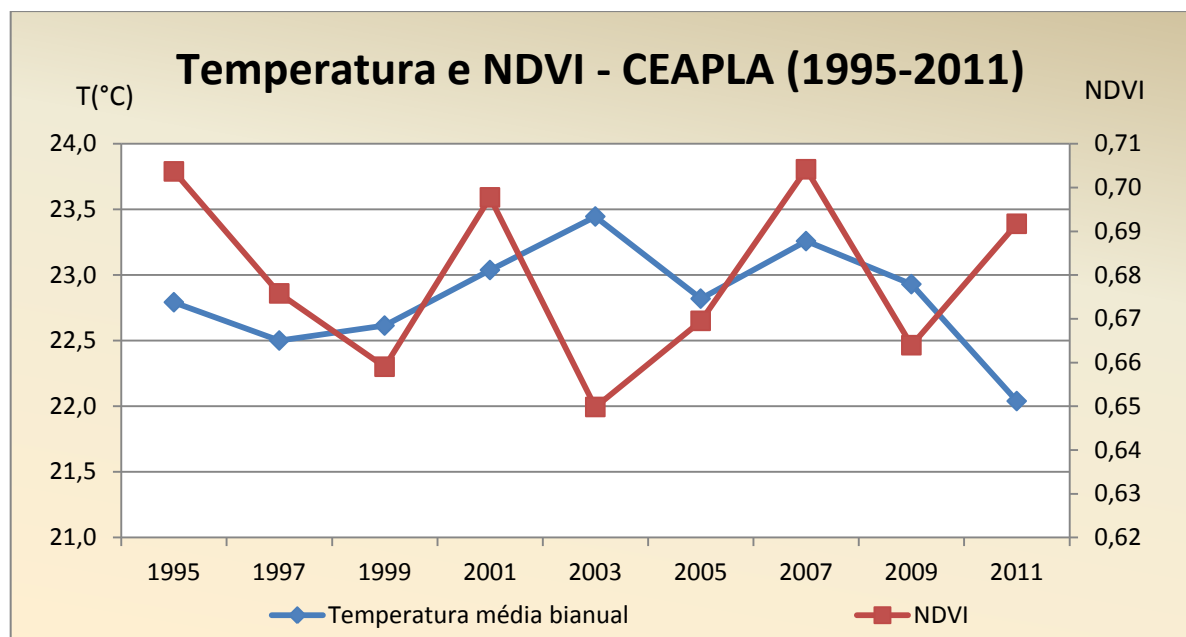


Fonte: Autor, dados meteorológicos e das imagens.

Observa-se no gráfico que, no período de 1985 a 1991, as curvas apresentam a mesma tendência em relação ao crescimento e decréscimo, mas, no período de 1991 a 1993, o NDVI tem variação positiva e a temperatura negativa.

O gráfico da Figura 38 apresenta os gráficos do NDVI e a correspondente média bianual da temperatura dos dados referentes à Estação Meteorológica do CEAPLA.

Figura 38 - NDVI e pluviosidade da Estação Meteorológica do CEAPLA

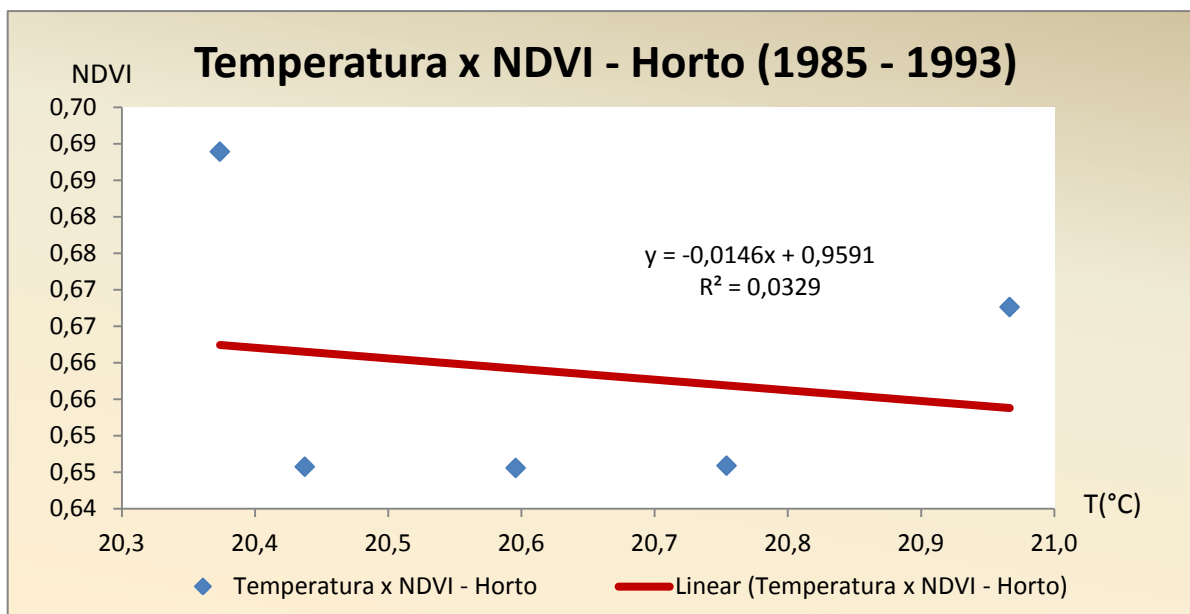


Fonte: Autor, dados meteorológicos e das imagens

Observa-se nos gráficos que, no período de 1995 a 2011, as curvas não apresentam crescimento e decréscimo similar.

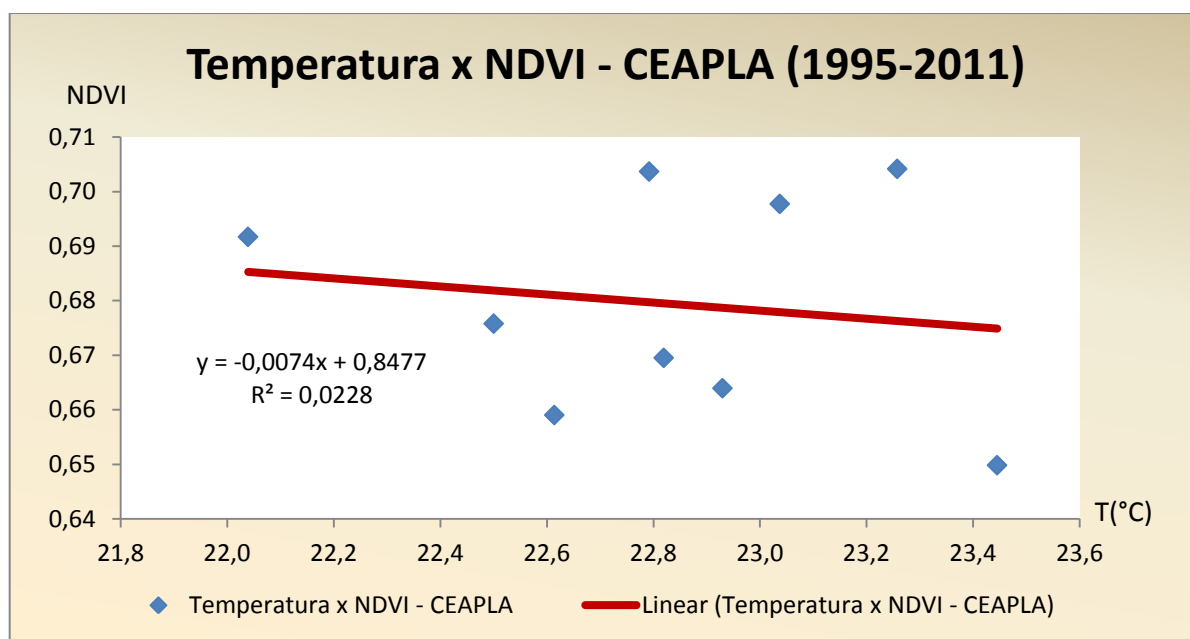
Para análise de regressão, foram elaborados os gráficos de dispersão das Figuras 39 e 40, que apresentam as curvas de tendência para o NDVI, tomando como variável independente a temperatura, nos períodos de 1985 a 1993, para os dados de temperatura do Posto do Horto e de 1995 a 2011 para os da Estação Meteorológica do CEPLA.

Figura 39 - Dispersão entre NDVI e temperatura do Posto do Horto



Fonte: Autor, dados meteorológicos e das imagens

Figura 40 - Dispersão entre NDVI e temperatura do Posto do Horto



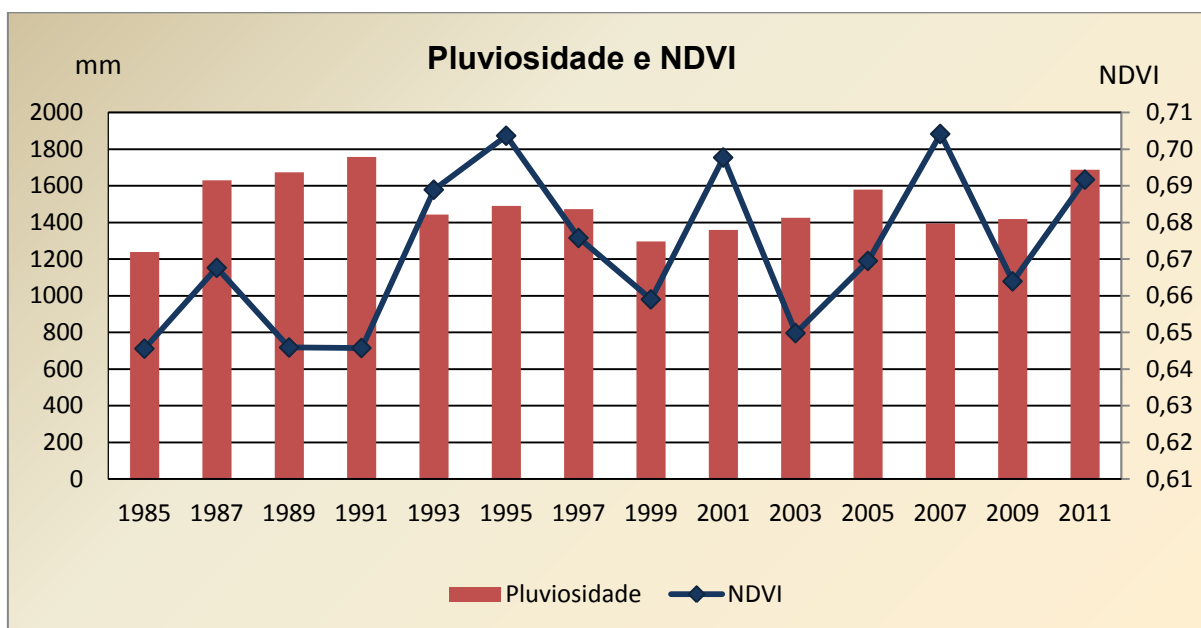
Fonte: Autor, dados meteorológicos e das imagens

As retas de regressão são decrescentes nos gráficos das Figuras 39 e 40, pois têm coeficientes angular negativos, mas muito próximos a zero. Os coeficientes de determinação, com valores muito próximos a zero, indicam não haver correlação significativa entre as médias bianuais da temperatura e a média do NDVI das cartas imagem da FEENA.

5.5 Relação entre pluviosidade e NDVI

A série de valores das médias do NDVI das imagens dos anos escolhidos e média bianual da pluviosidade esta apresentada na Figura 41.

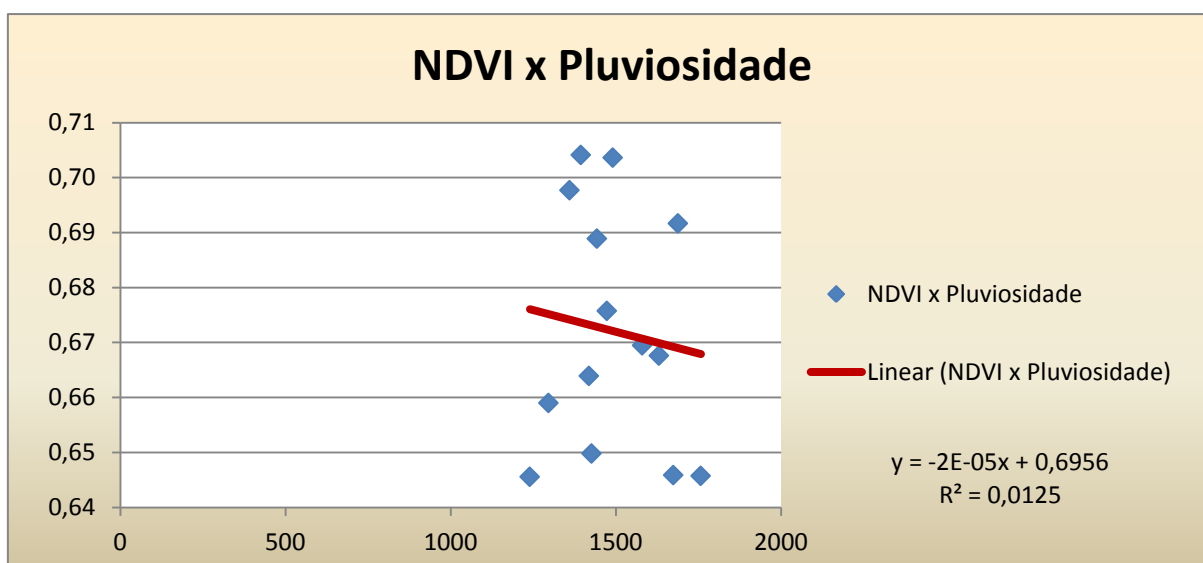
Figura 41 - Medias do NDVI e da pluviosidade



Fonte: Autor, planilhas obtidas com dados do CEAPLA.

Observa-se, pelo gráfico, que não há similaridade na evolução temporal da média pluviométrica bianual e da média do NDVI da FEENA, nos anos correspondentes.

A Figura 42 apresenta o gráfico da curva de tendência do NDVI, tomado como variável dependente da pluviosidade, para o período de 1985 a 2011, na FEENA.

Figura 42 - Dispersão entre médias de NDVI e pluviosidade

Fonte: Autor, dados do CEAPLA e das imagens TM Landsat

A reta de regressão apresenta tendência de decrescimento, mas seu coeficiente angular é $a = -0,00005$, indicando que essa tendência pode ser desprezada. O coeficiente de determinação tem valor muito baixo, $R^2 = 0,0125$, indicando que a variação do NDVI está associada à variação da pluviosidade com percentual menor que 2%, portanto não há correlação significativa e as variáveis NDVI e a pluviosidade podem ser consideradas independentes.

6. CONCLUSÕES

A análise do NDVI da série temporal de imagens da FEENA, por meio de Estatística Descritiva, na página 79, indicou valores médios que variam de 0,65 a 0,70 e a média geral 0,67, indicando alta atividade fotossintética e alta densidade de sua vegetação, composta basicamente por espécies de eucaliptos.

A temperatura apresentou variabilidade similar, como descreveram os gráficos da Figura 12 das páginas 74 a 79. Verificou-se que nos biênios do período, 1985 a 1993, referentes aos dados do Posto Meteorológico do Horto, a temperatura apresentou média anual de 20,6°C, com coeficiente de variação 2% e que no período de 1995 a 2011, para os dados da Estação Meteorológica do CEAPLA, a temperatura apresentou média anual de 22,8°C, com coeficiente de variação de 3%, portanto, uma diferença de 2,2°C nas médias dos dois períodos. Nos dois casos as maiores médias ocorreram nos três primeiros e três últimos meses do ano e nos dois períodos não houve tendência significativa de crescimento ou decréscimo, conforme mostraram os gráficos das Figuras 8 e 9 da página 70.

A pluviosidade anual do período de 1994 a 2011, descrita na página 104, teve média geral de 1475 mm e coeficiente de variação inferior a 15%, o que indica baixa dispersão dos valores anuais em relação a essa média. As médias mensais indicaram período chuvoso nos três primeiros e três últimos meses do ano.

Não foi observada correlação significativa entre o NDVI e as variáveis meteorológicas analisadas, fato descrito nas páginas 108 e 109. No entanto, pode-se inferir que o comportamento tanto da temperatura como da pluviosidade contribuíram para a alta densidade e atividade fotossintética da vegetação da FEENA, indicados pelo valor médio do NDVI das imagens.

Como há áreas da Floresta onde ocorreu manejo, envolvendo plantio e replantio de árvores, e a média do seu NDVI se manteve alta, pode-se sugerir que no período ocorreu sequestro de carbono da atmosfera, carbono este utilizado pela vegetação para seu crescimento e manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGAREZ, F.V. et al. **Utilização de Índice de vegetação na classificação integrada de fragmentos florestais em Mata Atlântica de Tabuleiros no Município de Sooretama, ES.** In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, p. 1499-1507, 2001. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.08.56/doc/1499.1507.123.pdf>>. Acesso em: 27 jan 2012.
- ALMEIDA, T.S. et al. **Índices de vegetação para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistemas de manejo do solo.** In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. Anais..., Goiânia, p. 17-24, 2005. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.18.17.02/doc/Indices.pdf>>. Acesso em: 19 ago 2012.
- AMARAL, S. et al. **Relações entre Índice de Área Foliar (LAI), Área Basal e Índice de Vegetação (NDVI) em relação a diferentes estágios de crescimento secundário na Floresta Amazônica em Rondônia.** In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador. Anais..., Salvador, p. 485-489, 1996. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/01.29.11.24/doc/T213.pdf>>. Acesso em: 11 set 2012.
- BACHA, C.J.C.; BARROS, A.L.M. **Reflorestamento no Brasil: evolução recente e perspectivas para o futuro.** Scientia Forestalis/INPE, n. 66, p. 191-203, Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr66/cap19.pdf>>. Acesso em: 11 jan 2011.
- BACK, A.J. **Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, n. 5, p.717-726, Brasília, 2001.
- BANNARI, A. et al. **A review of vegetation indices.** Remote Sensing Review. v. 13: 1, p. 95-120, 1995. Disponível em: <http://intranet.ukzn.ac.za/geog/pgrad/adv_remote_sens/readings/Review%20of%20Vegetation%20Indices.PDF>. Acesso em 17 mar 2011.
- BAPTISTA, M.M. **Validação da modelagem de seqüestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION.** In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte. Anais..., INPE, p. 1037-1044, 2005. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf>. Acesso em 23 ago 2012.
- BERNARDES, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta de Tapajós-Estado do Pará.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- BERRA, E.F. et al. **Estimativa de volume florestal com imagens LANDSAT 5.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Anais..., Curitiba, p.

1744-1750, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0325.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2012.

BOLFE, E.L. **Desenvolvimento de uma metodologia para estimativa de biomassa e de carbono em sistemas agroflorestais por meio de imagens orbitais**. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências – UNICAMP, 2010. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/item/264/browse?type=author&order=ASC&rpp=20&value=BOLFE%2C+E.+L.>>. Acesso em: 10 out 2011.

BRANDÃO, Z.N.; BEZERRA, M.V.C.; SILVA, B.B. **Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Anais..., Florianópolis, INPE, p. 75-81, 2007. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.13.39.22/doc/75-81.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2010.

BROWN, S. et al. **Root biomass allocation in the world's upland forests**. *Ecologies*, v. 111, p. 1-11, 1997. Disponível em: <<http://www.winrock.org/ecosystems/files/rootbiomassallocationintheworldsuplandforests1997.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2011.

BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford University Press, 352p, 1998.

BUSSAB, W.O.; MORETIIN, P.A. **Estatística básica**. 6 ed. São Paulo, Editora Saraiva, 540p, 2010.

CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. Tese. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, 1995. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/dpi/teses/gilberto/>. Acesso em: 11 mar 2011.

CANAVESI, V.; PONZONI, F.J. **Relações entre variáveis dendrométricas de plantios de Eucalyptus sp. e valores de FRB de superfície de imagens do sensor TM Landsat 5**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Anais..., Florianópolis, p 1619-1625, 2007. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.20.48/doc/1619-1625.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2012.

CAVALLET, L.E.; DE PAULA, E.V. **Estimativa de sequestro de carbono da biomassa aérea como indicador de sustentabilidade em decorrência da adequação da área de preservação permanente na sub-bacia do rio Pequeno (Antonina-PR)**. Disponível em: <http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/IIseminario/pdf_indicadores/indicadores_03.pdf>. Acesso em 20 dez. 2011.

CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL. **Dados meteorológicos**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/iqce/ceapla/estacao.php>>. Acesso em: 23 abr. 2010

CERQUEIRA, D.B.; FRANCA-ROCHA, W. **Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no bioma caatinga: estudo de caso em Rio das Contas – BA**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Anais...,

Florianópolis, p. 21-26, 2007. Disponível em:
<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.00.29/doc/2413-2419.pdf>>.
Acesso em: 5 fev. 2012.

CHUVIECO, E.; HUETE, A. **Fundamentals of satellite remote sensing**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

CONFERÊNCIA DAS PARTES. **Meio Ambiente**. Disponível em:
<http://www.brasil.gov.br/linhadotempo/html/tema/lista_epocas?tema=Meio%20Ambiente>
Acesso em: 9 fev. 2011.

COLTRI, P.P. et al. **Utilização de índices de vegetação para estimativas não destrutivas da biomassa, estoque e sequestro de carbono do cafeeiro arábica**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais..., Natal, INPE, p. 121-128, 2009. Disponível em:
<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.15.21/doc/121-128.pdf>>.
Acesso em: 5 fev. 2012.

COSTA, M.F. et al. **Utilização de subtração de imagem e NDVI na avaliação da cobertura vegetal RPPN Cafundó, Cachoeiro do Itapemirim, ES**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Anais..., Curitiba, PR. p. 1918-1925, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1131.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2011.

DE PAULA, M.D.; PEREIRA FILHO, W. **Estimativa de carbono em um fragmento de floresta madura na mata atlântica nordestina com o uso de índices espectrais**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais..., Natal, RN, p.2881-2888, 2009.

DIAS, R. **Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. Primeira edição. Ed. Atlas, São Paulo, 208p, 2005.

DIXON, R.K.; WINJUM, J.K.; SCHRODER, P.E. **Conservation and sequestration of carbon. The potential of forest and agroforest management practices**. Global Environmental Change, v. 3, n. 2, p. 159-173, 1993.

DONG, J. et al. **Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks**. . USDA Forest Service / UNL Faculty Publications. Paper 43. Remote Sensing of Environment V. 84, P. 393-410, 2003. Disponível em: <<http://digitalcommons.unl.edu/usdafsfacpub/43/>>. Acesso em 23 mai 2011.

FAUSTO, B. **História do Brasil**. EDUSP, 14 edição, 688 p, São Paulo, 2012.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. Companhia Nacional de Abastecimento – CNAB. Brasília – DF, 2005. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>. Acesso em: 9 Set. 2011.

FERRARI, A.L. **Variabilidade e tendência da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, e São Carlos e São Simão (SP): estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local**. Tese (Doutorado em

Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-23112012-133929/pt-br.php>>. Acesso em: 2 jan 2013.

FODDY, G.M.; BOYD, D.S.; CUTLER, M.E.J. **Predictive relations of tropical forest biomass from LANDSAT TM data and their transferability between regions.** Remote Sensing of Environment, n. 85, p. 463-474, 2003. Disponível em: <http://eastfire.gmu.edu/EOS759_06/readings/Foody2003.pdf>. Acesso em: 3 jan 2012.

GARCIA, L.B.R. **Rio claro e as oficinas da companhia paulista de estrada de ferro: trabalho e vida operária – 1939-1940.** Tese (Doutorado em Filosofia e Ciências Humanas) Instituto de Filosofia e Ciências Humanas – UNICAMP, 1992.

GILLET, M.; LEMAIRE, G.; GOSSE, G. **Essai d'élaboration d'un schéma global de la croissance des graminées fourragères.** Agronomie, Paris, v. 4, p. 75-82, 1984.

GIRARDI, L.H. de O.; SILVA, B.C.N. **Quantificação em geografia.** São Paulo, FIFEL, 162p, 1981.

HOUGHTON, R.A.; HACKLER, J.L. **Carbon flux to the atmosphere from land-use changes: 1850 to 1990.** U. S. Department of Energy, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. **O valor do mercado de créditos de carbono.** Disponível em: <<http://www.ibflorestas.org.br/pt/component/search/?searchword=sequestro+de+carbono&ordering=&searchphrase=all>>. Acesso em 23 jul 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010: População do Brasil.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1766>. Acesso em: 25 ago. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão dos Biomas continentais brasileiros – Comunicação Social – 2004.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=169>. Acesso em: 10 out. 2010.

INSTITUTO CARBONO BRASIL. **Concentração de GEEs é a maior da história, diz OMM.** Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/reportagens_carbonobrasil/noticia=729003>. Acesso em 2 out 2011.

INSTITUTO FLORESTAL BRASILEIRO. **Biomas e suas florestas.** Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/os-biomas-e-suas-florestas/>>. Acesso em 23 Out. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Imagens de Rio Claro, SP. Imagens LANDSAT5 TM: 220/075.** Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>. Acesso em: 23 jun. 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Relatório do IPCC/ONU. Novos Cenários Climáticos 2007**. Disponível em: <http://www.ecolatina.com.br/pdf/IPCC-COMPLETO.pdf>, Acesso em 13 jan 2012.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. **Interpreting vegetation indices**. Preventive Veterinary Medicine, v.11, n. 3-4, p. 185-200, 1991. Disponível em: <http://www.uprm.edu/biology/profs/chinea/gis/lectesc/intvegindx.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2012.

JENSEN, J.R. **Remote Sensing of the environment: an Earth resource perspective**. 2nd Ed. Ed. Pearson, 592p, 2007.

JORDAN, C.F. **Derivation of leaf area index from quality of light on the Forest floor**. Ecology, 50: 663-666, 1969.

JUNGES, A.H.; ALVES, G.; FONTANA, D.C. **Estudo indicativo do comportamento do NDVI e EVI em lavouras de cereais de inverno da região norte do Estado do Rio Grande do Sul, através de imagens MODIS**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Anais..., Florianópolis, p. 241-248, 2007. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.10.52/doc/241-248.pdf>. Acesso em 23 jun 2012.

LANDSAT TM 5. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1985-2011. 14 imagens de satélite. Canais 3,4 e 5. Escala 1:100.000.

LENZI, E.; FAVERO, L.O.B. **Introdução à química da atmosfera: ciência, vida e sobrevivência**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 465p. 2009)

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Editora UNIDERP. Campo Grande, 908p, 2007.

LU, L.; DENNING, A.S.; SILVA-DIAS, M.A.; SILVA-DIAS, P.; LONGO, M.; FREITAS, S.R.; SAATCHI, S. **Mesoscale circulation and atmospheric CO₂ variations in the Tapajós Region, Pará, Brazil**. Journal of Geophysical Research, V. 110, D21102, doi: 10.1029/2004JD005757, 2005. Disponível em: <http://biocycle.atmos.colostate.edu/~lixin/pubs/lbameso.pdf>. Acesso em: 21 jun 2011)

MENESES, P.R. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. UnB, CNPq, Brasília, 266p, 2012. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em 21 set 2012.

MICHULIN, A.V. **A História da antiguidade**. Lisboa, 220p, 1960.

MONTEIRO, C.A. de F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo em forma de Atlas**. São Paulo: USP/Igeo, 1973.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicações**. 3 edição atual ampliada – Viçosa: Ed. UFV, 320p, 2007.

MUUKKONEM, P.; HEISKANEN, J. **Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data**. Remote Sensing of Environment, n. 99, p. 434-447, 2005. Disponível em: <http://www.helsinki.fi/geography/Janne_Heiskanen/pdf/Muukkonen_Heiskanen_05_rse.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2012.

MUUKKONEM, P.; HEISKANEN, J. **Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories**. Remote Sensing of Environment, n. 107, p. 617-624, 2007. Disponível em: <http://www.helsinki.fi/geography/Janne_Heiskanen/pdf/Muukkonen_Heiskanen_07_rse.pdf>. Acesso em: 2 Jan. 2012.

NEUFELD, J.L. **Estatística aplicada à administração usando Excel**. Tradução: CELEST, J.L. PEARSON Prentice Hall . São Paulo, 435p, 2003.

NOVAIS, L.R. et al. **Análise da vegetação da Área de Preservação Ambiental de São Desidério - BA, a partir do NDVI e NDWI**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Anais..., Curitiba, p. 1888-1894, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1077.pdf>>. Acesso em: 12 dez 2011.

NOVO, E.M.L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. Ed. Edgard Blücher – São Paulo. 308p, 1992.

NOVO, E.M.L.M. et al. **Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos**. Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas - ACTA AMAZÔNICA. Vol. 35(2), p. 259-272, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/aa/v35n2/v35n2a16.pdf>>. Acesso em: 12 jan 2012.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICAS **La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono**. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre El Cambio Climático, 2005. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf>. Acesso em: 22 out 2011.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICAS. **Cambio climático 2007**. Informe Del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre El Cambio Climático, 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf>. Acesso em: 15 dez 2011.

PONZONI, F.J. **Comportamento espectral da vegetação**. In: MENESES, P.R.; NETO, J.S.M. (Org.) Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 157-199, 2001.

PONZONI, F.J.; REZENDE, A.C.P. **Caracterização espectral de estágios sucessionais de vegetação secundária arbórea em Altamira (PA), através de dados orbitais**. Rev. Árvore, Viçosa-MG, v.28, n.4, p.535-545, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v28n4/22602.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2011.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. Editora Parêntese, São Jose dos Campos, 2007.

RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. **Modeling flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery**. AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California, 2000.

RAMOS, R.R.D. et al. **Aplicação do índice da vegetação por diferença normalizada (ndvi) na avaliação de áreas degradadas e potenciais para unidades de conservação**. In ; III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife. Anais..., Recife, PE, p. 1-6, 2010.

REIS, C.M.; ZANCHETTA, D; PONTALTI, S.F.L. (orgs). **Plano de manejo da Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade**. Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, São Paulo, 2005.

RESENDE FILHO, C.B. **História econômica geral**. 8. ed. Contexto, São Paulo, 354p., 2005.

ROCHA, J.C.; ROSA, A.H.; CARDOSO, A.A. **Introdução à química ambiental**. 2 ed. Bookman, Porto Alegre, 256p., 2009.

ROUSE, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, 1973. Proceedings. Washington: NASA, v.1, p.309-317, 1973.

SÁ, I.S. et al. **Uso do índice de vegetação da diferença normalizada (IVDN) para caracterização da cobertura vegetal da região do Araripe Pernambucano**. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 1, n. 1. p. 28-38, 2008. Disponível em: <<http://www.ufpe.br/rbqfe/index.php/revista/article/viewFile/18/14>>. Acesso em: 21 jun 2012.

SANTIAGO, M.M. et al. **Análise da cobertura vegetal através dos índices de vegetação (ndvi, savi e iaf) no entorno da Barragem do Botafogo-PE**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais..., Natal, p. 3003-3009, Natal, 2009. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.02.18/doc/3003-3009.pdf>>. Acesso em: 4 jan 2012.

SANTOS, M.J.Z. **Mudanças climáticas no Estado de São Paulo**. Geografia. Rio Claro, v. 21, n. 2, p. 111-171, 1996.

SEDJO, A.R.; SOHNGEN, B. **Forestry sequestration of co2 and markets for timber**. Resources for the future, p. 1-84, 2000.

_____ **Forest carbon sequestration: some issues for Forest investments**. Resources for the future, p.1-34, 2001.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO SFB. **Bens e serviços que a floresta fornece**. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/bens-e-servicos-que-a-floresta-fornece>>. Acesso em: 11 jul. 2011.

SILVA, C.A.V. et al. **Uso do sensoriamento remoto através de índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na microrregião de Itamaracá – PE**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais..., Natal, INPE, p. 3079-2085,

2009. Disponível em:

<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.02.18.31/doc/3079-3085.pdf>>. Acesso em: 7 jul 2011.

SPIGEL, M.R. **Estatística**. Tradução, revisão e adaptação: CRUSIUS, A. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 454p, 1985.

SPIGEL, M.R. **Probabilidade e estatística**. Tradução FARIAS, A.A. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 527p, 1978.

SPIRO, T.G; STIGLIANI, W.M. **Química ambiental**. Tradução YAMAMOTO, S.M., revisão Pearson Prentice Hall, 2 ed., São Paulo, 344p., 2009.

TURNER, D.P. et al. **Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites**. REMOTE SENS. ENVIRON, p.52-68, 1999. Disponível em:

<<http://naldc.nal.usda.gov/download/37436/PDF>>. Acesso em: 2 jan 2012.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE.

Calendário das reuniões do COP. Disponível em:

<http://unfccc.int/meetings/unfccc_calendar/items/2655.php?year=>. Acesso em: 12 out. 2011.

VALENTE, R. de O.A. **Análise da estrutura da paisagem na bacia do Rio Corumbataí, SP**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-16042004-145533/>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

VALENTE, R. de O.A.; VETTORAZZI, C.A. **Mapeamento de uso e cobertura do solo da Bacia do rio Corumbataí**. Circular Técnica, IPEF, 2003. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr196.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2012.

VICENTINO, C. **História Geral** (Coleção Novos Tempos). Editora Scipionne, 495p., 2008.

WATZLAWICK, L.F. et al. **Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze utilizando imagens do satélite IKONOS II**.

Biomassa & Energia, v. 1, p. 209-219, 2004. Disponível em:

<http://www.renabio.org.br/arquivos/p_estimativa_ii_6847.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2011.

WATZLAWICK, L.F.; KOEHLER, H.S.; KIRCHNER, F.F. **Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II**. Ciência e Natura, UFSM, v. 28, p. 45-60, 2006. Disponível em:

<http://cascavel.ufsm.br/revista_ccne/ojs/index.php/cienciaenatura/article/viewFile/39/49>. Acesso em: 11 jan. 2011.

XAVIER, A.C. **Estimativa de IAF de plantações de eucaliptos a partir de dados TM Landsat**. Anais IX SBSR, p. 1585-1596, Santos, 1998. Disponível em:

<http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.09.28/doc/2_164o.pdf>. Acesso em: 22 out 2012.

ANEXO

Tabela 18 - Pontos de controle para o georreferenciamento das imagens.

Pontos	Coordenadas UTM		Pontos de Controle/UTM/metros
	E	N	Descrição
P1	232.138	7.521.624	Passagem da Rod WL sobre o Rio Corumbataí
P2	233.551	7.519.999	Saída Oeste RC para a Rod. WL
P3	236.214	7.516.688	Canto direito sul da pista do aeródromo de RC
P4	239.312	7.513.833	Saída Sul de Santa Gertrudes para a Rod. WL
P5	241.837	7.515.825	Canto direito Sul do Lago da Usina
P6	240.386	7.519.161	Extremo Sul do Lago do Museu/FEENA
P7	236.632	7.520.729	Centro do prédio mais ao norte da estação férrea
P8	236.464	7.518.060	Cruzamento das ruas ao Norte do aeródromo

Fonte: Autor, por meio da: carta topográfica georreferenciada de Rio Claro.

Tabela 19 - Valor mínimo dos Números Digitais por banda

Ano	$ND_{mínimo}$ Banda 3	$ND_{mínimo}$ Banda 4
1985	14	16
1987	9	12
1989	8	11
1991	21	22
1993	8	10
1995	7	6
1997	8	13
1999	11	16
2001	9	14
2003	6	15
2004	11	21
2005	9	18
2007	10	14
2009	10	20
2011	13	16

Fonte: Autor, histograma das imagens no programa ENVI.

Tabela 20 - Valores mensal/anual da precipitação pluviométrica.

Pluviosidade Média Mensal/Anual região da FEENA														
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Anual	
Horto	1984	174,4	176,7	32,1	69,9	75,7	0,0	7,1	159,4	58,3	40,0	260,2	190,6	1244,4
	1985	293,8	104,0	240,2	183,3	55,2	32,3	0,0	25,8	60,0	17,9	108,3	113,1	1233,9
	1986	185,8	280,7	225,8	65,2	92,9	0,0	36,3	150,8	33,3	64,6	130,2	401,5	1667,1
	1987	314,8	180,2	82,7	74,4	201,5	47,5	17,7	7,3	104,8	122,7	200,6	239,2	1593,4
	1988	315,6	273,1	156,0	99,6	112,9	9,2	0,0	0,0	3,8	188,5	127,3	203,1	1489,1
	1989	270,4	453,1	172,9	40,4	78,3	70,8	92,1	16,7	90,2	65,0	137,7	370,6	1858,2
	1990	349,4	130,5	277,8	139,3	34,0	6,1	99,0	61,8	72,6	146,9	162,6	233,4	1713,4
	1991	150,6	236,1	512,0	173,4	49,4	21,1	18,7	0,0	88,5	121,1	96,5	332,5	1799,9
	1992	78,3	55,1	228,3	75,9	110,8	0,0	52,2	16,8	107,3	119,6	183,3	125,5	1153,1
	1993	307,5	404,5	99,4	95,0	67,3	37,9	8,2	37,9	239,8	103,8	134,0	196,6	1731,9
	1994	172,4	190,2	154,7	55,9	88,5	35,7	15,6	0,0	3,2	124,4	221,6	259,1	1321,3
CEAPLA	1995	313,6	506,1	173,3	132,0	47,6	0,0	25,5	0,7	13,6	136,0	105,9	205,3	1659,6
	1996	408,2	143,2	171,1	87,5	63,0	18,5	1,7	38,7	192,6	155,1	0,0	206,9	1486,5
	1997	263,3	101,4	58,2	30,1	91,2	230,8	29,8	2,0	62,9	96,2	286,7	206,1	1458,7
	1998	195,5	309,4	152,8	65,1	80,7	13,3	4,2	22,2	58,8	33,1	28,1	237,3	1200,5
	1999	485,2	335,6	0,0	56,6	34,4	80,3	0,7	0,0	100,3	50,8	77,6	169,7	1391,2
	2000	323,8	219,4	214,1	8,6	2,7	12,6	49,3	64,1	118,6	69,3	230,9	219,3	1532,7
	2001	110,8	236,0	102,6	33,1	61,5	11,6	13,3	56,1	78,3	182,6	70,2	230,3	1186,4
	2002	285,9	278,4	94,9	4,1	93,9	0,0	5,6	125,8	38,7	62,4	288,2	256,2	1534,1
	2003	411,2	113,3	96,9	42,3	27,8	15,6	3,5	16,3	25,6	109,2	229,0	227,5	1318,2
	2004	351,4	314,4	199,0	175,3	94,7	50,9	97,9	0,0	11,0	113,2	192,3	142,3	1742,4
	2005	482,2	72,6	167,5	32,6	93,6	48,1	3,9	19,3	81,1	97,7	142,5	175,5	1416,6
	2006	158,2	268,9	145,6	94,5	7,2	4,3	22,0	14,5	68,6	152,3	161,7	256,5	1354,3
	2007	364,9	183,3	123,9	41,1	62,2	15,5	168,8	0,0	0,6	134,7	119,7	218,6	1433,3
	2008	175,3	141,1	168,0	106,5	33,2	53,4	0,0	54,4	36,5	113,6	86,5	224,4	1192,9
	2009	286,6	225,3	157,8	25,3	43,4	28,7	42,9	85,0	131,3	116,8	168,2	332,3	1643,6
	2010	519,9	183,4	205,3	48,6	17,5	21,3	27,8	0,0	45,9	71,6	63,8	273,5	1478,6
	2011	569,2	241,5	203,5	196,1	10,9	41,5	1,6	9,6	18,0	222,6	188,3	193,9	1896,7
Média	287,0	226,5	163,4	76,1	67,4	32,1	31,3	36,1	71,3	104,0	148,7	231,4	1475,4	
DP	113,4	110,1	93,3	48,6	39,8	44,7	39,6	45,4	54,8	43,1	72,8	66,3	201,4	
CV	39,5	48,6	57,1	63,9	59,1	139,4	126,8	125,5	76,8	41,5	49,0	28,7	13,7	

Fonte: Autor, planilha eletrônica com dados do CEAPLA.

Tabela 21 - Coeficiente de definição das curvas de tendência da temperatura

Biênio	R ² do Polinômio de grau					
	1	2	3	4	5	6
1984/85	0,05	0,75	0,76	0,98	0,98	0,98
1986/87	0,03	0,69	0,72	0,89	0,93	0,96
1988/89	0,08	0,70	0,71	0,90	0,91	0,98
1990/91	0,06	0,49	0,53	0,81	0,83	0,83
1992/93	0,06	0,25	0,41	0,63	0,69	0,85
1994/95	0,01	0,73	0,73	0,93	0,95	0,98
1996/97	0,00	0,76	0,76	0,96	0,97	0,99
1998/99	0,01	0,75	0,75	0,89	0,92	0,96
2000/01	0,01	0,67	0,67	0,94	0,95	0,97
2002/03	0,00	0,58	0,59	0,88	0,88	0,92
2004/05	0,00	0,60	0,60	0,89	0,89	0,96
2006/07	0,00	0,61	0,61	0,88	0,90	0,97
2008/09	0,00	0,65	0,65	0,97	0,97	0,98
2010/11	0,00	0,60	0,60	0,89	0,89	0,97

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 - Discriminação do plantio na FEENA de 1909 a 1920

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
60	1909	2
57/59	1910	1.236
39-B/39-C/42/43/47/48/50/52/56-A	1011	4.224
54/2-R	1912	3.484
83-B	1913	2
45/58	1915	1.768
35-A/35-D	1916	540
103/119	1917	298
04-A/95/96-A/123	1018	206
1/2/3/5/7/9/10/13/17/27/28/97/03-A/17/89	1919	14.594
87-I/90/91/91-A/91-E/98	1920	209
	Total	26.563

Fonte: Autor, dados do Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 23 - Discriminação do plantio na FEENA de 1921 a 1930

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
106/120-A	1921	370
99/107	1922	144
102	1923	97
88	1925	82
104	1926	5.000
41	1927	581
Total		6.274

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 24 - Discriminação do plantio na FEENA de 1931 a 1940

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
44	1935	1.656
49	1937	105
1-R	1938	18
118/122	1939	2.370
55/63-B/94/109/110/110-A/111/112-A	1940	24.433
Total		28.582

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 25 - Discriminação do plantio na FEENA de 1941 a 1950

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
114/116/1-R/2-R	1941	14.905
11/12-A/14/99-A/114-A	1942	11.340
98	1943	3
123-A	1944	13
83-A/83-B/123-A/120-B	1945	20.326
119/120/120-A/123	1946	82.105
96-A/97/108-A/108-B	1947	10.513
87-H/91/91-A/91-F/91-G/91-H/91-I/122	1048	34.265
89	1949	43
36-A	1950	2.295
Total		175.808

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 26 - Discriminação do plantio na FEENA de 1951 a 1960

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
95/106/107	1951	31.976
3/10	1052	4.529
88-A/26/55-A/56/88/95-A	1954	28.220
39-B	1955	2.029
39/39-A	1956	4.412
4/4-A	1957	7.877
42/90	1960	1.595
Total		80.638

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 27 - Discriminação do plantio na FEENA de 1961 a 1970

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
89	1964	126
90	1965	1.623
51	1968	438
90	1969	358
89	1970	652
Total		3.197

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 28 - Discriminação do plantio na FEENA de 1971 a 1980

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
20/25-A/27-A/28/89	1971	11.105
17-A/19/22/27/89	1972	14.339
89	1973	285
89	1974	90
22-A/60/90/98/89	1975	17.090
89	1976	528
37	1979	7.013
Total		50.450

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 29 - Discriminação do plantio na FEENA de 1981 a 1990

Talhões	Ano/Plantio	Quantidade/1994
12/15/16/35/38/1-R	1983	91.268
29/31/32/33/34/35-B/35-C/36	1984	29.962
111	1987	9.923
2-R/7-R/9-R/12-R/13-R/14-R	1988	296.879
18/25/6-R/10-R/15-R/16-R/17-R	1989	324.539
109/18-R/19-R/20-R/21-R/22-R	1990	150.969
	Total	903.540

Fonte: Autor, Plano de Manejo FEENA de 2005.

Tabela 30 - Medidas estatísticas do NDVI na FEENA.

Classes	Frequência relativa do NDVI na FEENA (%)													
	1985	1987	1989	1991	1993	1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
(-1) - 0	0,7	0,6	0,1	1,4	0,0	0,1	0,7	0,4	0,7	1,6	0,5	0,5	0,8	0,3
0 - 0,1	1,2	0,5	0,3	0,6	0,1	0,3	0,4	0,2	0,4	2,1	0,3	0,5	0,3	0,5
0,1 - 0,2	1,8	0,6	5,2	1,1	0,2	0,4	0,7	0,5	0,8	2,2	0,4	0,5	0,5	1,0
0,2 - 0,3	3,7	1,5	3,3	2,9	0,3	0,7	1,7	1,4	1,5	3,3	1,1	1,2	1,7	2,3
0,3 - 0,4	6,1	3,5	6,0	4,4	1,0	1,2	2,7	3,0	3,1	4,2	2,4	2,7	3,6	2,8
0,4 - 0,5	7,1	5,4	6,4	7,3	2,6	2,5	5,0	6,1	4,4	5,3	5,3	5,2	6,6	4,8
0,5 - 0,6	8,1	5,8	7,0	9,2	5,1	4,2	7,2	10,3	5,2	6,7	7,7	6,2	8,4	5,7
0,6 - 0,7	20,3	19,2	20,0	26,8	19,1	30,9	29,8	33,5	15,9	19,3	29,5	15,2	26,2	16,5
0,7 - 0,8	40,8	46,5	39,4	37,1	51,2	52,4	46,1	37,6	48,3	34,6	47,6	44,0	40,6	50,4
0,8 - 0,9	10,1	16,3	12,0	8,2	20,2	15,5	5,7	6,9	19,0	20,1	5,3	23,6	11,1	15,3
0,9 - 1	0,1	0,1	0,2	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7	0,7	0,0	0,2	0,2	0,5
Média	0,65	0,67	0,65	0,65	0,69	0,70	0,68	0,66	0,70	0,65	0,67	0,70	0,66	0,69
DP	0,19	0,16	0,21	0,19	0,13	0,129	0,15	0,14	0,17	0,22	0,14	0,15	0,17	0,16
CV(%)	29	24	32	29	19	17	22	22	24	33	21	21	25	23

Fonte: Autor, histograma do NDVI