

DETECÇÃO DE MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Marvin de Almeida Correa (UFF, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: marvincorrea.geo@gmail.com

Daniel Andrés Rodriguez (CCST/INPE, Orientador)
E-mail: daniel.andres@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Félix Carriello (GAG/UFF)
E-mail: felix-carriello@vm.uff.br

Julho de 2017

RESUMO

O município de São Luiz do Paraitinga está inserido na microrregião do Paraibuna e Paraitinga no Alto Vale do Paraíba Paulista, neste município desde a década de 1970 vêm sendo observado a expansão acelerada das áreas de cultivo de eucalipto o que têm gerado uma série de impactos socioambientais. Nesse contexto o presente trabalho, iniciado em janeiro de 2017, teve como objetivo a análise da dinâmica de expansão da monocultura do eucalipto no município entre os anos 2000 e 2015 através de técnica de detecção de mudanças do uso e cobertura do solo. As Técnicas de detecção de mudanças no uso e cobertura do solo são metodologias de monitoramento do conjunto de mudanças ambientais e socioeconômicas que ocorrem ao longo do tempo em uma determinada região do globo terrestre a partir de dados multitemporais (KIEL, 2008). Os dados multitemporais utilizados foram imagens de diferentes datas dos sensores TM e OLI a bordo de satélites da missão Landsat. A partir das técnicas de processamento digital de imagens, estes dados foram processados e analisados de forma a permitir reconstituição da dinâmica de expansão da cultura de eucalipto ao longo dos 15 anos da série temporal. As etapas de trabalharam consistiram em: I- Geração de imagens NDVI para todos os anos da série; II- Seleção e classificação de imagem NDVI referência; III- Aplicação nas imagens NDVI do algoritmo de detecção de mudanças e extração dos polígonos referentes as áreas de mudança; IV- Cruzamento entre os resultados das etapas anteriores. Como resultado constatou-se a expansão da área de cultivo de eucalipto entre os anos 2000 e 2015, com crescimento da área cultivada estimada em aproximadamente 20%. O período de menor expansão da cultura foi entre os anos 2000 e 2005 e o de maior expansão entre os 2005 e 2010. O período de 2010 a 2015 demonstrou uma considerável redução na taxa de crescimento do cultivo de eucalipto, o que pode estar relacionado a restrições judiciais provenientes de ações como a Ação Civil Pública de 2007 movida contra as empresas atuantes no município.

Palavras-chave: Eucalipto. Processamento Digital de Imagens. Detecção de mudanças.

ABSTRACT

The municipality of São Luiz do Paraitinga is part of the Paraibuna and Paraitinga microregion located in the Alto Vale do Paraíba Paulista. Since the 1970s the accelerated expansion of eucalyptus cultivation has been generating socio-environmental impacts in this municipality. In this context, the present research, started in January 2017, intends to analyze the dynamics of eucalyptus monoculture's expansion in São Luiz do Paraitinga between 2000 and 2015 through change detection techniques. Change detection techniques are monitoring methodologies of the set of environmental and socioeconomic changes that occur over time in a given region based on multiple data (KIEL, 2008). The multitemporal data used in this research were different data images acquired by TM and OLI sensors aboard the Landsat satellites. Digital image processing techniques were used to process and analyze this images in order to allow the reconstitution of eucalyptus monoculture's expansion over the 15 years of time series. The following work steps were employed: I- Generation of NDVI images; II- Selection and classification of a NDVI image reference; III- Application in the NDVI images of the change detection algorithm and extraction of polygons referring as areas of change; IV- Crossing between the results of the previous steps. As result, was found an estimated expansion of 20% of the eucalyptus planted areas between 2000 and 2015.

Keywords: Eucalyptus. Digital Image Processing. Change detection.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 – Mapa de localização.....	5
Figura 2 – Participação dos setores no PIB municipal.....	6
Figura 3 – Fluxograma de etapas de trabalho.....	11
Figura 4 – Polígonos de mudança.....	15
Figura 5 – Proporção de área ocupada por classe.....	18

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1 – Característica dos sensores.....	7
Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos algoritmos.....	9
Tabela 3 – Data de aquisição das imagens utilizadas.....	10
Tabela 4 – Área (ha), Variação de Área (%) e Variação Total de Área (%) para classe Eucalipto.....	16
Tabela 5 – Proporção de área (%) por classe.....	17

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	7
3.1 Base de Dados.....	7
3.2 Etapas de Trabalho.....	10
3.2.1 Geração das imagens NDVI.....	11
3.2.2 Classificação da imagem NDVI referência.....	12
3.2.3 Detecção de Mudanças.....	14
3.2.4 Cruzamento dos resultados da classificação.....	15
4 RESULTADOS.....	16
5 CONCLUSÃO.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

1. INTRODUÇÃO

Desde a formação dos primeiros núcleos de povoamento na região do Vale do Paraíba Paulista, iniciada por volta do séc. XVII, nota-se a exploração econômica do solo através do desenvolvimento de atividades essencialmente agroexportadoras, os diferentes modos de uso e ocupação do território ao longo do tempo foram responsáveis por significativas alterações na dinâmica ambiental da região. A Floresta Atlântica antes predominante na paisagem se restringe hoje a pequenos fragmentos espalhados ao longo da extensa planície do Vale e nas encostas da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira. Conforme destaca Lima (2015) a exploração predatória do solo, especialmente durante o ciclo do café (Séc. XVII ao séc. XIX) e durante a introdução da pecuária extensiva (Séc. XX) na região, levou a uma significativa perda de fertilidade, exaurindo-o em muitas localidades, o que acarretou na estagnação produtiva de algumas áreas. Sato et al. (2007), enfatiza ainda os impactos sobre a dinâmica hidrológica regional devido ao enraizamento raso da pastagem de braquiárias para alimentação do gado e à escavação das formigas saúva (gênero *Atta*), gerando significativas descontinuidades hidrológicas principalmente nas áreas de encostas.

É nesse quadro de degradação ambiental que a partir da década de 1970 tem início em muitos municípios do Vale do Paraíba Paulista a atividade de cultivo comercial do eucalipto. Hoje, o cultivo comercial desse gênero se encontra difundido em praticamente toda a região, concentrando-se especialmente nos municípios de Natividade da Serra, Silveiras, São Luiz do Paraitinga, Lagoinha, Taubaté, Pindamonhangaba, Paraibuna e São José dos Campos. Duas grandes empresas foram responsáveis pelos esforços iniciais de expansão da atividade na região, as empresas Suzano Papel e Celulose S.A. e a Votorantim Celulose e Papel (Fundida a Aracruz Celulose S.A. em 2009, formando a Fibria Celulose S.A.), estas e outras empresas atuam ainda hoje nos municípios através de terras particulares e a partir de parcerias com produtores rurais locais, por meio de arrendamento de terras, fomento e outras modalidades de investimento (JUNIOR, 2011).

Junior (2011), indica as condições primordiais que permitiram a inserção e desenvolvimento da cultura comercial de eucalipto no Vale do Paraíba Paulista:

- Infraestrutura viária e industrial instalada adequada à produção E comercialização da matéria-prima e dos derivados de eucaliptos;
- Amplo espaço territorial ocupado com formações vegetais abertas, como as pastagens, possibilitando a substituição por plantios de eucaliptos;
- Extensas áreas rurais subaproveitadas e desvalorizadas;
- Áreas rurais pouco povoadas, caracterizadas por grandes “vazios demográficos”;
- Condições climáticas propícias ao desenvolvimento das árvores, com temperaturas elevadas, sem ocorrência de geadas, e chuvas bem distribuídas durante o ano;
- Municípios estagnados economicamente, com baixo investimento em outros setores produtivos;
- Política de incentivos fiscais difundida na região;
- Proximidade com grandes centros econômicos, possibilitando a rápida ligação entre as áreas de cultivo e os locais de consumo;
- Proximidade entre as áreas de cultivo e as plantas industriais.

Em São Luiz do Paraitinga o plantio do eucalipto destinou-se principalmente a produção da pasta de celulose, o quadro que se desenhou a partir da década de 1970 em diante foi o de constante expansão da atividade, ocupando áreas da zona rural do município e incrementando consideravelmente sua participação na economia local. Segundo dados do Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA, 2008) entre as safras de 1995/96 e 2007/08 a área cultivada no município cresceu 42%, expandindo de 5.527 ha para 7.836 ha. Esse processo de expansão, no entanto, veio acompanhado de impactos das mais diversas ordens relatados a partir de denúncias de crimes ambientais e impactos sociais. Discussões sobre os limites da utilização de propriedades rurais no plantio do eucalipto em detrimento de outros modos de utilização da terra tomam força à medida que a monocultura se expande aproximando-se

inclusive da zona urbana do município. Dados analisados por Oliveira (2011) demonstraram um quadro geral de retração ou estagnação produtiva de gêneros alimentícios ao longo das duas últimas décadas, onde, apesar da influência de fatores estruturais e conjunturais, parece estar associado ao processo de expansão das áreas de cultivo de eucalipto.

Questões como aumento do desemprego no campo, êxodo rural, conflitos socioculturais e infrações ambientais (como cultivo inapropriado em áreas de proteção permanente) vêm sendo apontadas como consequências diretas da atividade e motivaram em 2007 a abertura de uma Ação Civil Pública (ACP) movida pela Defensoria Pública de Taubaté contra as duas principais empresas atuantes na região, a Suzano Papel e Celulose S/A e a Votorantim Celulose e Papel (Atual Fibria), e as esferas municipal e estadual por sua omissão na fiscalização da atividade e flexibilidade na abertura de novos empreendimentos, como a ausência de Estudos de Impacto Socioambiental e Relatórios de Impacto Ambiental (EIA/RIMA).

Neste quadro de mudança do uso e cobertura do solo, expresso pela acelerada expansão da monocultura de eucalipto, o uso de técnicas de processamento digital de imagens permite a extração de informações, sua qualificação e quantificação, de maneira ágil possibilitando assim o monitoramento dessas mudanças por meio das chamadas técnicas de detecção de mudanças. As técnicas de detecção de mudanças são metodologias de monitoramento do conjunto de mudanças ambientais e socioeconômicas ocorridas ao longo do tempo em uma determinada região do globo terrestre (KIEL, 2008), a partir de dados multitemporais (SINGH, 1989). Dentro deste rol de técnicas a superfície da Terra é representada por um conjunto de unidades espaciais (classes) associadas, cada uma, a um atributo.

Considerando o quadro descrito, o presente trabalho teve como objetivo a análise da dinâmica de expansão da monocultura do eucalipto no município de São Luiz do Paraitinga entre os anos 2000 e 2015 a partir do uso de técnica de detecção de mudanças do uso e cobertura do solo. Este objetivo foi alcançado a partir de objetivos específicos como a mensuração das áreas de plantio de eucalipto para cada ano da série temporal, o cálculo das taxas de

expansão dessas áreas e o cálculo da proporção de área ocupado por esses plantios em relação as demais classes de uso e cobertura do solo.

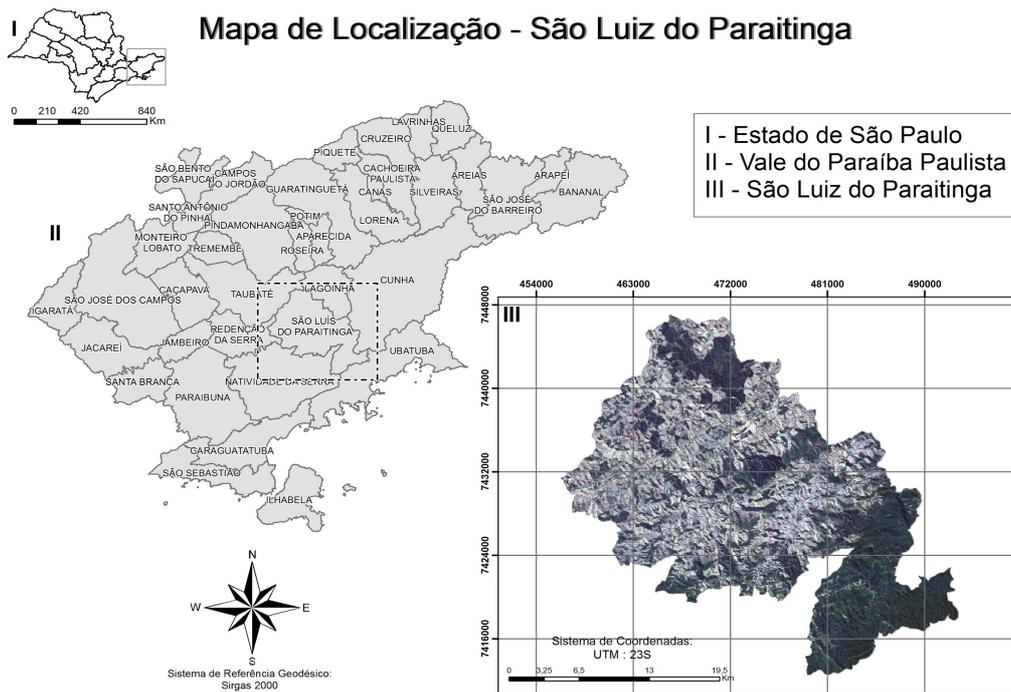
A metodologia empregada consistiu na construção de uma série histórica com imagens Landsat TM e Landsat OLI, estas imagens foram processadas através de técnicas de processamento digital de imagens seguindo as seguintes etapas: I- Geração de imagens NDVI para todos os anos da série; II- Seleção e classificação de imagem NDVI referência; III- Aplicação nas imagens NDVI do algoritmo de detecção de mudanças e extração dos polígonos referentes as áreas de mudança; IV- Cruzamento entre os resultados das etapas anteriores.

A escolha do município de São Luiz do Paraitinga como área de estudo se deu em função da intensidade com que o processo de expansão da cultura de eucalipto vêm se desenvolvendo localmente e os inúmeros impactos observados no município que resultaram no imbróglio judicial entre empresas, população e poder público. A área com 617,315 Km² está compreendida na microrregião do Paraibuna e Paraitinga no Alto Vale do Paraíba Paulista, região de domínio do Bioma da Mata Atlântica.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Luiz do Paraitinga (Figura 1) localiza-se na latitude 23° 13' 18" sul e longitude 45° 18' 36" oeste (Coordenada geográfica pontual) com altitude média de 741 metros. Está inserido na microrregião do Paraibuna e Paraitinga no Alto Vale do Paraíba Paulista, Estado de São Paulo. Os municípios limítrofes são: Lagoinha ao norte, Taubaté a noroeste, Cunha a nordeste, Redenção da Serra a oeste, Natividade da Serra a sudoeste e Ubatuba a sudeste.

Figura 1 – Mapa de localização

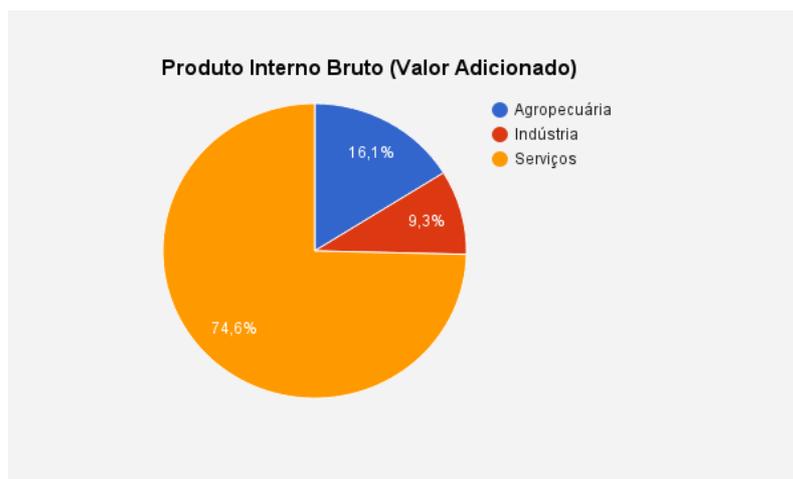


Fonte: Produção do autor

O município possui população estimada em 10.397 habitantes (IBGE, 2010) distribuídos em uma faixa territorial de 617,315 Km² e em caráter de transição entre o rural e o urbano, dados do censo demográfico de 2010 (IBGE), apontaram uma proporção de 59% da população residente na área urbana e 41% da população residente na área rural.

A economia da região se divide entre os setores da agropecuária, indústria e serviços, tendo o setor de serviços maior contribuição para o PIB municipal, seguido pelos setores da agropecuária e serviços conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Participação dos setores no PIB municipal



Fonte: IBGE, 2010.

Em termos de geografia física o município está estabelecido sobre o Planalto do Paraitinga/Paraibuna, que compõe uma das unidades geomorfológicas da Província do Planalto Atlântico. A geomorfologia da região se caracteriza pela presença de áreas serranas, cuja feição paisagística dominante é a do mar de morros. A amplitude altimétrica é variável, diminuindo gradativamente dos divisores de água para os vales principais, onde as serras dão lugar a morros e, estes, a morrotes e colinas (MORELLI, 2002 apud MELLO, 2009).

Quanto à hidrografia destaca-se o fato do município ser cortado por dois rios principais, o rio Paraitinga que nasce na Serra da Bocaina, considerado a principal nascente do rio Paraíba do Sul e o rio Paraibuna, além destes destacam-se os rios Turvo, Chapéu e o ribeirão da Cachoeirinha.

O município se localiza em uma região de domínio do Bioma da Mata Atlântica, apesar da pouca cobertura nativa original remanescente, cuja fitofisionomia predominante é considerada de transição entre a floresta ombrófila densa nas encostas e estacional semidecidual no interior (CANTINHO ET AL. 2011). A floresta está fortemente concentrada na porção sudeste do município, onde se localiza o Núcleo Santa Virgínia do Parque Estadual da Serra do Mar, no restante do município se observa o predomínio de pastagens que ocupam mais de 50% da paisagem (MELLO, 2009). O clima da região é temperado úmido com inverno seco segundo a classificação

climática de Köppen-Geiger apresentando índice pluviométrico anual de 1.300 mm.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Base de Dados

Para o presente trabalho foram utilizadas imagens dos sensores Landsat Thematic Mapper (TM) e Operational Land Imager (OLI) a bordo nos satélites Landsat 5 e Landsat 8 respectivamente. Ambos sensores permitem a aquisição de imagens multiespectrais com resoluções espaciais que variam de 15 a 120 metros e cenas com tamanho aproximado de 170 km na direção norte-sul e 183 km na direção leste-oeste. O sensor Thematic Mapper (TM) funciona com sete bandas espectrais e o Operational Land Imager (OLI) com 9 bandas espectrais, as informações sobre as faixas espectrais utilizadas por sensor e suas respectivas resoluções estão contidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos sensores

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução				Faixa Imageada
		Espectral	Radiométrica	Espacial	Temporal	
TM	1	0,45 - 0,52 μm	8 Bits	30 m	16 dias	170x183 km
	2	0,50 - 0,60 μm				
	3	0,63 - 0,69 μm				
	4	0,76 - 0,90 μm		120 m		
	5	1,55 - 1,75 μm				
	6	10,4 - 12,5 μm		30 m		
	7	2,08 - 2,35 μm				
OLI	1	0,433 - 0,453 μm	12 Bits	30 m	16 dias	170x183 km
	2	0,45 - 0,515 μm				
	3	0,525 - 0,60 μm				
	4	0,63 - 0,68 μm				
	5	0,845 - 0,885 μm				
	6	1,56 - 1,66 μm				

	7	2,1 - 2,3 μm				
	8	0,50 - 0,68 μm		15 m		
	9	1.36 - 1.38 μm		30 m		

Fonte: USGS

O sensor TM esteve em operação entre julho de 1982 a maio de 2012, com ciclo de revisita a cada 16 dias, enquanto que o sensor OLI começou sua operação em fevereiro de 2013, com mesmo ciclo de revisita, estando ainda em atividade.

As imagens utilizadas no presente trabalho foram obtidas a partir do sítio EarthExplorer, pertencente a United States Geological Survey (USGS), no sítio estão disponíveis os dados das missões Landsat bem como de outras missões. Em seu catálogo estão disponíveis dados com diferentes níveis de processamento destinados a análises de séries temporais, para tanto o inventário de dados do sítio está estruturado segundo a qualidade e nível de processamento dos dados.

Considerando a natureza do trabalho realizado que demanda o uso de série histórica de imagens, geométrica e radiometricamente corrigidas e alinhadas, optou-se pela utilização de dados de reflectância de superfície Level-1, Tier 1 (T1). Estes dados possuem o mais alto nível de qualidade disponível como, alto nível de caracterização radiométrica, calibração entre os distintos sensores das missões Landsat e ajuste geométrico entre imagens. As imagens Level-1, Tier 1 do catálogo da USGS utilizadas apresentam georreferenciamento e ortorretificação gerados a partir do sistema de processamento Level-1 Product Generation System (LPGS), que garante erro estimado (RMSE) abaixo de 0,5 pixel, considerado suficiente para que os erros não afetem os dados (Cohen, 2007 apud Cronemberger, 2014). Além disso todas as imagens convertidas para reflectância de superfície são disponibilizadas pela USGS com resolução radiométrica padrão de 16 bits.

Os dados de reflectância de superfície são obtidos a partir do processamento das imagens através da aplicação de algoritmos desenvolvidos para cada sensor, para os produtos Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) e

Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) a USGS utiliza o algoritmo Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) enquanto que para o Landsat 8 OLI utiliza o algoritmo Landsat 8 Surface Reflectance Code (LaSRC). Os códigos do projeto estão hospedados no sítio do GitHub, disponível para pesquisadores e interessados no desenvolvimento de softwares e aplicações. As diferenças de parâmetros utilizados entre os dois algoritmos é detalhada na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos algoritmos

Parâmetros	Algoritmo	
	LEDAPS	LaSRC
(Original) research grant	NASA GSFC, MEaSURES (Masek)	NASA GSFC
Global coverage	Yes	Yes
TOA (Top Of The Atmosphere)	Visible (1–5,7) + Brightness temp (6) bands	Visible (1–7, 9) + Thermal (10–11) bands
SR	Visible (1–5, 7) bands	Visible (1–7) bands (OLI/TIRS only)
Radiative transfer model	6S	Internal algorithm
Thermal correction level	TOA only	TOA only
Thermal band units	Kelvin	Kelvin
Pressure	NCEP Grid	Surface pressure is calculated internally based on the elevation
Water vapor	NCEP Grid	MODIS CMA
Air temperature	NCEP Grid	MODIS CMA
DEM	Global Climate Model DEM	Global Climate Model DEM
Ozone	OMI/TOMS	MODIS CMG Coarse resolution ozone
AOT	Correlation between chlorophyll absorption and bound water absorption of scene	MODIS CMA
Sun angle	Scene center from input metadata	Scene center from input metadata
View zenith angle	From input metadata	Hard-coded to 0
Undesirable zenith angle correction	SR not processed when solar zenith angle > 76 degrees	SR not processed when solar zenith angle > 76 degrees
Pan band processed?	No	No
XML metadata?	Yes	Yes

Brightness temperature calculated	Yes (Band 6 TM/ETM+)	Yes (Bands 10 & 11 TIRS)
Cloud mask	Internal algorithm; CFmask	Internal algorithm; CFmask
Data format	INT16	INT16
Fill values	-9999	-9999
QA bands	Cloud, Adjacent cloud, Cloud shadow, DDV, Fill, Land water, Snow, Atmospheric opacity	Cloud, Adjacent cloud, Cloud shadow, Aerosols, Cirrus, Aerosol Interpolation, Flag

Fonte: USGS

A disponibilidade de dados com alto nível de processamento permite a economia de tempo e custo, principalmente em softwares de processamento de imagens, para o pesquisador, além de se tratar de uma fonte segura e qualificada. Para o presente trabalho foram selecionadas e baixadas quatro datas referentes a uma mesma cena, a cena em questão é representada pela órbita 218 e ponto 076 que engloba a totalidade do Vale do Paraíba Paulista. As datas escolhidas foram 21 de agosto de 2000, 3 de agosto de 2005, 2 de setembro de 2010 e 31 de agosto de 2015. As imagens dos anos 2000, 2005 e 2010 são provenientes do sensor Thematic Mapper (TM) e as imagens do ano 2015 são provenientes do sensor Operational Land Imager (OLI) (Tabela 3). A escolha de datas próximas e da mesma época do ano se deu em função da atenuação de variações climáticas, fenológicas, de iluminação e diferenças na umidade do solo, buscou-se dessa forma a escolha de datas compreendidas em um período seco (maio a setembro).

Tabela 3 – Datas de aquisição das imagens utilizadas

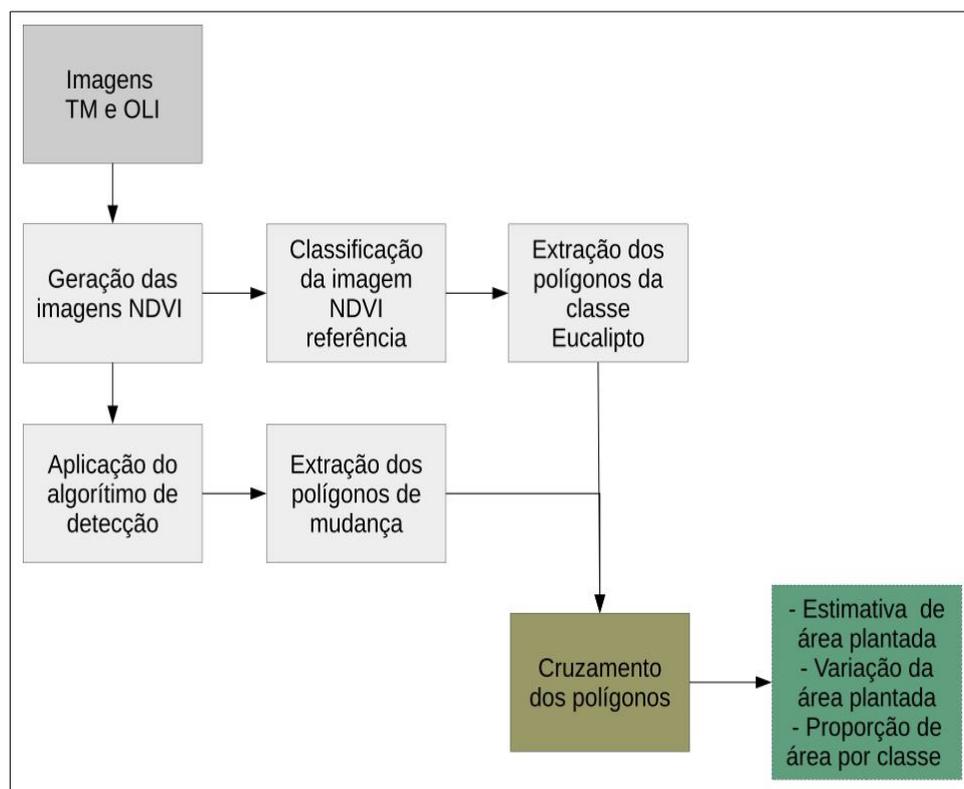
Cena	Sensor	Data
218/ 076	TM	21/08/2000
		03/08/2005
		02/09/2010
	OLI	31/08/2015

Fonte: Produção do autor

3.2 Etapas de trabalho

Para alcançar os objetivos propostos pelo presente trabalho foram seguidas as etapas de trabalho expressas na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de etapas de trabalho



Fonte: Produção do autor

Considerando a natureza dos dados de sensoriamento remoto utilizados não foi necessária a execução da etapa de pré-processamento das imagens uma vez que as mesmas já foram adquiridas com todos os níveis de ajuste necessários, a saber, correções geométrica, atmosférica e radiométrica e valores de ND convertidos para valores físicos. Optou-se também pela não normalização radiométrica das imagens por se considerar o nível de adequação radiométrica entre as imagens satisfatório e ao mesmo tempo para não comprometer a qualidade dos dados originais baixados no site da USGS.

3.2.1 Geração das imagens NDVI

Seguindo a bibliografia pesquisada e buscando maior qualidade na extração de informações foi realizada a transformação radiométrica das imagens através do uso de um índice de vegetação. O índice de vegetação utilizado foi o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de Rouse et al. (1974), a escolha deste índice se deu em função de seu frequente uso em estudos da vegetação, demonstrando ser eficiente ferramenta para monitoramento da vegetação ao permitir a construção de perfis sazonais e temporais, sendo utilizado na detecção de atividades fenológicas, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência (PONZONI et al., 2012).

O índice foi gerado para cada ano a partir da ferramenta de transformação NDVI presente no software ENVI 5.3 ®, esta ferramenta realiza a operação respeitando a Equação 1.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

3.2.2 Classificação da imagem NDVI referência

Essa etapa de trabalho consistiu na seleção e classificação de uma imagem NDVI referência. A imagem NDVI escolhida foi a do ano de 2015 por representar o último estado de evolução da cultura de eucalipto dentro da série temporal.

Antes da etapa de classificação foi realizada a segmentação da imagem NDVI referência, para este fim foi utilizado o algoritmo *Segment Mean Shift* disponibilizado como ferramenta no software ArcGIS 10.5®. Este algoritmo identifica segmentos na imagem por meio do agrupamento de pixels adjacentes que apresentem similaridade espectral. Para realização da segmentação o algoritmo permite a definição de valores para três parâmetros de controle:

- Detalhe espectral (Spectral Detail) - Determina o nível de importância dado para as diferenças espectrais contidas em cada pixel da imagem. Na prática, quanto maior o valor deste parâmetro (dentro do intervalo de

- 1 a 20) maior será a discriminação espectral entre os segmentos;
- Detalhe Espacial (Spatial Detail) - Determina o nível de importância dado a proximidade entre os segmentos, isso significa que valores altos deste parâmetro implicam em maior discriminação espacial entre alvos;
 - Tamanho mínimo dos segmentos (Minimum Segment Size) - Une segmentos menores do que definido no parâmetro. Realiza a aglomeração de segmentos que apresentem um número mínimo de pixels determinado pelo operador.

A escolha dos valores dos parâmetros foi realizada a partir de testes que determinaram os melhores resultados para segmentação, os valores escolhidos foram 20 para o parâmetro detalhe espectral; 20 para o parâmetro detalhe espacial e 30 para o parâmetro tamanho mínimo.

A etapa de segmentação foi seguida da etapa de classificação dos segmentos segundo as classes eucalipto e não-eucalipto. A escolha dessas duas classes considera o objetivo do trabalho em mapear as áreas onde há ocorrência de plantio de eucalipto, optou-se portanto por isolar estas áreas separando-as das demais classes de uso e cobertura do solo (Corpo hídrico, solo, urbano, etc.).

Para classificação da imagem NDVI referência segmentada foi utilizado o algoritmo *Maximum Likelihood Classification* também disponibilizado como ferramenta no software ArcGIS 10.5®. Para classificação dos segmentos a ferramenta considera tanto as variâncias quanto as covariâncias das assinaturas espectrais das classes ao atribuir cada célula da matriz a uma das classes representadas pelas amostras selecionadas pelo operador. Com o pressuposto de que a distribuição de uma amostra de classe é normal, uma classe pode ser caracterizada pelo vetor médio e a matriz de covariância, dessa forma, considerando estas duas características para cada valor de célula a probabilidade estatística é calculada para cada classe determinando a associação de cada célula às classes (ESRI, 2017).

Na etapa de coleta de amostras foram selecionadas 30 amostras para cada classe. Após a coleta foram realizados testes de classificação onde foram

avaliados os resultados e a capacidade do algoritmo em detectar de forma satisfatória as áreas de eucalipto. Ao todo foram realizados três testes, onde, a cada teste buscava-se refinar o conjunto de amostras para obtenção de melhores resultados. Ao final dos testes foi selecionado o conjunto de amostras que proporcionou resultado mais satisfatório quando comparado a imagens de maior resolução espacial, esta comparação foi realizada visualmente com auxílio do software Google Earth®.

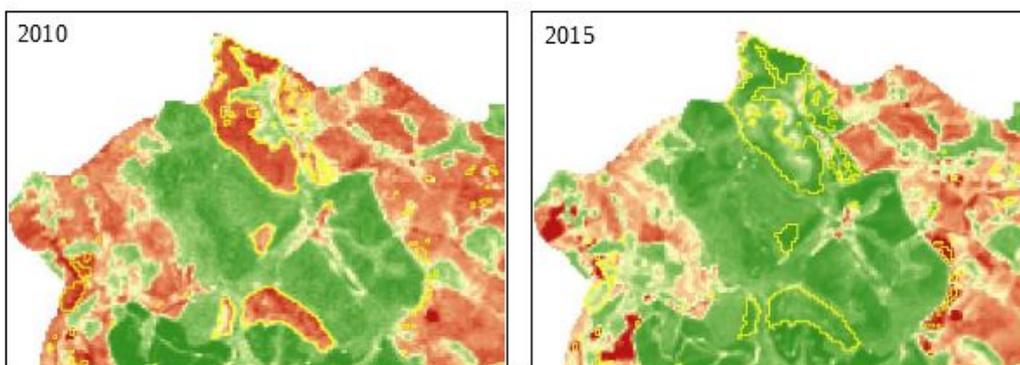
Após as etapas de segmentação, seleção de amostras e classificação foi gerada a imagem classificada contendo as classes de interesse eucalipto e não-eucalipto. Por falta de dados de campo e da disponibilidade de imagens de alta resolução gratuitas para a área de estudo recorreu-se a validação visual da classificação a partir do software Google Earth®. Apesar de se tratarem de imagens sem o nível apropriada de correções radiométrica e geométrica estas foram cruzadas com os resultados da classificação e serviram como base de comparação para os resultados da classificação.

3.2.3 Detecção de Mudanças

A partir das imagens NDVI foi realizada a detecção de mudanças fazendo uso da técnica de subtração de imagens. Desta forma, da imagem NDVI referência (2015) foram subtraídas as imagens NDVI dos anos 2010, 2005 e 2000. Como resultado foram geradas imagens detecção (ou imagens diferença) correspondentes aos períodos 2000-2015, 2005-2015 e 2010-2015. Foi necessário determinar um limiar para identificação das áreas de mudança. A determinação do limiar se deu a partir do conhecimento prévio do comportamento esperado dos histogramas das imagens detecção onde os valores de não mudança tendem a concentrar-se em torno da média, enquanto que os valores de mudança tendem a concentrar-se nas pontas do histograma (KIEL, 2008). Dessa forma, buscou-se através do uso dos indicadores estatísticos média e desvio padrão a determinação, no histograma das imagens, dos intervalos de valores correspondentes as áreas de mudança, definidos a partir de sua proximidade a média considerado o desvio padrão.

A ferramenta de manipulação de histogramas contida no ArcGIS 10.5® define valores de desvio padrão no histograma da imagem segundo sua ordem de confiança. Como resultado dos testes executados foi escolhido como limiar o intervalo de menor confiança estatística uma vez que o mesmo se mostrou adequado ao objetivo da pesquisa, a saber, considerar como mudança somente os pixels que contidos dentro das áreas de cultivo de eucalipto representassem na série temporal a relação de evolução temporal não-eucalipto > eucalipto. Determinado o limiar de mudança, foi realizada a extração dos polígonos de mudança para cada imagem. A Figura 2 ilustra os resultados do limiar escolhido bem como da extração dos polígonos de mudança para o período 2010-2015, demonstrando o comportamento de mudança esperado entre os dois anos.

Figura 4 – Polígonos de mudança



Fonte: Produção do autor

3.2.4 Cruzamento dos resultados da classificação

Realizada a classificação da imagem NDVI referência e geradas as imagens detecção foi feito o cruzamento entre os resultados obtidos de forma a permitir a estimativa de área plantada para cada ano da série temporal. Para este fim foi necessária extração dos polígonos referentes a classe eucalipto na imagem NDVI referência classificada e dos polígonos referentes as áreas de mudança nas imagens detecção. Através deste procedimento objetivou-se primeiro isolar no ano final da série as áreas com cultivo de eucalipto (dentro

da série temporal o ano de 2015 representa o estado final de evolução da cultura sendo portanto o parâmetro de comparação para os demais anos) e em seguida isolar nas imagens diferença somente os polígonos referentes as áreas de mudança, criando assim, através do cruzamento desses dois polígonos a relação de evolução temporal: não-eucalipto > eucalipto. A partir da subtração dos polígonos de mudança dos polígonos de eucalipto da imagem referência classificada (2015) foram gerados polígonos representativos das áreas de eucalipto para os anos 2010, 2005 e 2000. A partir dos polígonos de eucalipto da imagem referência e dos novos polígonos de eucalipto gerados foram calculadas as áreas e taxas de variação de área ao longo da série temporal. Por fim, a partir do cruzamento entre a área total do município e das áreas de cultivo de eucalipto foram calculadas as proporções por classes para cada ano da série.

4. RESULTADOS

Ao final das etapas de trabalho foram gerados os dados referentes a expansão da área de cultivo de eucalipto para os anos 2000, 2005, 2010 e 2015. Estes dados foram divididos em três conjuntos: a) Valores de área para cada ano da série temporal; b) Variação de área para cada ano em relação ao ano seguinte da série; c) Variação total da área em relação ao primeiro e último anos da série temporal. Foram determinadas também as proporções de área de cultivo de eucalipto em relação as demais classes de uso e cobertura (Classe não-eucalipto) para cada ano da série.

Tabela 4 – Área (ha), Variação de Área (%) e Variação Total de Área (%) para classe Eucalipto

Ano	a) Área (ha)	Período	b) Variação de Área (%)	Período	c) Variação total de Área (%)
2015	3432,51	2010-2015	5,66	2000-2015	19,96
2010	3238,47	2005-2010	13,20		
2005	2811,15	2000-2005	2,27		
2000	2747,61				

Fonte: Produção do autor

A análise da Tabela 1 demonstra o crescimento contínuo da área de cultivo de eucalipto entre os anos 2000 e 2015, esse crescimento no entanto não se deu de forma contínua variando significativamente entre os períodos 2000-2005, 2005-2010 e 2010-2015. O período 2010-2015 apresenta como característica a redução da variação de área indicando redução na taxa de expansão da cultura de eucalipto para este período. Por sua vez o período 2005-2010 apresenta a maior taxa de variação de área indicando maior taxa de expansão da cultura de eucalipto para este período. A variação total de área, calculada entre o primeiro ano da série (2000) e o último ano da série (2015), indica taxa considerável de expansão sendo essa variação de aproximadamente 20% para um período de 15 anos.

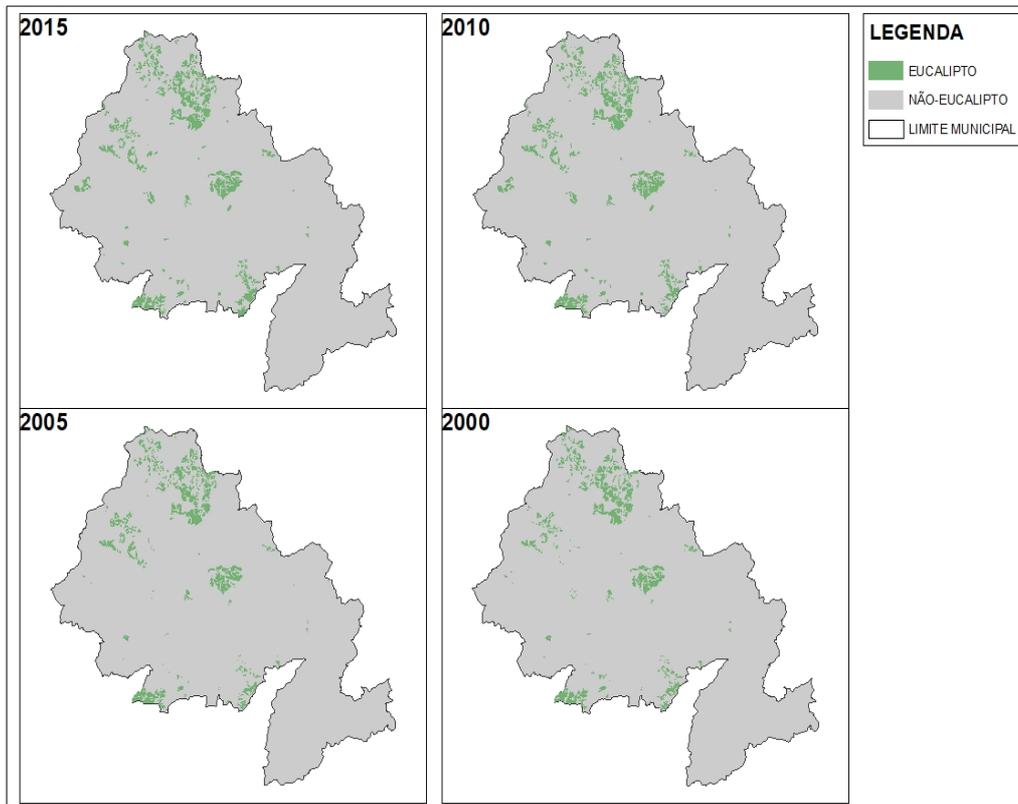
Tabela 5 – Proporção de área (%) por classe

Ano	Proporção de Área por Classe	
	Eucalipto (%)	Não-Eucalipto (%)
2015	5,57	94,43
2010	5,26	94,74
2005	4,56	95,44
2000	4,46	95,54

Fonte: Produção do autor

A Tabela 2 demonstra a proporção em termos de área ocupada para as classes Eucalipto e Não-Eucalipto. A análise dos resultados reforça o cenário observado na Tabela 1 de expansão da cultura de eucalipto, essa expansão é indicada pelo aumento, ao longo da série temporal, da proporção da classe Eucalipto em relação a classe Não-Eucalipto. A área total calculada para o município é de 61683,30 ha, desse total a proporção de área ocupado ao longo dos 15 anos da série temporal é de aproximadamente 5% para classe Eucalipto e 95% para as demais classes de uso e cobertura do solo representadas pela classe Não-Eucalipto.

Figura 5 – Proporção de área ocupada por classe



Fonte: Produção do autor

5 CONCLUSÃO

O objetivo traçado pelo presente trabalho foi alcançado a partir da metodologia empregada. Os resultados obtidos confirmam o quadro de expansão da monocultura de eucalipto sobre o município de São Luiz do Paraitinga no período analisado, essa constatação vai ao encontro dos relatos sobre o avanço dessa atividade sobre as demais atividades agropecuárias.

Um importante comportamento observado é a alta taxa de expansão da cultura de eucalipto entre os anos 2000 e 2010 seguido de considerável redução dessa taxa no período compreendido entre 2010 e 2015. Essa mudança de comportamento das taxas de expansão pode estar relacionada a pressão exercida pela abertura da Ação Civil Pública (ACP) movida pela Defensoria Pública de Taubaté contra as principais empresas na região no de

ano 2007. Embora não se possa afirmar com certeza, os resultados demonstram uma possível relação entre os dois acontecimentos, sendo portanto essa redução um possível reflexo dos entraves jurídicos criados a expansão da atividade dessas empresas. Ainda assim, quando considerado os 15 anos da série temporal constata-se que em um período curto de tempo, relativo aos ciclos de plantio do eucalipto que variam de 4 a 7 anos, houve expansão considerável (aproximadamente 20%) da área ocupado por esta atividade.

Considerada a área total do município e os resultados obtidos através da detecção de mudanças empreendida nota-se a maior taxa de ocupação do solo pela classe Não-Eucalipto, isso significa a predominância do uso misto do solo em detrimento a monocultura de eucalipto.

O método empregado mostrou-se satisfatório aos objetivos do presente estudo, a escolha de imagens de média resolução (30 m), embora possa se considerar o uso de imagens de maior resolução espacial para aumento de precisão no mapeamento de classes de uso e cobertura, foi importante para garantir o recobrimento da faixa territorial da área de estudo, não sendo necessário a construção de mosaicos. Além disso a ampla série histórica disponibilizada pelo programa Landsat o torna valiosa fonte de dados para estudos de monitoramento da Terra, especialmente para aqueles que trabalham com trajetória temporal, caso do presente estudo. Outras vantagens resultantes da escolha das imagens Landsat residiram na economia de tempo e custos no pré-processamento das imagens, nesse sentido, a disponibilidade, no sítio da USGS, de dados refinados com bons níveis de adequação radiométrica e geométrica implicaram em significativa economia de tempo para o pesquisador e redução nos custos da pesquisa, especialmente com a aquisição de licenças para softwares de PDI.

A opção pelo uso de um índice de vegetação, no caso NDVI, demonstrou bons resultados, especialmente na diferenciação dos tipos de cobertura vegetal. As imagens NDVI ressaltaram de forma efetiva a diferença de comportamento espectral entre as áreas de cultivo de eucalipto em relação os demais gêneros vegetais, o que contribuiu significativamente para o bom

resultado da classificação e para geração das imagens diferença.

A escolha pelo uso dos indicadores estatísticos média e desvio padrão para definição dos limiares de mudança nas imagens diferença também proporcionou bons resultados. Cabe aqui ressaltar a importância da realização de testes empíricos para seleção dos intervalos de mudança e não-mudança, os distintos resultados permitiram a escolha dos intervalos mais adequados aos objetivos do trabalho, o que possibilitou a melhor opção para obtenção de resultados satisfatórios.

Em suma, alcançados os objetivos propostos pelo presente trabalho e considerando os dados e métodos empregados cabe a ressaltar a necessidade de alguns aprofundamentos na pesquisa. Realizado o mapeamento das áreas de cultivo de eucalipto é de importante valia considerar o mapeamento das áreas ocupadas por cada uma das classes de uso e cobertura do solo, especialmente as que compreendam outros produtos da atividade agropecuária, a partir desses resultados será possível traçar um panorama mais completo sobre a dinâmica de expansão da cultura de eucalipto sobre as demais classes de uso e cobertura, constatando quais são as classes mais afetadas pelo avanço da atividade. Outro aprofundamento necessário se faz na maior correlação com outras fontes de dados, especialmente levantamentos em campo e dados oriundos de pesquisas de órgãos oficiais de gestão territorial. O cruzamento entre esses dados permitirá a comparação entre resultados de pesquisas realizadas a partir de técnicas de sensoriamento remoto e outras metodologias de pesquisa, sendo importante base para comparação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANTINHO, R.; SALGADO, M.; BATISTA, G. Análise da expansão do eucalipto no município de São Luís do Paraitinga. In: *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, 2011, Curitiba. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0870.pdf>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

CRONEMBERGER, F. *Cartografia da dinâmica da paisagem no estado do Rio de Janeiro*. 2014. 159 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2014.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS Pro tool reference. 2017. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico, 2010*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

JUNIOR, G. *O eucalipto no Vale do Paraíba Paulista: Aspectos geográficos e históricos*. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-26062012-140626/pt-br.php>>. Acesso em: Março de 2017.

KIEL, R. *Detecção de mudanças no uso e na cobertura do solo em uma série temporal de imagens da região da campanha do rio grande do sul*. 2008. 203 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/srm/ppgsr/publicacoes/Dissert_RobertoKiel.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2017.

LIMA, L.E. Considerações sobre a Monocultura de Eucalipto no Vale do Paraíba. *Professor Luiz Eduardo Corrêa Lima*, maio. 2015. Disponível em: <<http://www.profluizeduardo.com.br/consideracoes-sobre-a-monocultura-de-eucalipto-no-vale-do-paraiba/>>. Acesso em: Março de 2017.

MELLO, T. *Estrutura da vegetação, cobertura florestal e preferências de uso da paisagem associadas a vertentes: as quase-florestas de São Luiz do Paraitinga (SP)*. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-19042010-105930/pt-br.php>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

OLIVEIRA, L.E. *A expansão da monocultura de eucalipto e as implicações socioambientais no município de São Luiz do Paraitinga: Um estudo de caso*. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano Regional) – Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://biblioteca.univap.br/dados/000003/00000365.pdf>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

PONZONI, F.; SHIMABUKURO, Y.; KUPLICH, T. *Sensoriamento Remoto da Vegetação*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SÃO PAULO. Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. *Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agrícola do Estado de São Paulo*. São Paulo: CATI, 2008. Disponível em: <<http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/>>

SATO, A.; AVELAR, A.; NETTO, A.L. Hidrologia de encosta numa cabeceira de drenagem com cobertura de eucalipto na bacia do rio Sesmarias: médio vale do rio Paraíba do Sul. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, 2007. Taubaté, nov. 2007, IPABHi, p. 147-154. Disponível em:

<<http://www.agro.unitau.br/serhidro/doc/pdfs/147-154.pdf>>. Acesso em: Março de 2017.

SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. Taylor e Francis Ltd., n. 6, p. 989-1003, 1989. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431168908903939>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8 Surface Reflectance Product Guide. 2017. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide_ee.pdf>. Acesso em: Maio de 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. LEDAPS Product Guide. 2017. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf>. Acesso em: Maio de 2017.