



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Área de concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS ALTERAÇÕES NA COBERTURA DO SOLO
NA BACIA DO RIO TAPEROÁ, SEMIÁRIDO, NO PERÍODO DE 1986 A 2015**

Dissertação de Mestrado

ALBERTO CÉSAR DO NASCIMENTO SILVA

CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO DE 2017

ALBERTO CÉSAR DO NASCIMENTO SILVA

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS ALTERAÇÕES NA COBERTURA DO SOLO
NA BACIA DO RIO TAPEROÁ: 1986-2015**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, na área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão

CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, Alberto César do Nascimento.
Análise multitemporal das alterações na cobertura do solo na bacia do rio Taperoá : 1986-2015 / Alberto César do Nascimento Silva. – Campina Grande, 2017.
66 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão".
Referências.

1. Tendência de Longo prazo – Cobertura do Solo. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Semiárido. 4. Índice de Vegetação. 5. Albedo. I. Galvão, Carlos de Oliveira. II. Título.

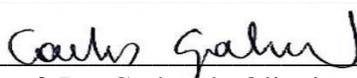
CDU 624:504.123(043)

ALBERTO CÉSAR DO NASCIMENTO SILVA

**ANÁLISE MULTITENPORAL DAS ALTERAÇÕES NA COBERTURA DO SOLO
NA BACIA DO RIO TAPEROÁ, SEMIÁRIDO, NO PERÍODO DE 1986 A 2015**

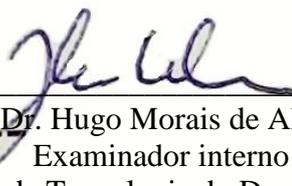
Dissertação apresentada em 28 de agosto de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA



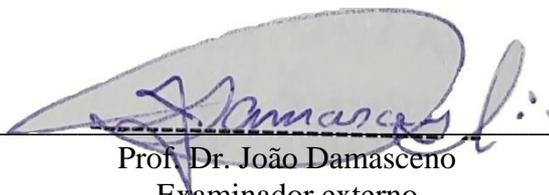
Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
Orientador

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG



Prof. Dr. Hugo Morais de Alcântara
Examinador interno

Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento – UFCG



Prof. Dr. João Damasceno
Examinador externo

Centro de Educação / Departamento de Geografia – UEPB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que permitiu que tudo isso fosse possível, ao longo de minha vida, em todos os momentos, é o maior mestre que alguém pode ter.

Agradeço também a minha esposa, Andréa Maciel Dantas, que de forma especial e carinhosa me deu forças e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades.

Quero agradecer também a minha mãe, Maria Cleusa do Nascimento Silva, que iluminou de maneira especial os meus pensamentos me levando à busca de mais conhecimentos.

Ao meu orientador Professor Carlos de Oliveira Galvão e ao parceiro Professor John Elton de Brito Leite Cunha, por todos os incentivos e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas de turma de mestrado, pessoas que tive a oportunidade de conhecer e conviver por um período, companheiros que levarei em minha vida.

À Universidade Federal de Campina Grande pelo apoio técnico.

RESUMO

O sensoriamento remoto possibilita o acompanhamento da cobertura do solo a partir de índices de vegetação. Análises das tendências de longo prazo da cobertura do solo são, geralmente, executadas com sensores de alta resolução temporal e baixa resolução espacial. No entanto, em regiões como a Semiárida, a compreensão da dinâmica da cobertura do solo em escalas locais é muito importante, particularmente devido à ação humana. O uso de imagens de satélite com média resolução espacial permite identificar alterações na escala da ação humana no bioma Caatinga. Através da abordagem aplicada a este trabalho, é possível identificar o período em que ocorreram tais alterações. Neste trabalho, utilizou-se o teste de tendência de Mann-Kendall para avaliar o desempenho ou a capacidade dos indicadores biofísicos EVI (*Enhanced Vegetation Index*); e albedo de superfície para identificar alterações na cobertura do solo. Foram também identificados, através de estimativas de tendências temporais, as áreas e períodos com possíveis variações na cobertura do solo em agrupamentos temporais de 5 anos. Utilizaram-se 162 imagens LANDSAT 5, 7 e 8 no período de 1986 a 2015, da Bacia do Rio Taperoá, localizada no semiárido do estado da Paraíba. Embora o EVI seja o indicador biofísico mais amplamente utilizado para avaliar alterações na cobertura do solo, o albedo de superfície mostrou-se mais sensível ao indicar prováveis áreas alteradas bem como em apontar em qual período tal mudança ocorreu. As avaliações executadas fornecem um ferramental para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento remoto e gestão de ecossistemas, podendo ser usado para identificar regiões para intervenções e observações mais detalhadas.

Palavras-chave: *tendência, semiárido, índice de vegetação, albedo*

ABSTRACT

Remote sensing allows monitoring of land cover from vegetation indexes. Analyses of long-term trends in land's cover are generally performed with high temporal resolution's and low spatial resolution's sensors. However, in heterogeneous regions such as the Brazilian Semi-arid Region, understanding the dynamics of land cover at local scales is very important, particularly in relation to the scale of human action. The medium spatial resolution allows identifying alterations in the scale of small rural properties and it is compatible with human action scale in Caatinga's biome. The approach applied to this work makes possible to measure the period in which such changes occurred. In this work, the Mann-Kendall trend's test was used to evaluate the performance or the capacity of the biophysical indicators EVI (Enhanced Vegetation Index); and surface Albedo to identify changes in soil cover. It was possible, as well, to identify, through estimates of temporal trends, areas and periods with possible variations in soil cover in 5-year temporal groupings. In total, 162 LANDSAT images were used, in the period from 1986 to 2015, focusing on Taperoá's river basin, in the State of Paraíba, Brazilian semiarid region. Although EVI is the biophysical indicator most widely used to assess changes in soil cover, surface Albedo has been more sensitive in indicating probable areas altered as well as in indicating in which period such a change occurred. The evaluations provide tools for the development of remote monitoring and ecosystem management systems and can be used to identify regions of priority for interventions and observations that are more detailed.

Keywords: *trend, semiarid, vegetation index, albedo*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. Indicadores Biofísicos.....	16
2.1.1. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	17
2.1.2. ALBEDO DE SUPERFÍCIE	17
2.2. Sensoriamento Remoto Orbital (SRO).....	18
2.2.1. PROJETO LANDSAT	19
2.2.1.1. Satélite LANDSAT 5.....	21
2.2.1.2. Satélite LANDSAT 7.....	22
2.2.1.3. Satélite LANDSAT 8.....	22
2.3. Variabilidade e Tendências	23
3. MATERIAIS E METODOS.....	26
3.1. Área de estudo.....	26
3.2. Dados LANDSAT	27
3.3. Detecção de nuvens e sombras de nuvens.....	27
3.4. <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI)	28
3.5. Albedo de superfície	29
3.6. Valor composto para EVI e Albedo de superfície	32
3.7. Tendências na mudança da cobertura do solo.....	32
4. RESULTADOS ESPERADOS	36
4.1. Identificação e extração de nuvens e sombra de nuvens.....	36
4.2. A questão da resolução espacial	38
4.3. Alterações na cobertura do solo segundo o EVI.....	39
4.4. Alterações na cobertura do solo segundo o Albedo de superfície	42
4.5. Avaliação em áreas pilotos.....	45
5. CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICES	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cronograma de lançamentos dos satélites da série LANDSAT	20
Figura 2: Área de estudo.....	26
Figura 3: Demonstração de períodos que passaram pela perda (em vermelho) e ganho (em verde) da cobertura do solo	34
Figura 4: Demonstração do período de mudança negativa e número de ocorrências	35
Figura 5: Efeito do algoritmo Fmask sobre as imagens de EVI.....	36
Figura 6: Valor máximo composto pelo EVI para o ano de 1987	37
Figura 7: Valor mínimo composto pelo Albedo de superfície para o ano de 1987 .	37
Figura 8: Sobreposição dos períodos de mudança com <i>grids</i> MODIS e AVHRR..	39
Figura 9: EVI de cada um dos 30 anos da série	40
Figura 10: Alterações na vegetação (km ²) identificadas pelo EVI.....	41
Figura 11: Albedo de superfície de cada um dos 30 anos da série	42
Figura 12: Alterações na vegetação (km ²) identificadas pelo Albedo de superfície	44
Figura 13: Mapa da bacia do Taperoá com a localização das duas áreas pilotos ..	45
Figura 14: Imagens de satélite para as áreas pilotos.....	46
Figura 15: EVI para cada ano da série temporal na área piloto 1.....	46
Figura 16: EVI para cada ano da série temporal na área piloto 2.....	48
Figura 17: Áreas pilotos de visualização segundo EVI	49
Figura 18: Albedo de superfície para cada ano da série temporal na área piloto	150
Figura 19: Albedo de superfície para cada ano da série temporal na área piloto	251
Figura 20: Áreas pilotos de visualização segundo Albedo de superfície	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constante solar K_b ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$).....	31
Tabela 2: Número de ocorrências para a Bacia do Rio Taperoá segundo EVI.....	42
Tabela 3: Número de ocorrências para a Bacia do Rio Taperoá segundo Albedo de superfície	44

LISTA DE SIGLAS

A	–	Albedo de superfície
Add _{ref,b}	–	Termos aditivos da reflectância de cada banda
AVHRR	–	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
A _p	–	Termo aditivo obtido no arquivo de <i>metadata</i>
b	–	Subíndice representando cada uma das bandas
BRDF	–	<i>Bi-directional Reflectance Distribution Function</i>
CCDC	–	<i>Continuous Change Detection and Classification</i>
C ₁	–	Coefficiente de correção atmosférica para o vermelho
C ₂	–	Coefficiente de correção atmosférica para o azul
d _{ES}	–	Distância Terra-Sol no dia de cada imagem
DN	–	Número de calibração digital
d _r	–	Corresponde à correção da excentricidade da órbita terrestre
E	–	Média estatística
e _a	–	Pressão parcial do vapor de água atmosférico
EROS	–	<i>Earth Resources Observation and Science</i>
ERTS-1	–	<i>Earth Resources Satellite Technology</i>
ETM	–	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
ETM+	–	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
EVI	–	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
F _{mask}	–	<i>Function of Masks</i>
G	–	Fator de ganho
H ₀	–	Hipótese nula

IAF	– Índice de Área Foliar
IV	– Índices de Vegetação
K_b	– Constante solar
K_t	– Coeficiente de turbidez do ar
L	– Fator de correção para interferência do sol
L_b	– Radiação de cada pixel da banda
LANDSAT	– <i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LDCM	– <i>LANDSAT Data Continuity Mission</i>
LEDAPS	– <i>LANDSAT Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System</i>
L8SR	– <i>LANDSAT 8 Surface Reflectance</i>
MaxVC	– <i>Maximum Value Composite</i>
METRIC	– <i>Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration</i>
MinVC	– <i>Minimum Value Composite</i>
MNC	– <i>Maximum NDVI Composite</i>
MODIS	– <i>Moderate Resolution Image Spectroradiometer</i>
MSS	– <i>Multispectral Scanner</i>
MTL	– Tipo de extensão de arquivo <i>metadata</i>
$Mult_{ref,b}$	– Termos multiplicativos da reflectância de cada banda
M_p	– Termo multiplicativo obtido no arquivo de <i>metadata</i>
N	– Dimensão da amostra
NA	– <i>Not Available</i>
NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND_b	– Intensidade de cada pixel e banda

NDVI	– <i>Normalized Differences Vegetation Index</i>
OECD	– Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OLI	– <i>Operational Land Imager</i>
ONU	– Organizações das Nações Unidas
Po	– Pressão atmosférica local
p _b	– Peso empregado a cada banda monocromática reflexiva
P _λ	– Reflectância planetária TOA
Q _{cal}	– Número de calibração digital (DN) do produto
r _b	– Reflectância monocromática das bandas reflexivas
RU	– Percentual de humidade relativa do ar
S	– Estatística de teste
SEBAL	– <i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
sgn	– Função sinal é a função que retorna o sinal do número real
SRO	– Sensoriamento Remoto Orbital
TIRS	– <i>Thermal Infrared Sensor</i>
TM	– <i>Thematic Mapper</i>
TOA	– Reflectância de Topo de Atmosfera
USGS	– <i>United States Geological Survey</i>
W	– Água precipitável
WRS	– <i>Worldwide Reference System</i>
Y _{i,j}	– Séries de dados temporais
Z	– Ângulo zênite solar
Z _i	– Série de dados temporais
α	– Nível de significância adotado

- α_{atm} – Albedo atmosférico
- α_{toa} – Albedo planetário de cada pixel ou albedo sem correção atmosférica
- ρ_1 – Reflectância no azul TOA
- ρ_3 – Reflectância do vermelho TOA
- ρ_4 – Reflectância vermelho próximo TOA
- Θ_{SE} – Ângulo de elevação local
- τ_{oc}^2 – Transmitância atmosférica no domínio da radiação solar

1. INTRODUÇÃO

Mudanças no uso e cobertura do solo estão remodelando paisagens em todo o mundo a taxas sem precedentes, afetando processos ambientais em múltiplas escalas (ELLIS e PONTIUS, 2007). A crescente demanda por recursos do solo (alimentos, água potável, minerais, combustíveis, dentre outros), juntamente com as práticas de gestão do solo insustentáveis, resultaram no aumento da degradação ambiental, que está ameaçando seriamente a capacidade de produção de alimentos do mundo (NELLEMANN et al., 2009). Portanto, torna-se crucial a compreensão das mudanças na paisagem induzidas pelo homem, assim fornecendo aos gestores informações confiáveis sobre o estado do ambiente (GRECCHI et al., 2014).

A Caatinga tem sido considerada como uma floresta tropical sazonalmente seca do Nordeste brasileiro (BULLOCK et al., 1995; PENNINGTON, 2006; SANTOS et al., 2011). É uma área biogeográfica singular, que abrange cerca de 850.000 km², suporta mais de 1500 espécies de plantas, sendo cerca de 1/3 da flora composta por espécies endêmicas, isto é, que não são encontradas em nenhum outro lugar do planeta. Engloba os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais (ARAÚJO et al., 2007; ALBUQUERQUE et al., 2012).

A região semiárida enfrenta intensiva degradação do habitat e exaustão do solo, particularmente no caso da agricultura de baixos insumos, e sobrepastoreio de gado, criando uma espécie de sinergia entre a pobreza humana e a degradação ambiental (LEAL et al., 2005; SANTOS et al., 2011). Assim, um ponto de partida para compreender os efeitos das mudanças na cobertura do solo é a obtenção de informações detalhadas e precisas sobre as características das alterações (por exemplo taxas e tendências) (LOVELAND e DEFRIES, 2004). Posteriormente, o estudo conjunto das alterações na cobertura do solo com características bioclimáticas e edáficas permitirá uma compreensão mais profunda das consequências e pode servir para sinalizar locais com maior risco de degradação (ASNER et al., 2004).

Estudos sobre cobertura do solo, seus usos e suas alterações desempenham um papel importante em muitos estudos científicos e avaliações socioeconômicas, pois eles fornecem informações essenciais para os modelos climáticos globais (BONTEMPS et al., 2012; YANG et al., 2013), além de servir de referência para a gestão dos ecossistemas (LU et al., 2016). Mudanças na cobertura do solo afetam a estrutura do ecossistema de forma a fragmentar o habitat, bem como a capacidade dos ecossistemas de fornecer bens e serviços para o bem-estar

humano, tais como a biodiversidade (CORONA et al., 2011; NEWBOLD et al., 2015), retenção de carbono e nitrogênio, a produtividade e a polinização (HADDAD et al., 2015). Sob tal contexto e no âmbito dos processos de tomada de decisão, o monitoramento da cobertura do solo desempenha um papel fundamental como suporte aos gestores nas políticas e planejamentos, especialmente aqueles relacionados às questões ambientais (MARCHETTI et al., 2014), além de serem úteis para orientar a exploração dos recursos naturais em direção a novos conceitos, tais como o pensamento resiliente (CORONA, 2016; ELLIS et al., 2013).

A ferramenta mais amplamente utilizada para analisar as condições da vegetação em grandes áreas é o Sensoriamento Remoto Orbital (SRO). O SRO permite o cálculo e/ou análise de parâmetros em grandes áreas como função das características biofísicas encontradas em cada pixel, as modificações do uso do solo, o monitoramento espacial e temporal dos diversos biomas que constituem a superfície e a identificação de mudanças que venham a ocorrer (LIMA et al., 2014).

De maneira geral, estudos como Schucknecht et al. (2013) e Mao et al. (2012) envolvendo SRO utilizam baixa resolução espacial através do uso de índices de vegetação como o *Normalized Differences Vegetation Index* (NDVI) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Naqueles estudos, foram feitas análises de tendências de vegetação para grandes áreas, como em continentes inteiros, na tentativa de compreender e mensurar a resposta da vegetação às possíveis alterações ocorridas. Em estudos assim, frequentemente utilizam-se sensores de resolução menor, como o *Moderate Resolution Image Spectroradiometer* (MODIS) e o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). No entanto, a análise das condições da vegetação e suas tendências também são importantes em escalas locais, utilizando resoluções espaciais mais detalhadas.

Apesar dos avanços, como os que podem ser vistos em estudos realizados por Zhu et al. (2016), que utilizou-se média resolução espacial para analisar as tendências na vegetação aplicadas a cidade de Guangzhou na China, incluindo os efeitos da mudança na cobertura do solo na avaliação das tendências na vegetação ainda existe possibilidades de inovação, como a análise de outros parâmetros biofísicos e não só os índices de vegetação, bem como a utilização de testes de tendência mais robustos para análise.

O objetivo desta dissertação, neste contexto, é realizar uma análise multitemporal para identificar as possíveis alterações na cobertura do solo da Bacia do Rio Taperoá, semiárido brasileiro, no período de 1986 a 2015, utilizando sensores orbitais de média resolução espacial de 30 metros. Os objetivos específicos do estudo são:

- Avaliar o desempenho ou a capacidade dos indicadores biofísicos EVI e albedo de Superfície para identificar alterações na cobertura do solo;
- Identificar, através de estimativas de tendências temporais, as áreas e períodos com possíveis variações na cobertura do solo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Indicadores Biofísicos

A pressão das comunidades humanas sobre os recursos naturais vem aumentando os processos de degradação nas últimas décadas, isso tem gerado problemas no ambiente biofísico, de diferentes tipos, magnitude e áreas de influência (SEMARNAT, 2012). Utilizando indicadores ambientais podemos descrever o estado do ambiente biofísico e dos recursos naturais. Eles têm sido considerados como indispensáveis para a formulação de políticas de gestão e planejamento por poder gerar informações quantificáveis, o que ajuda a explicar como as condições biofísicas estão mudando ao longo do tempo (FARROW e WINOGRAD, 2001).

O desenvolvimento de indicadores ambientais iniciou-se no final da década de 1980 no Canadá e em alguns países europeus, obtendo um novo impulso a partir da Cúpula da Terra, realizada em Estocolmo (1972), Rio de Janeiro (1992) e Johannesburgo (2002), onde recomendações para a criação e utilização de indicadores, a fim de medir o progresso de apoio ambiental, social e econômico nos países participantes foram realizados (QUIROGA, 2001).

Os indicadores ambientais fornecem informações sobre as condições e tendências dos fenômenos naturais, econômicos e sociais. A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2003) pressupõe que um indicador quantifica e simplifica fenômenos além de ajudar a compreender a realidade complexa, portanto, um indicador pode acompanhar as mudanças que ocorrem em um sistema socioambiental. Stein et al. (2001) afirmam que o valor dos indicadores ambientais depende de sua escala temporal, espacial e utilidade para os tomadores de decisão, porque ajuda no desenvolvimento de propostas para a gestão do capital natural e, especialmente, porque é um instrumento de comunicação em geral.

Os indicadores permitem ter informações sobre os fatores biofísicos e socioeconômicos que são elementos-chave em questões ambientais, porque eles não são apenas um pedaço de informação quantitativa, podem ser úteis para descrever e avaliar os fatores estruturais da paisagem.

2.1.1. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

No domínio do semiárido, estudos da vegetação e cobertura do solo vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de obter informações a partir de imagens de satélite e de outros produtos do SRO, em busca de facilitar a análise e a interpretação dos dados de superfície.

A cobertura do solo vem sendo estudada, segundo os mais diferentes níveis de abordagem, que incluem estudos taxonômicos, botânicos, fisiológicos, fitossociológicos, dentre outros. Com a constatação de que os vegetais sobre a superfície do solo extraem da radiação eletromagnética emitida pelo Sol a energia de que necessitam para viver, esta subtração de energia passou a ser um parâmetro para os estudos da vegetação a partir dos sensores elétrico-magnéticos (PONZONI, 2007). Sendo assim, a detecção qualitativa e quantitativa da vegetação verde é uma das mais importantes contribuições do SRO para os estudos ambientais (OLIVEIRA et al., 2009).

A utilização de índices de vegetação gerados a partir de imagens de satélites é importante para o monitoramento das alterações naturais e/ou produzidas pelo homem na cobertura do solo (FEITOSA et al., 2004), pois os índices de vegetação ressaltam o comportamento espectral da vegetação, possibilitando distinguir diferentes tipos de cobertura do solo (MOREIRA, 2005).

Um dos quatro indicadores utilizados pela Organizações das Nações Unidas (ONU) para avaliar o processo de desertificação são os índices de vegetação derivados de imagens de satélite, assim também ressaltando a importância do SRO como ferramenta para avaliar os processos de desertificação (MOREIRA, 2004; MENEZES e NETTO, 2001).

2.1.2. ALBEDO DE SUPERFÍCIE

Outro indicador biofísico que vem atraindo cada vez mais a atenção científica como um dos mais importantes é o albedo de superfície (CHARNEY, 2006). Segundo Liu et al. (2016) o albedo de superfície é um parâmetro de fácil acesso ao refletir a situação do solo quanto à perturbação humana, qualquer alteração no solo pode ser refletida pela variação do albedo de superfície. Valores mais elevados do albedo de superfície são causados pela exposição do solo e, por isso, torna-se um indicador importante na detecção de superfícies expostas.

Outra característica importante na dinâmica da vegetação é a variação do dossel da estrutura vegetal, que é refletido na variação do albedo de superfície (KUUSINEN et al., 2016).

Além do mais, a fácil disponibilidade do albedo de superfície através do uso de dados advindos dos satélites, onde podemos calculá-lo para cada pixel através de rotinas computacionais, faz deste um parâmetro importante em revelar as alterações ocorridas no solo (LAMCHIN et al., 2016).

2.2. Sensoriamento Remoto Orbital (SRO)

SRO é o termo usado para definir a tecnologia que permite o estudo de algumas características de um objeto, sem que, necessariamente, se estabeleça contato com o mesmo. A tecnologia usada nos satélites é um exemplo do SRO, os sensores colocados a bordo dessas plataformas orbitais são capazes de registrar o nível de radiação eletromagnética refletida e/ou emitida de um determinado local na superfície terrestre (SILVA et al., 2013). Dados de SRO têm o potencial para fornecer informações detalhadas sobre as propriedades da superfície do solo, mediante as imagens orbitais, que crescem como alternativa rápida para coletar informações sobre os fenômenos existentes na cobertura do solo em nível local ou regional, cujo nível de detalhamento é determinado pela resolução espacial dos sensores multiespectrais utilizados.

A maioria dos estudos sobre a dinâmica da vegetação têm utilizado séries temporais de Índices de Vegetação adquiridos por sensores de resolução moderada (*Moderate Resolution Image Spectroradiometer – MODIS* ou *Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR*) e focados em áreas muito grandes, como continentes ou porções de continentes inteiros (PIAO et al., 2015; JONG et al., 2012) principalmente por causa de seu tempo de revisitação (LHERMITTE et al., 2008). Além disso, levantamentos em grandes áreas, quanto às alterações da vegetação e uso e ocupação do solo, não podem ser executados periodicamente por causa dos custos elevados, porém são obrigatórios para a construção de registros históricos (SANNIER et al., 2014 e SANNIER et al., 2016).

No entanto, é um desafio detectar mudanças em pequenas áreas ou paisagens heterogêneas utilizando dados de resolução moderada. (LU et al., 2016). Imagens de sensores de resolução “fina” como o *Land Remote Sensing Satellite (LANDSAT)* podem fornecer informações espaciais muito mais detalhadas (BOSCHETTI et al., 2015). A resolução espacial dos dados gerados a partir de imagens MODIS é 250 m, 500 m ou 1 Km (HUETE et al., 2002), e a resolução espacial de conjuntos de dados produzido a partir de imagens AVHRR é de 1 km (TUCKER et al., 2005). Os sensores da série LANDSAT de satélites fornecem imagens em

resolução de 30 metros (WULDER et al., 2008), permitindo um acompanhamento eficaz da dinâmica da vegetação induzidas pelo homem (HUANG et al., 2010), bem como caracterizam tendências em escalas locais ou regionais para uma variedade de ambientes, incluindo florestas (LEHMANN et al., 2013), terras secas (SONNENSCHNEIN et al., 2011), e tundra ártica (FRASER et al., 2012).

2.2.1. PROJETO LANDSAT

O projeto LANDSAT detem uma das mais longas coleções de dados de SRO de resolução moderada do mundo. Quatro décadas de imagens fornecem um recurso exclusivo para aqueles que trabalham na agricultura, geologia, silvicultura, planejamento regional, educação, mapeamento e pesquisa de mudança global. Imagens dos satélites pertencentes ao projeto LANDSAT também são inestimáveis para a resposta a emergências e remediação de desastres. Com mais de 40 anos, a série de imagens dos satélites pertencentes ao projeto LANDSAT fornece um dos registros temporais mais longo de dados multiespectrais de resolução moderada da superfície do planeta em uma base global. Os registros do projeto LANDSAT permaneceu ininterrupto, provando ser um recurso único para auxiliar uma ampla gama de especialistas na gestão de alimentos, água, florestas e outros recursos naturais do mundo para uma crescente população mundial. É um registro incomparável em qualidade, detalhe, cobertura e valor (USGS, 2016). Como uma iniciativa conjunta entre o *United States Geological Survey* (USGS) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o projeto LANDSAT e os dados que coleta apoiam comunidades governamentais, comerciais, industriais, civis, militares e educacionais nos Estados Unidos e no mundo inteiro (USGS, 2016).

Em meados da década de 1960, estimulada pelos sucessos americanos em exploração planetária usando satélites de SRO não tripulados, em 21 de setembro de 1966 o anúncio pelo secretário do Departamento do Interior, Stewart Udall, o Departamento do Interior, a NASA e o Departamento de Agricultura iniciaram um projeto para desenvolver e lançar o primeiro satélite civil de observação do planeta Terra. Seu objetivo foi alcançado em 23 de julho de 1972, com o lançamento do satélite *Earth Resources Satellite Technology* (ERTS-1), que mais tarde foi renomeado para satélite LANDSAT 1. Os lançamentos dos satélites LANDSAT 2, LANDSAT 3 e LANDSAT 4 seguiram-se em 1975, 1978 e 1982, respectivamente (Figura 1) (USGS, 2016).

Quando o satélite LANDSAT 5 foi lançado em 1984, ninguém poderia imaginar que o satélite iria continuar a oferecer alta qualidade de dados globais da superfície terrestre durante 28 anos e 10 meses, estabelecendo oficialmente o novo Recorde Mundial do Guinness como o mais longo satélite operacional de observação do planeta Terra. Anos depois o LANDSAT 6 falhou em seu lançamento ao não alcançar a órbita em 1993 (USGS, 2016).

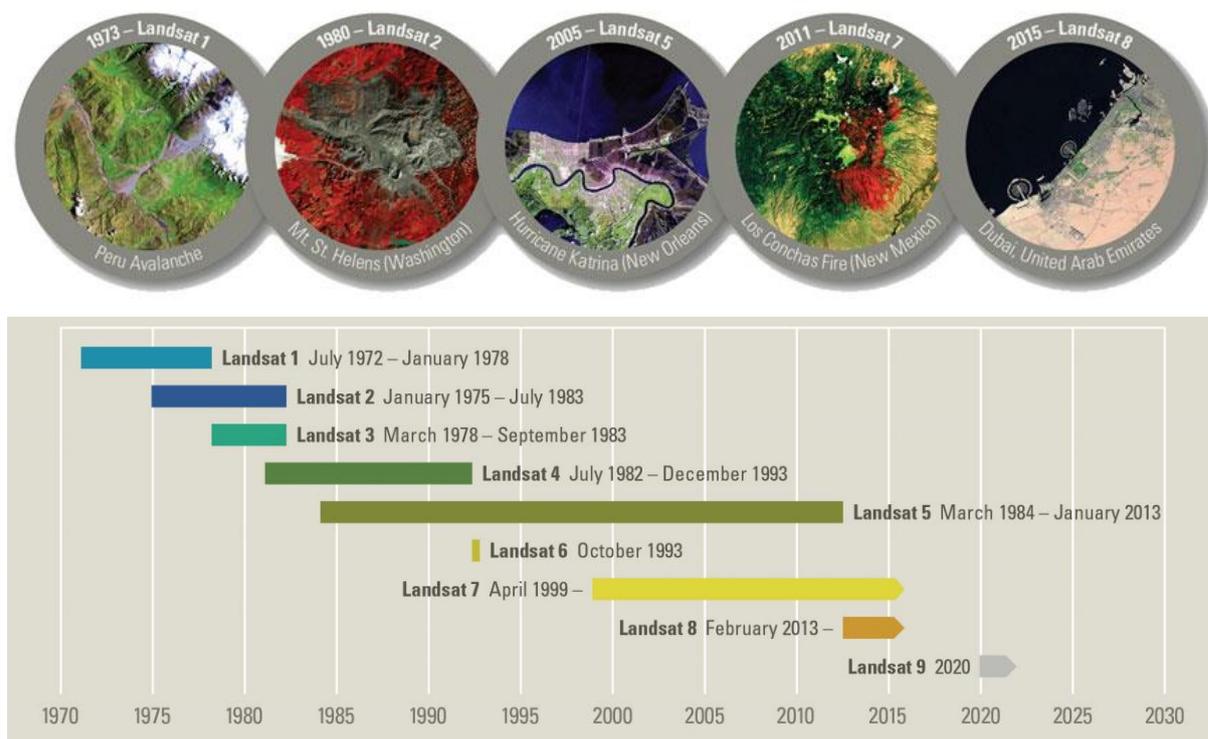


Figura 1: Cronograma de lançamentos dos satélites da série LANDSAT
 Fonte: USGS - LANDSAT *Missions*, 2016.

Posteriormente o satélite LANDSAT 7 foi lançado com êxito em 1999 e, juntamente com satélite LANDSAT 8, que em 30 de maio de 2013, (lançado como satélite LANDSAT *Data Continuity Mission* - LDCM - em 11 de fevereiro de 2013) ficaram com seus dados disponíveis. Tal como aconteceu com as parcerias anteriores, estas missões continuam com a aquisição de dados de alta qualidade que atendam às necessidades científicas e operacionais da NASA e do USGS para observar a cobertura do solo. Seguindo a série, o satélite LANDSAT 9 está provisoriamente previsto para iniciar suas atividades em 2020 (USGS, 2016).

2.2.1.1.Satélite LANDSAT 5

O satélite LANDSAT 5, que transportava os sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Multispectral Scanner* (MSS), executou a maior missão de detecção remota de satélite da história do planeta. O LANDSAT 5 foi lançado em março de 1984 em uma órbita polar solar síncrona de aproximadamente 710 km e foi desativado em junho de 2013. Os registros de séries temporais de LANDSAT estão bem estabelecidos em suas quase três décadas de dados do LANDSAT 5 TM além de serem suficientemente robustas para permitir o estudo da cronologia de mudanças antropogênicas e naturais em uma época em que as mudanças climáticas se tornaram evidentes (ROY et al., 2014).

A captura das imagens através dos sensores é feita graças à reflexão do comprimento de onda ótico. A maioria das superfícies terrestres reflete a radiação do comprimento de ondas ótico de forma anisotrópica com uma dependência direcional que varia em função da geometria sol-alvo-sensor, comumente descrita pela Função de Distribuição Bidirecional Refletiva (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* - BRDF). O BRDF é controlado por vários fatores como tipo, quantidade, estrutura e espaçamento da vegetação além da refletância do solo de fundo. Tipicamente, o BRDF de superfícies terrestres pode ser descrito por formas de refletância anisotrópica de cúpula com um pico de retro refletância, ponto quente (JACKSON et al., 1990, LI e STRAHLER, 1992, ROUJEAN et al., 1992, RAHMAN et al., 1993, PINTY et al., 2002). O satélite LANDSAT 5 TM obteve observações de comprimento de onda reflexivo de 30 metros entre março de 1984 e novembro de 2011. Os dados do satélite LANDSAT 5 TM estão disponíveis em cenas de aproximadamente 180 km x 170 km definidas em um Sistema de Referência Mundial (*Worldwide Reference System* - WRS) com arquivo de *metadata* descritivo associado (ARVIDSON et al., 2006). Os dados do projeto LANDSAT são mantidos no Centro de Observação e Ciência de Recursos Terrestres (*Earth Resources Observation and Science* - EROS) do USGS e os dados do satélite LANDSAT 5 TM arquivados têm cobertura de aquisição variável (KOVALSKYY e ROY, 2013 e WULDER et al., 2016).

2.2.1.2.Satélite LANDSAT 7

O satélite LANDSAT 7, lançada com sucesso em 15 de abril de 1999, demonstrou avanços significativos se comparados ao satélite LANDSAT 5 em radiometria numérica precisa, diferenciação espectral e monitoramento sazonal repetitivo. Foram também efetuadas

melhorias substanciais nos procedimentos de calibração, tanto antes do lançamento como durante as operações normais, para assegurar a estabilidade a longo prazo na radiometria espectral adquirida. As aquisições de dados do satélite LANDSAT 7 estão sendo conduzidas por um plano de aquisição de dados de longo prazo que foi projetado para assegurar que uma cobertura sazonal substancialmente livre de nuvens seria registrada, arquivada e estaria disponível para todas as áreas terrestres do globo (NASA, 2016).

A bordo do satélite LANDSAT 7 o novo sensor ETM+ deriva diretamente dos sensores *Thematic Mapper* (TM) a bordo dos satélites LANDSAT 4 e LANDSAT 5 e do *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) que estava a bordo do satélite LANDSAT 6 perdido. Como os sensores anteriores, o ETM+ opera através de varredura adquirindo dados para as mesmas sete bandas espectrais visíveis, infravermelho próximo, infravermelho de onda curta e térmicas infravermelhas. A distância de amostragem do solo do ETM+ permanece a 30 m para as bandas refletoras, mas melhora para 60 m a banda térmica (comparada com 120 m para a banda térmica TM). O ETM+ também adquire dados para uma nova banda pancromática (Banda 8) com uma distância de amostragem de solo de 15 m, suas cenas são de aproximadamente 183 km x 170 km (NASA, 2016).

Infelizmente em 2003 ocorreu uma falha no ETM+, mais especificamente no *Scan Line Corrector*, um dispositivo que compensa o movimento do satélite e impede que as imagens fiquem desfocadas. Sem ele, cerca de 25% de cada imagem é severamente degradada. Felizmente os dados próximos ao centro de cada imagem são menos afetados, possibilitando fornecer cobertura equivalente combinando múltiplas imagens de um alvo de solo (REICHHARDT, 2003).

2.2.1.3. Satélite LANDSAT 8

O satélite LANDSAT 8, lançado em 11 de fevereiro de 2013, entrou em serviço operacional em 30 de maio de 2013. Como avanço tem-se dois novos sensores o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), tornando-se assim disponível um novo conjunto de dados ortorretificados (ROY *et al.*, 2014). A primeira grande melhoria foi o aumento da sensibilidade radiométrica de dados de 8 bits para 16 bits. Uma segunda grande melhoria do sensor OLI em relação ao antecessor é a adição de uma nova banda 1 para a detecção costeira e aerossol. Esta banda é uma importante nova capacidade para a qualidade da

água em SRO. Uma terceira grande melhoria é a liberação de um produto de dados de reflectância de superfície pelo USGS EROS *Center* em 2015 (USGS, 2017a e USGS, 2017b).

Os dados corrigidos atmosféricamente para os satélites LANDSAT 4, 5 e 7 foram gerados a partir do Sistema de Processamento Adaptativo de Distúrbios do Ecossistema de LANDSAT (LANDSAT *Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* - LEDAPS) desenvolvido pela NASA. O LEDAPS é um software especializado que aplica rotinas de correção atmosférica MODIS aos produtos de dados de Nível 1. O vapor de água, o ozônio, a altura do geopotencial, a espessura ótica do aerossol e a informação de elevação digital são introduzidos com dados dos satélites LANDSAT para gerar Reflectância de Topo de Atmosfera (*Top of Atmosphere* – TOA), reflectância de superfície, brilho e temperatura, juntamente com máscaras para nuvens, sombras de nuvens, terra e água (USGS, 2017a). Os dados de reflectância de superfície do satélite LANDSAT 8 são gerados a partir do algoritmo LANDSAT 8 *Surface Reflectance* (L8SR), este não é o mesmo algoritmo usado para os dados dos satélites LANDSAT 4, 5 e 7, em vez disso, este novo método usa atualmente o centro da cena para o cálculo do ângulo solar e o ângulo zenith da vista. O zenith solar e os ângulos zenith da vista são usados para cálculos como parte da correção atmosférica (USGS, 2017b).

2.3. Variabilidade e Tendências

Os processos de degradação ambiental na Caatinga ocorrem, principalmente, devido à adoção de práticas antigas de agricultura de subsistência e manejo de pastos. As práticas agrícolas de derrubada e queimada da cobertura do solo, além de retirar os nutrientes do solo, os deixam expostos aos agentes erosivos, principalmente os hídricos e eólicos. Em paralelo, o aumento da variabilidade climática assim como a diminuição da precipitação pluviométrica com períodos prolongados de seca afeta o bioma como um todo e as suas atividades agropecuárias (BARBOSA, 2013).

Tais mudanças nos ecossistemas terrestres estão fortemente associadas aos processos de desenvolvimento socioeconômico, principalmente em países subdesenvolvidos, onde não se encontram planejamentos para a ocupação territorial (ARRAES et al., 2012).

Um dos principais indicadores para avaliar a existência de alterações na produtividade da vegetação é a tendência em longo prazo na dinâmica da vegetação (ERASMI et al., 2014). Análise de tendências de longo prazo, em geral, utiliza algoritmos estatísticos para medir um aumento ou diminuição de valores dentro de séries temporais. Várias análises em escalas

regionais e globais mostram que tais tendências de longo prazo não se comportam necessariamente de maneira uniforme no espaço e no tempo (SCHUCKNECHT et al., 2013; DE JONG et al., 2011; FENSHOLT et al., 2012; VRIELING et al., 2013).

O método mais amplamente aceito em ciências ambientais para verificar a existência de tendências significativas de longo prazo em séries temporais é o teste de Mann-Kendall para as tendências monótona (ERASMI et al., 2014). O teste de Mann-Kendall é um teste não paramétrico que tem sido amplamente aplicado à detecção de tendências monotônicas em séries, ou seja, o teste não detecta se ocorre uma “mudança de direção” na tendência, sem especificar se tais tendências são lineares ou não lineares. O teste foi utilizado inicialmente por Mann em 1945, e posteriormente alterado por Kendall em 1975, que criou a correspondente estatística. A aplicação do teste, utilizado por numerosos autores, tem evidenciado resultados muito consistentes.

Considere-se a série temporal de N valores anuais (um valor por ano) com termo genérico Y_i , $i = 1, \dots, N$. De acordo com o teste de Mann-Kendall, cada Y_i , $i = 1, \dots, N-1$ é comparado com todos os valores que se lhe seguem Y_j , $j = i + 1, i + 2, \dots, N$, gerando-se uma nova série Z_i que contém um indicador do valor relativo da diferença entre termos da série Y_i , de acordo com:

$$Z_i = \text{sgn}(Y_i - Y_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } Y_i > Y_j \\ 0 & \text{se } Y_i = Y_j \\ -1 & \text{se } Y_i < Y_j \end{cases} \quad (1)$$

onde: sgn é a função sinal, esta função retorna o sinal do número real, ou seja, $\text{sgn } x = -1$ se $x < 0$; $\text{sgn } x = 0$ se $x = 0$; $\text{sgn } x = 1$ se $x > 0$.

A estatística de teste é obtida através da soma da série Z_i , da seguinte forma:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(Y_i - Y_j) \quad (2)$$

Mann, 1945, e Kendall, 1975, demonstraram que, para amostras com grande dimensão em que a estatística do teste ocorre sem a presença de valores nulos de Z_i , e considerando a hipótese nula, H_0 , de ausência de tendência, a estatística S segue aproximadamente uma distribuição normal com média $E(S)$ nula, ou seja:

$$E(S) = 0 \quad (3)$$

E variância definida por:

$$Var(S) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{18} \quad (4)$$

Em que N é a dimensão da amostra. A significância de S para a hipótese nula pode ser testada com recurso a um teste bilateral, sendo que pode ser rejeitada para grandes valores da estatística Z(t) definida de acordo com:

$$Z(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S < 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

A hipótese nula de ausência de tendência, H_0 , é rejeitada sempre que $|Z(t)| = Z_{\alpha/2}$; em que α é o nível de significância adotado e $Z_{\alpha/2}$ é a variável normal reduzida para a função de distribuição normal padrão, na cauda direita da distribuição. O sinal da estatística Z(t) indica se a tendência é crescente ($Z(t)>0$) ou decrescente ($Z(t)<0$).

O α expressa uma estimativa sobre a probabilidade de que a tendência observada poderia ter ocorrido por acaso. Ela expressa o significado tendência. Quanto mais baixo o valor de α , maior é a probabilidade de que existe uma tendência nos dados. Nas aplicações efetuadas neste estudo, foi utilizado um limite para o valor de $\alpha = 0,05$ para mapear exclusivamente fortes tendências significativas.

3. MATERIAIS E METODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Taperoá, com uma extensão territorial de 5.686,37 km², localizada sobre o Planalto da Borborema, na posição central do Estado da Paraíba (Figura 2); seus pontos extremos são cortados pelas coordenadas de 6° 51' 44" a 7° 34' 31" de latitude sul e 36° 00' 10" a 37° 14' 30" de longitude oeste.

O Taperoá, principal rio da bacia, de regime intermitente, possui drenagem voltada para o sudeste, com penetração das massas atlânticas, propiciando temperaturas amenas e gradual distribuição da precipitação (400 a 800 mm ano⁻¹), que aumenta com a altitude no sentido dos divisores (FRANCISCO et al., 2012a).

A bacia do Rio Taperoá, com altitudes variando em grande parte de 300 a 600m, está situada de acordo com a classificação climática de Mendonça e Danni-Oliveira (2007) como sendo uma região de clima tropical equatorial do tipo 2d, com ocorrência de 9 a 11 meses secos (com concentração de chuvas entre os meses de fevereiro e abril), temperaturas elevadas com média acima de 28°C.

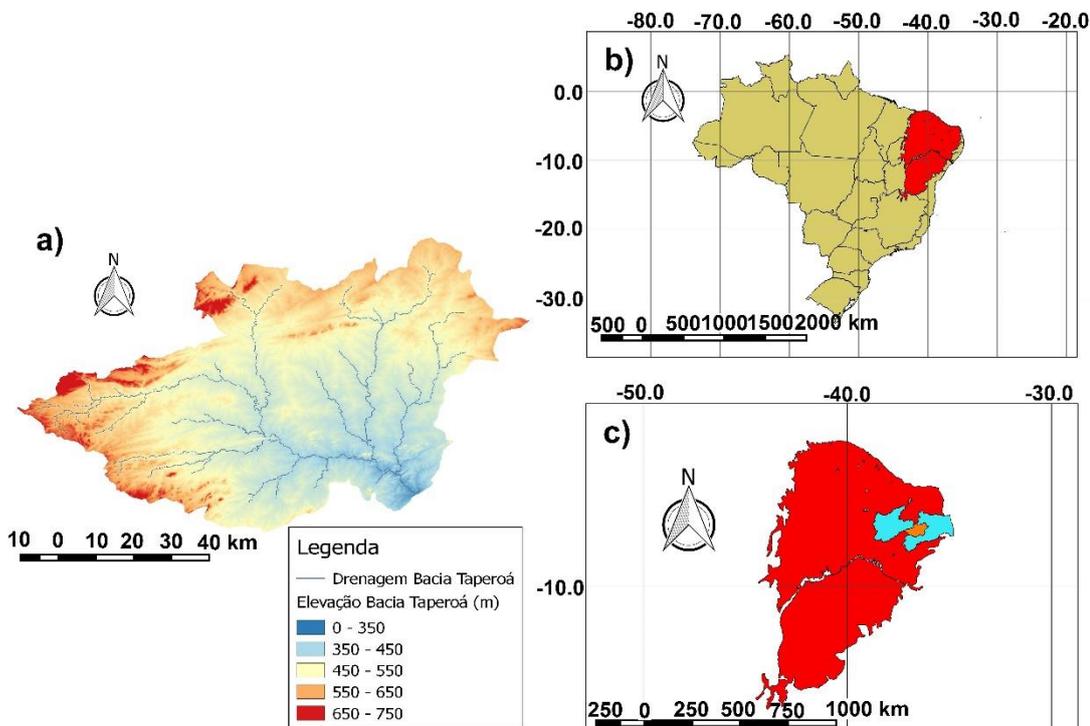


Figura 2: Área de estudo. a) Elevação Bacia do Rio Taperoá. b) Localização Brasil e Caatinga. c) Localização Caatinga, Paraíba e Bacia do Rio Taperoá.

Fonte: Proprio autor.

A vegetação predominantemente na bacia é do tipo caatinga hiperxerófica, entre outras, em sua maior parte de porte baixo, que divide espaço com lavouras de palma forrageira, algodão e agave (estas duas últimas de caráter mais voltado ao comércio), assim como lavouras temporárias de milho e feijão, que representam uma pequena área da bacia (SOUZA et al., 2004).

Os solos predominantes na área de estudo são o Luvissole Crômico Vértico, com fase pedregosa e relevo suave ondulado, Vertissolo, com relevo suave ondulado e ondulado nas partes mais baixas, Neossolo Regolítico e o Planossolo Nátrico, com relevo plano e suave ondulado, no centro-norte e nas áreas mais acidentadas, e o Neossolo Litólico Eutrófico, com fase pedregosa substrato gnaisse e granito (FRANCISCO et al., 2012b).

3.2. Dados LANDSAT

Cunha et al. (2014) afirmam que apesar da cobertura do solo nas regiões semiáridas apresentarem uma alta variabilidade interanual, a maioria dos estudos, em regiões semiáridas, principalmente aqueles que utilizam a modelagem matemática, geralmente não consideram as variações interanuais da cobertura solo. Neste sentido esse trabalho fixou os meses de julho a agosto de cada ano para obtenção de imagens dos satélites LANDSAT de modo a evitar essa variação anual. Souza et al. (2015) afirmam que a partir de fevereiro a estação chuvosa se estabelece na região, se estendendo até o final do primeiro semestre. De agosto a janeiro a estação é seca e as espécies não teriam atividade vegetativa, sendo esse portanto o melhor período para verificar alterações na cobertura do solo, logo após termino do período chuvoso e antes de um período de seca muito grande.

Para que se pudesse cobrir uma janela de interesse de investigação de 30 anos (1986 a 2015) trabalhou-se com dados dos satélites da série LANDSAT 5, 7 e 8. Todas as imagens LANDSAT 5, 7 e 8 adquiridas entre 1984 e 2015 para os meses de julho e agosto na órbita 215 e ponto 065 foram utilizadas. Um total de 162 imagens LANDSAT foram utilizadas na análise, das quais 104 imagens eram do LANDSAT 5, 46 imagens eram de LANDSAT 7 e 12 imagens eram de LANDSAT 8, conforme pode ser observado na tabela no APÊNDICE I.

3.3. Detecção de nuvens e sombras de nuvens

As cenas selecionadas para a área de estudo passaram por um processo que consiste na retirada de sombras e nuvens que causam sérias interferências em imagens orbitais degradando

a resposta radiométrica ou provocando a completa oclusão de feições. Em geral, para imagens de satélite, nuvens provocam muita redução na área útil da imagem, tanto pela oclusão como pela sombra projetada sobre o terreno. Regiões afetadas por sombras têm um comportamento espectral muito próximo daquele apresentado por corpos d'água, tornando muito difícil discriminar entre esses dois elementos.

Para o processo de retirada de nuvens e sombras utilizou-se em todas as imagens o método *Function of Masks* (Fmask) desenvolvido por Zhu e Woodcock (2012). Este método foi elaborado para utilizar uma série de filtros aplicados às sete bandas dos sensores termais a bordo dos satélites LANDSAT 5, 7 e 8, identificando áreas de nuvens e sombras de nuvens de acordo com suas propriedades ópticas e termais, com isso permitindo-se a retirada destes pixels contaminados da cena (ZHU et al. 2015; ZHU et al. 2012).

3.4. *Enhanced Vegetation Index* (EVI)

Para avaliar tendências na dinâmica da vegetação são usados indicadores biofísicos como os Índices de Vegetação (IV). Os principais índices utilizados são o NDVI e o EVI, devido principalmente à sua alta correlação com a quantidade de clorofila, área foliar e capacidade fotossintética (HUETE et al., 2002). Comparado ao NDVI, o EVI é geralmente mais robusto às influências atmosféricas de solo que são vapor de água, ozônio, altura do geopotencial, espessura ótica do aerossol, altimetria, dentre outros e é menos saturável para altos valores de Índice de Área Foliar (IAF) (HUETE et al., 2002); por este motivo o EVI foi o índice de vegetação escolhido para estudo.

Após a identificação dos pixels com presença de nuvens ou sombra de nuvens, foram calculados a radiância espectral e a reflectância de topo da atmosfera (TOA) e o EVI. O índice de vegetação EVI foi obtido a partir da Equação 6, apresentada em Huete et al. (2002).

$$EVI = G \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + C_1 \cdot \rho_3 - C_2 \cdot \rho_1 + L)} \quad (6)$$

onde: G = fator de ganho (2,5), ρ_4 = reflectância vermelho próximo TOA, ρ_3 = reflectância do vermelho TOA, ρ_1 = reflectância no azul TOA, C_1 = coeficiente de correção atmosférica para o vermelho (6) e C_2 = coeficiente de correção atmosférica para o azul (7,5), L = Fator de correção para interferência do solo (1).

Para obter a reflectância TOA, a partir das imagens provenientes dos sensores a bordo dos satélites LANDSAT 5 e 7, é calculada a radiação espectral. Os procedimentos para o cálculo da radiação espectral e da reflectância de TOA são apresentados em detalhes em Chander *et al.* (2009).

Para imagens captadas pelo sensor a bordo do satélite LANDSAT 8, não é necessário calcular radiância espectral. Para calcular a reflectância de TOA das imagens de LANDSAT 8, devem ser seguidos os procedimentos descritos pelo USGS, apresentados na Equação 7. Os coeficientes utilizados nesta equação podem ser obtidos no arquivo de *metadata* (arquivo MTL) que acompanha as imagens LANDSAT.

$$P_{\lambda} = \frac{M_{\rho} \cdot Q_{cal} + A_p}{\sin \theta_{SE}} \quad (7)$$

onde: P_{λ} = reflectância planetária TOA, M_{ρ} = Termo multiplicativo obtido no arquivo de *metadata* (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, em que x é o número da banda), A_p = Termo aditivo obtido no arquivo de *metadata* (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda), Q_{cal} = Número de calibração digital (DN) do produto, θ_{SE} = Ângulo de elevação local.

3.5. Albedo de superfície

O albedo de superfície foi calculado utilizando a seguinte equação (ZHONG e LI, 1988; BASTIAANSEN *et al.*, 1998):

$$A = \frac{(\alpha_{toa} - \alpha_{atm})}{\tau_{oc}^2} \quad (8)$$

onde: α_{toa} = albedo planetário de cada pixel ou albedo sem correção atmosférica, α_{atm} = albedo atmosférico, τ_{oc}^2 = transmitância atmosférica no domínio da radiação solar, que pode ser obtida pela equação (ALLEN *et al.*, 2002 e ALLEN *et al.*, 2007):

$$\tau_{oc} = 0,35 + 0,627 \exp \left[-\frac{0,00146 P_0}{K_t \cos Z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (9)$$

onde: P_0 = pressão atmosférica local (kPa), K_t = coeficiente de turbidez do ar ($K_t = 1,0$ para ar limpo e $K_t = 0,5$ para ar extremamente turvo ou poluído, $K_t = 1,0$ foi utilizado neste estudo), Z = ângulo zênite solar (extraído do arquivo de *metadata* da imagem), W (mm) = água precipitável, obtida em função da RU (% de humidade relativa do ar), P_0 = de acordo com a equação de Allen et al. (2002):

$$W = 0.14e_a P_0 + 2.1 \quad (10)$$

onde: e_a = Pressão parcial do vapor de água atmosférico (KPA).

O valor do albedo atmosférico pode ser obtido através de um modelo de transferência radiativa e, em geral, está situado entre 0,025 e 0,040 (ALLEN *et al.*, 2002). O valor de 0,03 foi adotado no presente estudo.

A determinação do albedo sem correção atmosférica (α_{toa}) foi realizada através da combinação linear da reflectância monocromática (r_b) das bandas reflexivas, de acordo com a seguinte equação:

$$\alpha_{toa} = \sum_i^n (p_b r_b) \quad (11)$$

De forma que para os satélites LANDSAT 5 TM e 7 ETM+ temos:

$$\alpha_{toa} = p_1 \times r_1 + p_2 \times r_2 + p_3 \times r_3 + p_4 \times r_4 + p_5 \times r_5 + p_7 \times r_7 \quad (12)$$

Para o satélite LANDSAT 8 OLI temos:

$$\alpha_{toa} = p_2 \times r_2 + p_3 \times r_3 + p_4 \times r_4 + p_5 \times r_5 + p_6 \times r_6 + p_7 \times r_7 \quad (13)$$

Conforme descrito anteriormente, as reflectâncias dos dados proveniente dos satélites LANDSAT 5 e 7 são obtidos segundo os procedimentos descritos em Chander et al. (2009) e as reflectâncias para o satélite LANDAST 8 segundo a Equação 7.

Para a determinação de cada peso (p_b), em se tratando de satélites LANDSAT 5 TM e 7 ETM+, é necessário obter a constante solar (K_b , $Wm^{-2}\mu m^{-1}$) associada a cada uma das bandas reflexivas disponíveis em Chander et al. (2009) (Tabela 1);

Tabela 1: Constante solar K_b ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)

Bandas		LANDSAT TM		LANDSAT ETM+		LANDSAT OLI	
TM/ETM+	OLI	Kb	rb	Kb	rb	Kb	rb
1	2	1983	0.298221	1997	0.298207	1293.49	0.300104
2	3	1796	0.270098	1812	0.270581	1191.924	0.276539
3	4	1536	0.230997	1533	0.228919	1005.122	0.233199
4	5	1031	0.155051	1039	0.155151	615.0846	0.142706
5	6	220,0	0.033085	230,8	0.034465	152.9657	0.03549
7	7	83,44	0.012548	84,90	0.012678	51.55765	0.300104

Fonte: Adaptado de Chander et al. (2009).

Para o satélite LANDSAT 8 OLI é necessário, para a determinação de cada peso (r_b), estimar a constante solar (K_b , $Wm^{-2}\mu m^{-1}$) associada a cada uma das bandas reflexivas OLI e, para isso, a Equação 14 foi usada de acordo com Chander e Markham (2003).

$$K_b = \frac{\pi L_b}{r_b \cos Z d_r} \quad (14)$$

onde: L_b ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) refere-se a radiância espectral de cada pixel da banda b e d_r é o inverso da distância Terra-Sol no dia de cada imagem, também extraída do arquivo de *metadata*.

$$d_r = \left(\frac{1}{d_{ES}}\right)^2 \quad (15)$$

Para a determinação do L_b de cada pixel e banda, foram utilizados os termos aditivo ($Add_{rad,b}$) e multiplicativo ($Mult_{rad,b}$) em relação ao brilho, também extraídos do arquivo de *metadata* de cada imagem, calculados de acordo com a equação:

$$L_b = Add_{rad,b} + Mult_{rad,b} ND_b \quad (16)$$

O valor de cada peso (p_b) de cada banda espectral foi obtido pela proporção entre o K_b dessa banda e a soma de todos os valores de K_b utilizados no cálculo do albedo, semelhante ao que foi feito com os algoritmos *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e

Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration (METRIC) (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007; TASUMI et al., 2008).

3.6. Valor composto para EVI e Albedo de superfície

Para análises que envolvem um único momento de observação, a presença de pixels contaminados por nuvem pode, parcial ou totalmente, tornar impossível visualizar a área de estudo. Holben (1986) apresenta um procedimento para a composição temporal da informação proveniente de sensores orbitais. Para o aplicativo desenvolvido por Holben (1986), o valor máximo do NDVI foi utilizado para imagens do sensor AVHRR, a fim de reduzir uma grande variedade de problemas, incluindo a contaminação por nuvem no estudo da dinâmica da vegetação. Este método é conhecido como *Maximum NDVI Composite* (MNC) e foi aplicado a outros sensores orbitais e variáveis (HUETE et al., 2002; ROY et al., 2010; SCHAAF et al., 2002).

O método de composição de valores foi aplicado às 162 imagens, de modo que uma imagem por ano foi calculada com o valor EVI e Albedo de superfície máximo e mínimo respectivamente, para cada pixel da cena, sendo possível agrupar até 11 imagens para cada ano estudado. No final do processo, foram obtidas 30 imagens que representam o valor EVI máximo e 30 imagens que representam o albedo de superfície mínimo, para os anos estudados (1986-2015). Todas as composições de imagens e todas as figuras apresentadas nesse trabalho seguiram o sistema de referência de coordenadas WGS 84, EPSG: 4326.

3.7. Tendências na mudança da cobertura do solo

Um dos principais indicadores para avaliar a existência de alterações na produtividade da vegetação é a tendência em longo prazo na dinâmica da vegetação (ERASMI et al., 2014). Análises de tendências de longo prazo, em geral, utilizam algoritmos estatísticos para medir um aumento ou diminuição de valores dentro de séries temporais. Várias análises em escalas regionais e globais mostram que tais tendências de longo prazo não se comportam necessariamente de maneira uniforme no espaço e no tempo (SCHUCKNECHT et al., 2013; VRIELING et al., 2013).

O método mais amplamente aceito em ciências ambientais para verificar a existência de tendências significativas de longo prazo em séries temporais é o teste de Mann-Kendall para as

tendências monótonas (ERASMI et al. 2014). O teste de Mann-Kendall, inicialmente desenvolvido por Mann (1945) e reformulado por Kendall (1975), é um método não-paramétrico que simplesmente compara pares adjacentes de dados para todos os valores de uma série de tempo, calculando essencialmente se um conjunto de valores está aumentando ou diminuindo ao longo do tempo.

O intervalo de dados resultantes da estatística calculada através deste teste é $[-1; 1]$. Se o valor está próximo de 1, existe um aumento contínuo nos dados; valores negativos apontam para uma diminuição geral dos valores e valores em torno de 0 indicam nenhuma tendência consistente. Este teste ainda oferece a possibilidade de aplicar-se um valor a ρ que varia entre 0 e 1, onde ρ expressa o significado da tendência; portanto é um estimador da força da tendência. Quanto mais baixo o valor de ρ , maior é a probabilidade de que existe uma forte tendência nos dados. Aqui, nesse trabalho, foi utilizado um limite para o valor de ρ de 0,05 para mapear exclusivamente tendências significativamente fortes.

Um problema na aplicação dos testes não paramétricos é a sua sensibilidade a autocorrelação em séries temporais. Yue e Wang (2002) descobriram que a autocorrelação altera o significado das tendências nas séries temporais: a alta autocorrelação positiva aumenta a significância estatística gerando falsos resultados para os testes não paramétricos. Devido a este fato, fez-se aqui uso do filtro chamado *prewhitening* (pré-branqueamento) que é o artifício mais comum utilizado para remover esse problema. O filtro *prewhitening* faz com que a correlação da série seja removida nos resíduos de dados, enquanto que a tendência nos dados é preservada (WANG e SWAIL, 2001).

Alterações na vegetação podem ocorrer de três formas diferentes: variação sazonal, mudança gradual e mudança abrupta. (VERBESSELT et al., 2010; ZHU e WOODCOCK, 2014). A variação sazonal é impulsionada principalmente pela fenologia da vegetação que possui um padrão cíclico, por esse motivo ela é muitas vezes tratada como uma fonte de ruído na análise de tendência da vegetação. A mudança gradual é causada pelo crescimento da vegetação, alterações climáticas, degradação da terra, seca prolongada, pragas, bem como outros fatores que mudam a vegetação lentamente, durante longos períodos de tempo (acima de 5 anos) A mudança abrupta, geralmente induzida pela mudança não natural da cobertura do solo, pode ter um grande impacto na dinâmica da vegetação dentro de um período de tempo curto (de 1 a 2 anos) (ZHU et al., 2016). Por esse motivo, a fim de identificar possíveis variações na cobertura do solo, as análises de tendência aqui executadas foram agrupadas em períodos de 5 anos.

Para entender os processos utilizados neste trabalho para identificar mudanças na cobertura do solo, uma ilustração é apresentada na Figura 3, considerando um universo de 80 pixels. No entanto, vale a pena notar que, para este estudo, as análises são realizadas para toda a área de estudo, correspondendo a mais de 6,3 milhões de pixels.

Na Figura 3, os pixels que apresentaram tendência negativa segundo o EVI são representados pela cor vermelha, enquanto que os pixels que apresentaram tendência positiva segundo EVI são representados pela cor verde. Cada retângulo compreende 80 pixels e representa os períodos em intervalos de 5 anos. Observa-se que cada pixel pode ter mais de um estado ao longo do período de análise. Portanto, além do período em que a mudança ocorreu, o número de vezes que um determinado pixel foi alterado foi contado, contando o número de períodos em que o pixel foi afetado com ganho e/ou perda de cobertura do solo.

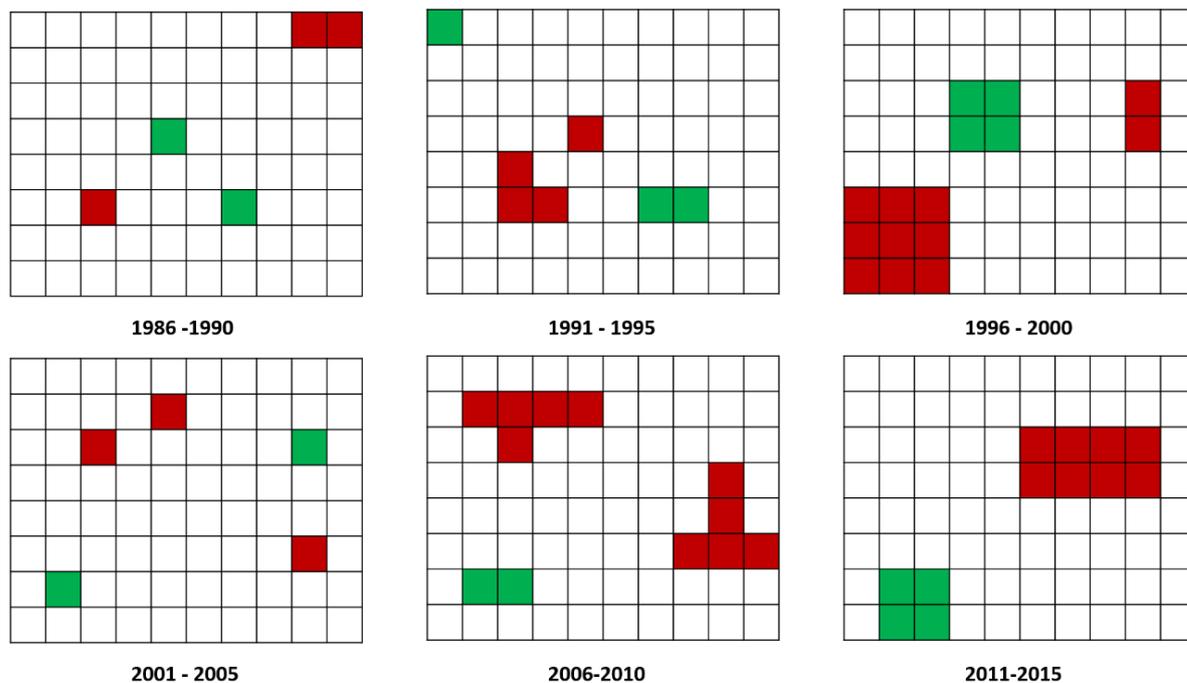


Figura 3: Demonstração de períodos que passaram pela perda (em vermelho) e ganho (em verde) da cobertura do solo.

Fonte: Proprio autor.

Na Figura 4 podemos observar dois *rasters* do processo; as informações dos períodos que foram alterados. Para simplificar a demonstração, foram escolhidos os pixels com perda de cobertura do solo, que estão em vermelho na Figura 3. O retângulo da esquerda indica os períodos em que houve perda de cobertura do solo (Figura 4). Os pixels que passaram por mais de um período de alteração são exibidos como o período mais recente. O retângulo apresentado

no lado direito podemos observar que o número de mudanças que um pixel particular sofreu ao longo dos anos estudados.

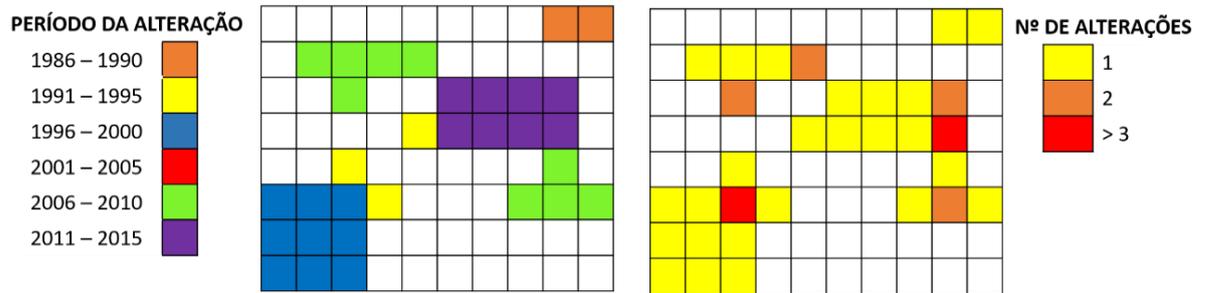


Figura: 4: Demonstração do período de mudança negativa e número de ocorrências.
 Fonte: Proprio autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Identificação e extração de nuvens e sombra de nuvens

Neste trabalho o algoritmo Fmask foi aplicado às 162 imagens dos satélites LANDSAT 5, 7 e 8, conforme descrito anteriormente. Para exemplificar a capacidade de identificação das nuvens e sombra de nuvens pelo algoritmo Fmask, é apresentado na Figura 5 o EVI de cinco imagens para ano de 1987. Os pixels contaminados por nuvens e sombra de nuvens nas imagens de composição colorida (imagens na fila superior) não tiveram valores de EVI para o mesmo momento e local, como pode ser observado nas imagens corrigidas (fila inferior), esses pixels tiveram os valores substituídos por NA (*Not Available*).

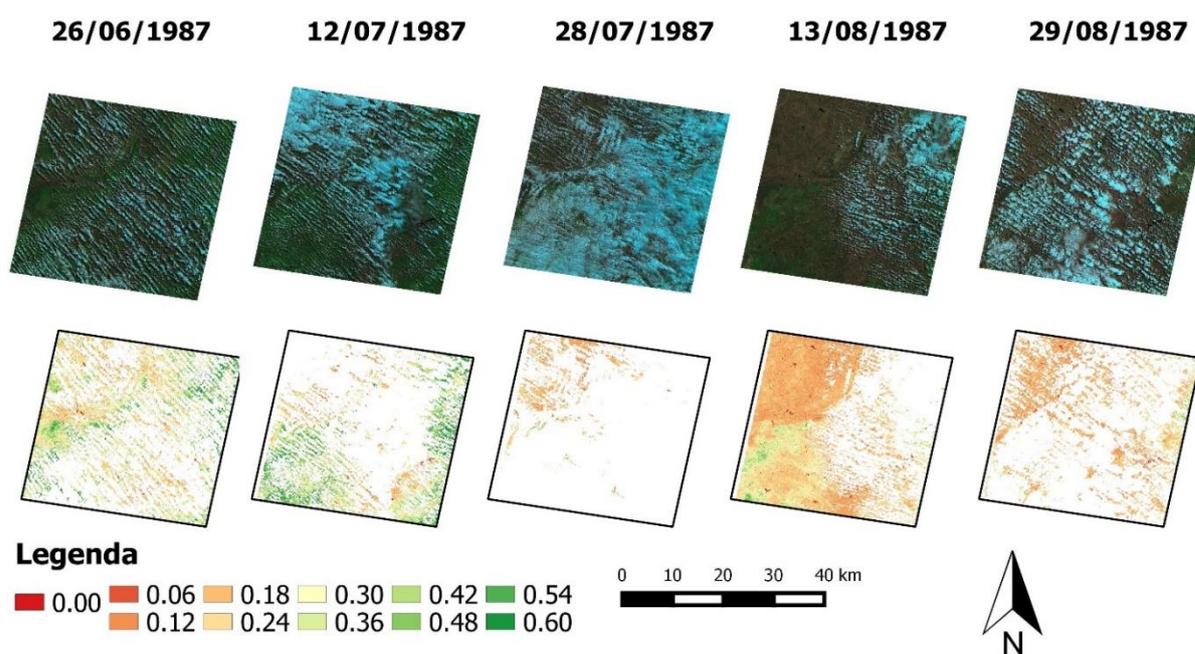


Figura 5: Efeito do algoritmo Fmask sobre as imagens de EVI
Fonte: Proprio autor.

A identificação dos pixels contaminados por nuvens e sombra de nuvens apresenta uma grande contribuição aos produtos derivados de imagens LANDSAT, pois possibilita a aplicação de técnicas como a *Maximum Value Composite* (MaxVC) para as imagens de EVI, permitindo a geração de uma imagem de EVI resultante de uma sequência de passagens do sensor na região de estudo. Para o ano de 1987 podemos observar um exemplo da condição típica encontrada com relação a disponibilidade de pixels de cobertura da área com EVI para as 30 imagens

geradas, representando os 30 anos deste estudo com relação ao preenchimento de pixel para a bacia (Figura 6).

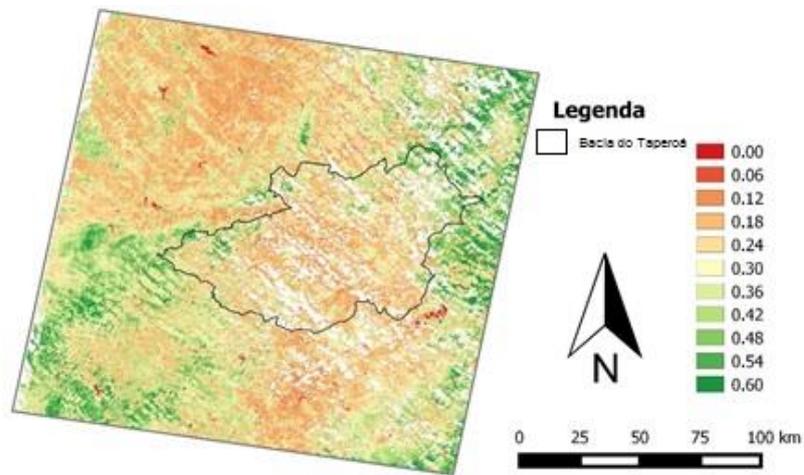


Figura 6: Valor máximo composto pelo EVI para o ano de 1987
Fonte: Proprio autor.

Em se tratando de albedo de superfície, quanto mais alta é a exposição do solo, mais elevado é o seu valor, sendo assim, a melhor condição de cobertura da superfície do solo se apresenta com o mais baixo valor de albedo de superfície. Então, para assumir o valor ótimo do solo com relação ao albedo de superfície foi aplicada a técnica de *Minimum Value Composite* (MinVC), assim gerando uma série de imagens de albedo de superfície. Na Figura 7 podemos observar para o ano de 1987 um exemplo da condição típica encontrada com relação a disponibilidade de pixels de cobertura da área com albedo de superfície para as 30 imagens geradas, representando os 30 anos deste estudo com relação ao preenchimento de pixel para a bacia.

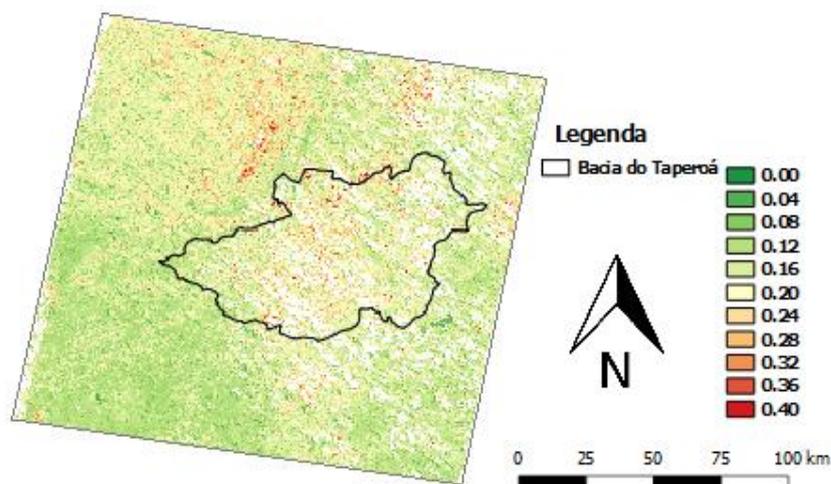


Figura 7: Valor mínimo composto pelo Albedo de superfície para o ano de 1987
Fonte: Proprio autor.

As 162 imagens foram agrupadas em 30 imagens resultantes, uma para cada ano da série temporal no período de 1986 a 2015, assim preenchendo as lacunas deixadas pela retirada de nuvens e suas sombras. Onde ocorreu sobreposição de pixels, foi assumido o valor ótimo para cada indicador biofísico, ou seja, o maior valor de EVI, dentre os pixels sobrepostos, o que indica a melhor condição de cobertura do solo e o menor valor de albedo de superfície, dentre os pixels sobrepostos, indicando a melhor cobertura do solo.

4.2. A questão da resolução espacial

Os sensores tradicionalmente utilizados nas análises de tendência para cobertura do solo apresentam resolução espacial que vão de 500 m a 4 km e período de revisitação diário (ANYAMBA et al., 2014; ERASMI et al., 2014; HIGGINBOTTOM e SYMEONAKIS, 2014; FENSHOLT et al., 2013; FENSHOLT et al., 2012; WESSELS et al., 2012). No entanto, apesar da alta resolução temporal ajudar na compreensão das variações temporais, a baixa resolução espacial desses sensores captura variações que nem sempre são compatíveis com a escala de intervenção humana, que em alguns casos modifica a paisagem com pequenas intervenções e inclusive dificultam a sua avaliação a partir de feições identificadas como alteradas na superfície terrestre (STROPPIANA et al., 2012; LAMBIN et al., 2003).

Os sensores de média resolução espacial, como os sensores abordo da série de satélites LANDSAT, permitem o monitoramento em nível de pequenas propriedades rurais e apresentam um histórico de visualização da superfície terrestre superior a 30 anos.

Na Figura 8 podemos observar uma área (12 km x 12 km) na região central da bacia do Taperoá. Segundo Huete *et al.* 2002, a resolução espacial dos dados gerados a partir de imagens dos satélites MODIS é 250 m x 250 m, 500 m x 500 m ou 1 Km x 1 Km e segundo Tucker *et al.* 2005, a resolução espacial de conjuntos de dados produzido a partir de imagens dos satélites AVHRR é de 1 Km x 1 Km podendo chegar a 4 Km x 4 Km, como forma de comparar as resoluções espaciais das imagens realizou-se a sobreposição de dois *grids*, representando sensores de 500 m x 500 m (MODIS) e 4 Km x 4 Km (AVHRR). Na Figura 8, o lado esquerdo apresenta mudanças negativas e o lado direito as mudanças positivas, em intervalos de 5 anos.

Observa-se na Figura 8 que as mudanças positivas e negativas encontradas na área em destaque apresentam visualmente alguns agrupamentos espaciais de pixels pertencentes a mesma classe e, mesmo nestes casos, a área ocupada é, quase sempre, inferior aos pixels de 500 m x 500 m e 4 Km x 4 Km. Além disso, para um mesmo pixel do *grid* de 4 Km x 4 Km da

Figura 8 é possível observar mudanças positivas e negativas; essas mudanças podem ser mascaradas quando analisadas por sensores de baixa resolução espacial.

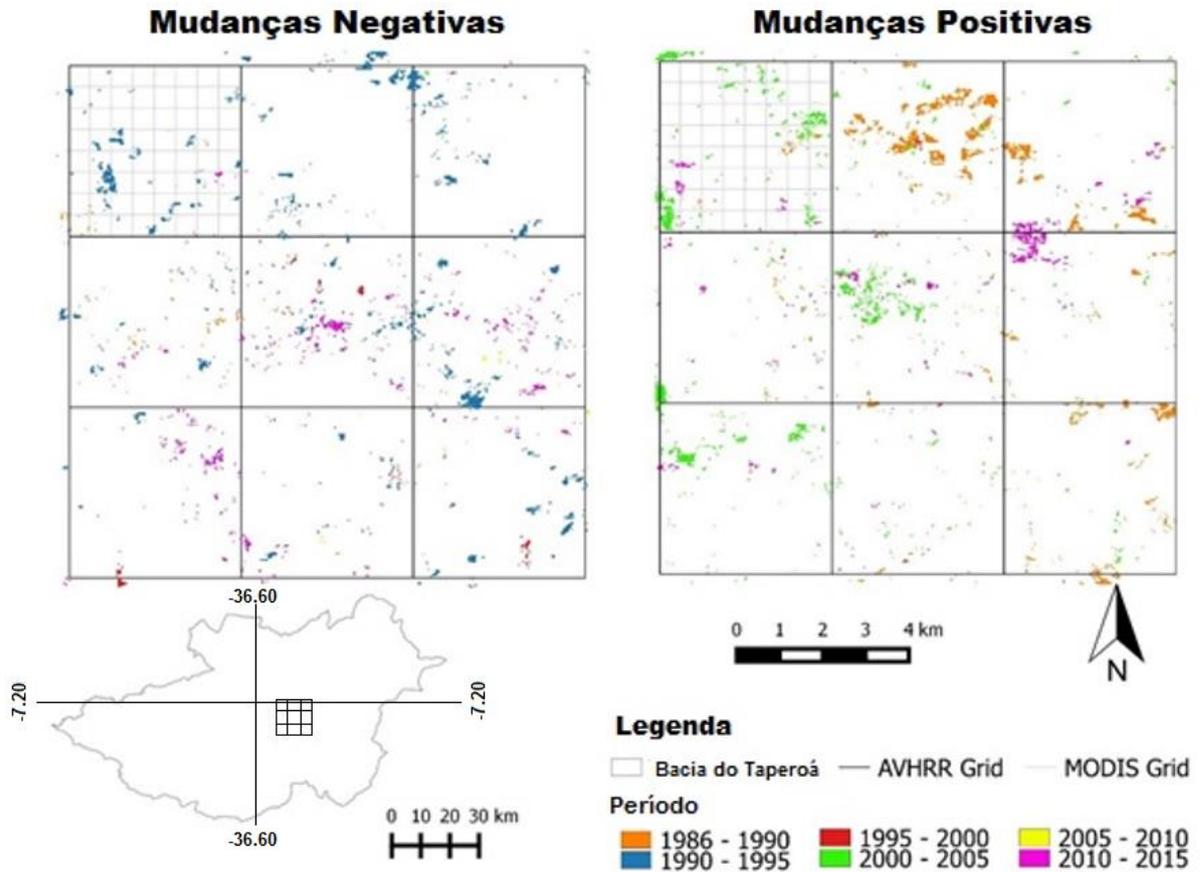


Figura 8: Sobreposição dos períodos de mudança com *grids* MODIS e AVHRR
Fonte: Proprio autor.

4.3. Alterações na cobertura do solo segundo o EVI

O método MaxVC foi aplicado às 162 imagens, de modo que uma imagem por ano foi calculada com o valor EVI máximo, assim foram obtidas 30 imagens, uma para cada um dos anos estudados (1986-2015), que representam o valor EVI ótimo de cobertura do solo (Figura 9).

Nota-se que ao utilizar o algoritmo Fmask para retirada de pixels contaminados com nuvens e sombras de nuvens, apenas para o ano de 1994, os pixels remanescentes não foram suficientes para cobrir a maior parte da área de estudo, porém como as avaliações se dão em agrupamentos de períodos de 5 anos a ausência desses dados não compromete os resultados em se tratando de identificar alterações na cobertura do solo.

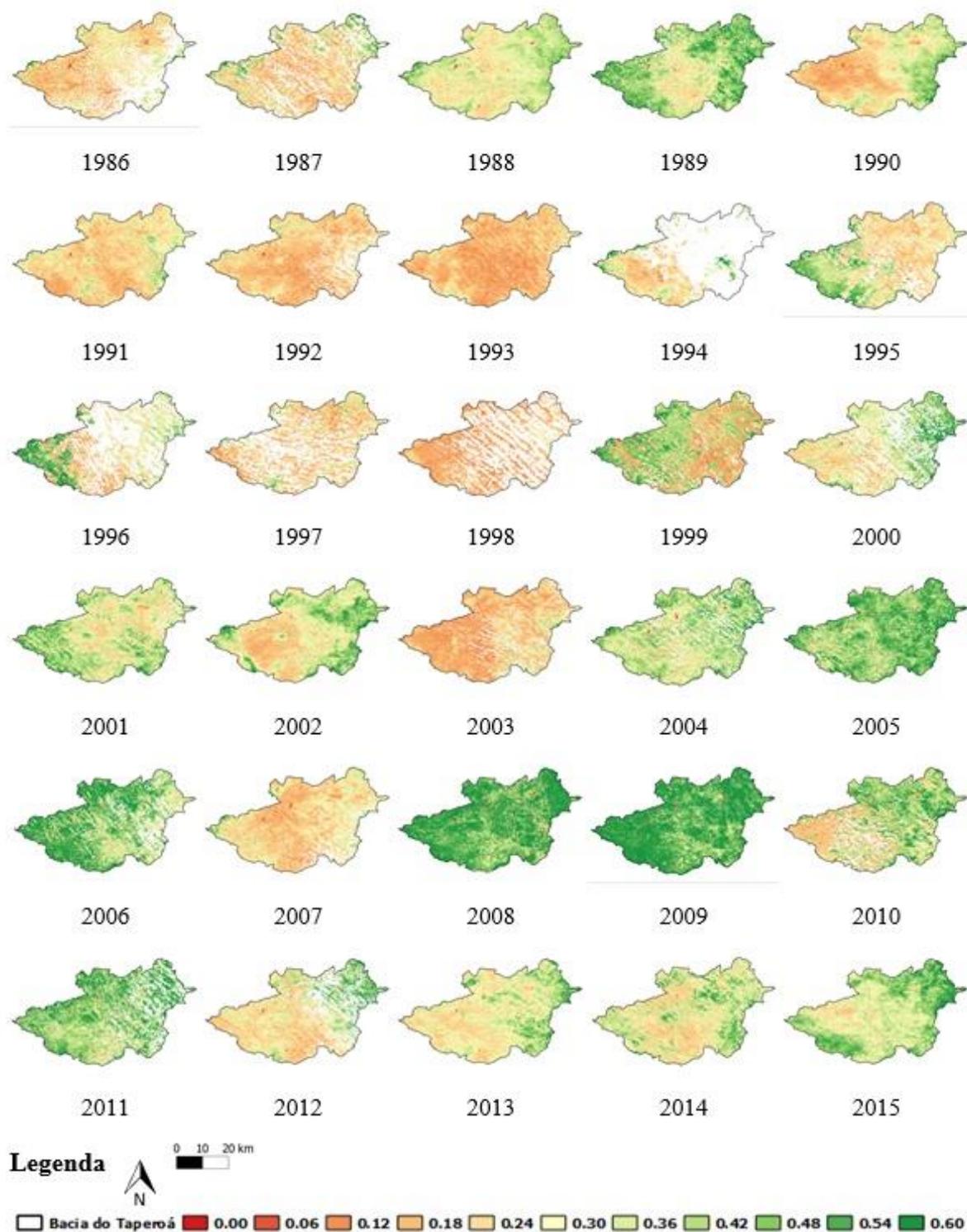


Figura 9: EVI de cada um dos 30 anos da série
 Fonte: Proprio autor.

Na Figura 10 são apresentadas as alterações na cobertura do solo segundo o EVI para toda a bacia, sendo possível observar uma predominância de mudanças positivas, com exceção do quinquênio 2006-2010 que foi o de menor alteração. As maiores alterações ocorreram no

quinquênio 1991-1995, com 50,9 Km² de mudança positiva, correspondendo a aproximadamente 0,9% da área total da bacia, e 47,5 Km² de área de mudança negativa, correspondendo a aproximadamente 0,8% da bacia.

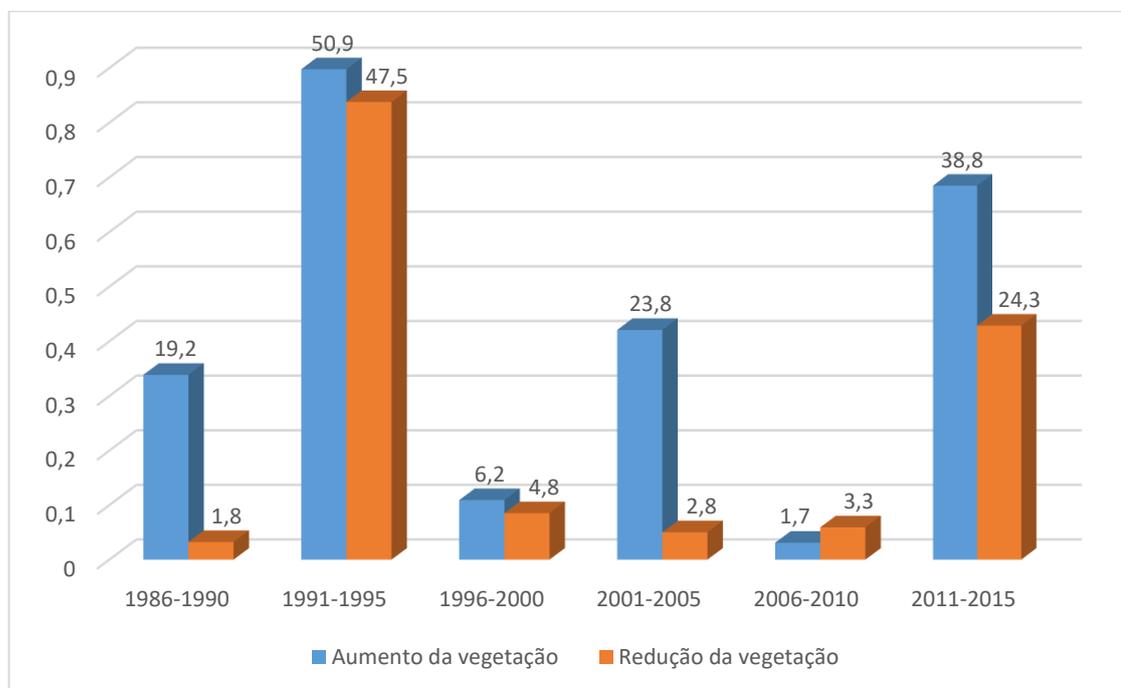


Figura 10: Alterações na vegetação (km²) identificadas pelo EVI
Fonte: Proprio autor.

No estudo desenvolvido por Erasmi et al. (2014) com foco na região do Seridó, situada entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, foi observada uma tendência de aumento da cobertura do solo no período de 1982 a 2010. A bacia do Taperoá encontra-se próxima à região do Seridó e, apesar de apresentarem atividades econômicas distintas, o comportamento observado para cobertura do solo foi semelhante.

Entretanto, como observado neste trabalho, a média resolução espacial permite identificar que, apesar da predominância das mudanças positivas, houve alterações negativas e em três quinquênios são equivalentes às alterações positivas. Além disso, é possível observar na Tabela 2 o número de ocorrências de mudanças positivas e negativas para cada pixel na área de estudo conforme o EVI. Observa-se que a maior parte da bacia não foi alterada no período que compreende este estudo e 137,32 km² e 83,97 km² foram identificados com pelo menos uma alteração positiva ou negativa, respectivamente.

Tabela 2: Número de ocorrências para a Bacia do Rio Taperoá segundo EVI

Mudanças	Número de ocorrências (Km ²)			
	0	1	2	3
Negativas	5582,19	83,97	0,30	0,00
Positivas	5527,50	137,32	1,64	0,01

Fonte: Proprio autor.

4.4. Alterações na cobertura do solo segundo o albedo de superfície

O método MinVC foi aplicado às 162 imagens, de modo que uma imagem por ano foi calculada com o valor de Albedo de superfície mínimo, sendo assim obtidas 30 imagens, uma para cada um dos anos estudados (1986-2015), que representam o valor de Albedo de superfície ótimo de cobertura do solo (Figura 11).

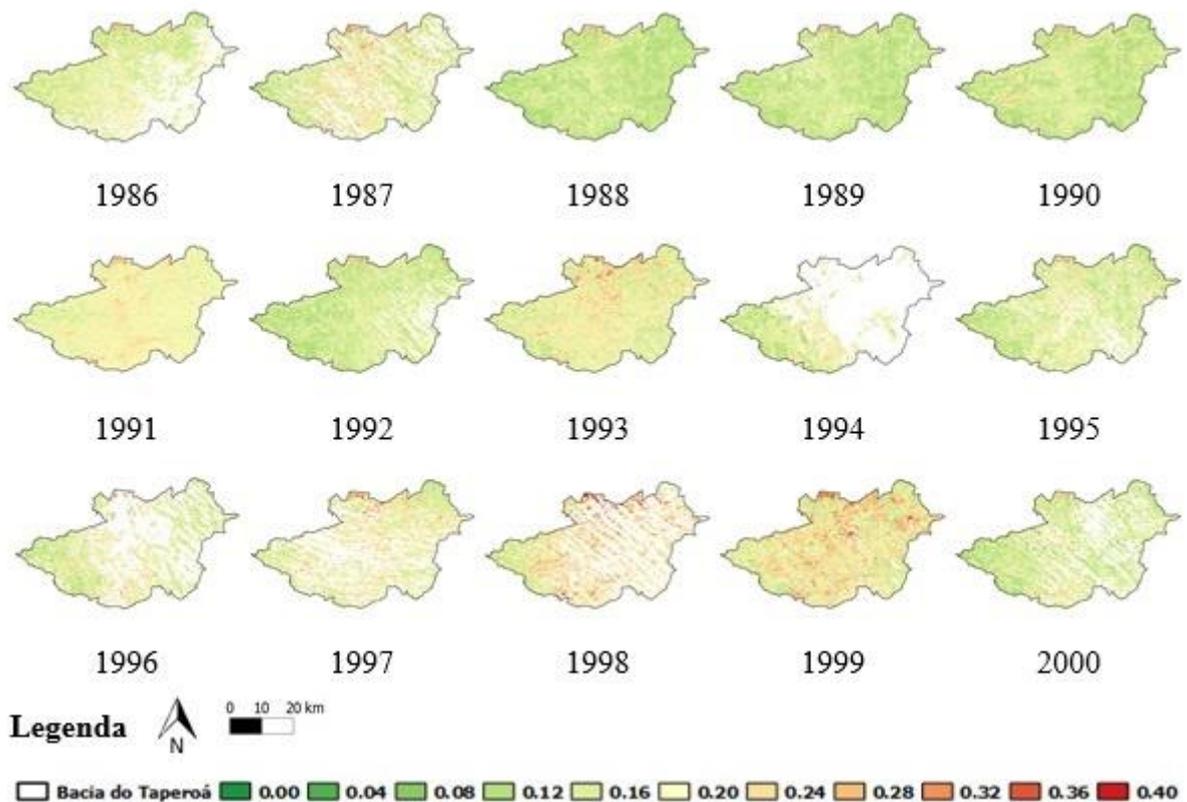


Figura 11: Albedo de superfície de cada um dos 30 anos da série

Fonte: Proprio autor.

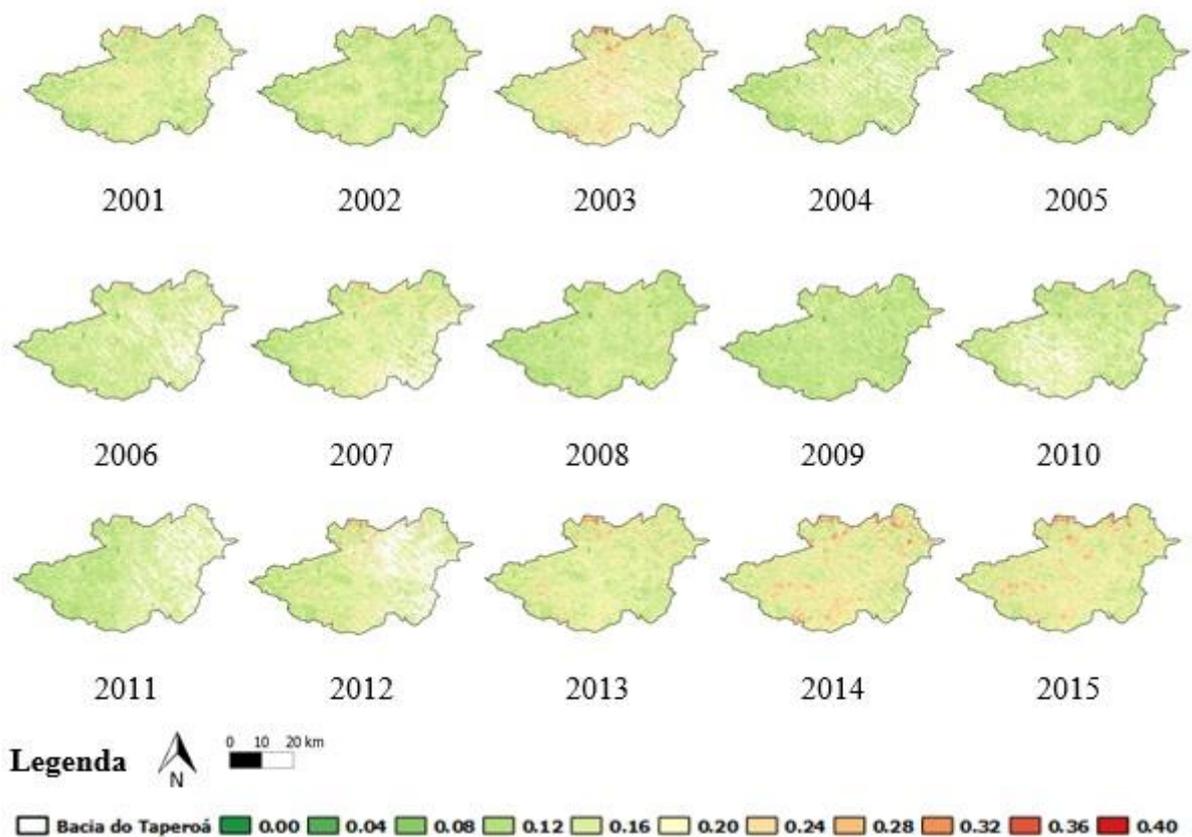


Figura 11: Albedo de superfície de cada um dos 30 anos da série (continuação)
 Fonte: Proprio autor.

A Figura 12 mostra as alterações na cobertura do solo ocorridas segundo o Albedo de superfície, expondo que o período em que ocorreu maior alteração na vegetação foi no quinquênio 2011-2015 com 409 Km² de área de vegetação reduzida, correspondendo a aproximadamente 7% da área total da bacia; já os períodos em que ocorreram maior aumento na vegetação foram os quinquênios 1986-1990 e 2001-2005 com 43,6 Km² e 45,5 Km² de área, respectivamente.

Na Tabela 3 pode-se observar o número de ocorrências de mudanças positivas e negativas para cada pixel na área de estudo segundo albedo de superfície. Observa-se novamente que a maior parte da bacia não sofreu alteração no período de 1986 a 2015. Aproximadamente 122,22 km² da bacia tiveram ao menos um periodo de 5 anos de tendência positiva de crescimento na cobertura do solo e aproximadamente 454,66 km² da bacia sofreu pelo menos um periodo de 5 anos de tendência de alteração negativa na cobertura do solo, mostrando que, da área alterada, a maior parte sofreu perda na cobertura do solo segundo albedo de superfície.

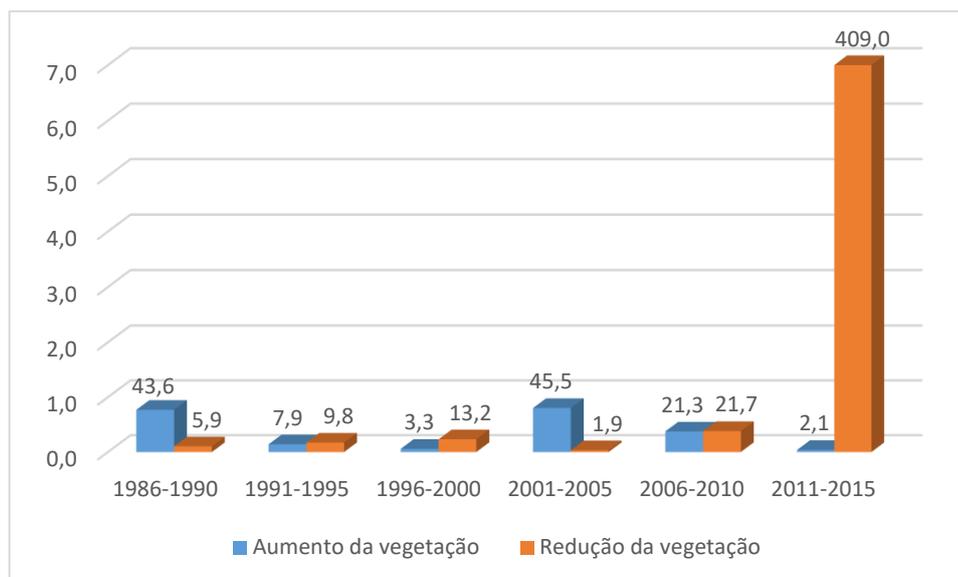


Figura 12: Alterações na vegetação (km²) identificadas pelo Albedo de superfície
 Fonte: Proprio autor.

Tabela 3: Número de ocorrências para a Bacia do Rio Taperoá segundo Albedo de superfície

Mudanças	Número de ocorrências (Km ²)			
	0	1	2	3
Negativas	5208,46	454,66	3,33	0,01
Positivas	5543,46	122,22	0,78	0,00

Fonte: Proprio autor.

Comparando EVI e Albedo de superfície, em se tratando do número de períodos onde ocorreram alterações na cobertura do solo, sejam elas positivas ou negativas, é possível notar que em um contexto geral para o período de 30 anos em estudo o albedo de superfície mostrou-se mais sensível às mudanças em períodos de 5 anos.

Um aspecto bastante interessante ao trabalhar com imagens de média resolução é a possibilidade de realizar avaliações visuais a partir de feições identificadas como alteradas na superfície, podendo as feições serem identificadas na própria imagem de média resolução em composições coloridas ou a partir de visita de campo.

Apesar da análise de tendência ser recorrente em muitos estudos que analisam a dinâmica da cobertura do solo (IBRAHIM et al., 2015, ANYAMBA et al., 2014; HIGGINBOTTOM e SYMEONAKIS, 2014), a avaliação a partir de feições observadas como alteradas na superfície não é executada. Em muitos casos seria inviável a aplicação deste

procedimento de avaliação, pois o tamanho dos pixels dos sensores utilizados não permite este nível de avaliação.

Para os meses de observação, ocorreram anos secos e/ou anos úmidos, este fato pode ter induzido uma tendência nos resultados obtidos, pois um ano chuvoso ou seco pode induzir a uma resposta significativa para todo o quinquênio.

4.5. Avaliação em áreas pilotos

Na Figura 13 podemos observar duas áreas pilotos identificadas utilizando imagens do satélite LANDSAT 5 na região de estudo como áreas que passaram por processo de alteração. Neste caso, para o quinquênio 1986-1990, foi observado que para o ano de 1988 houve desmatamento nas duas áreas pilotos. Como pode ser visto na Figura 14, esta alteração ocorreu de maneira abrupta, em um curto espaço de tempo (aproximadamente 1 ano), se tratando, portanto, de uma alteração antrópica.

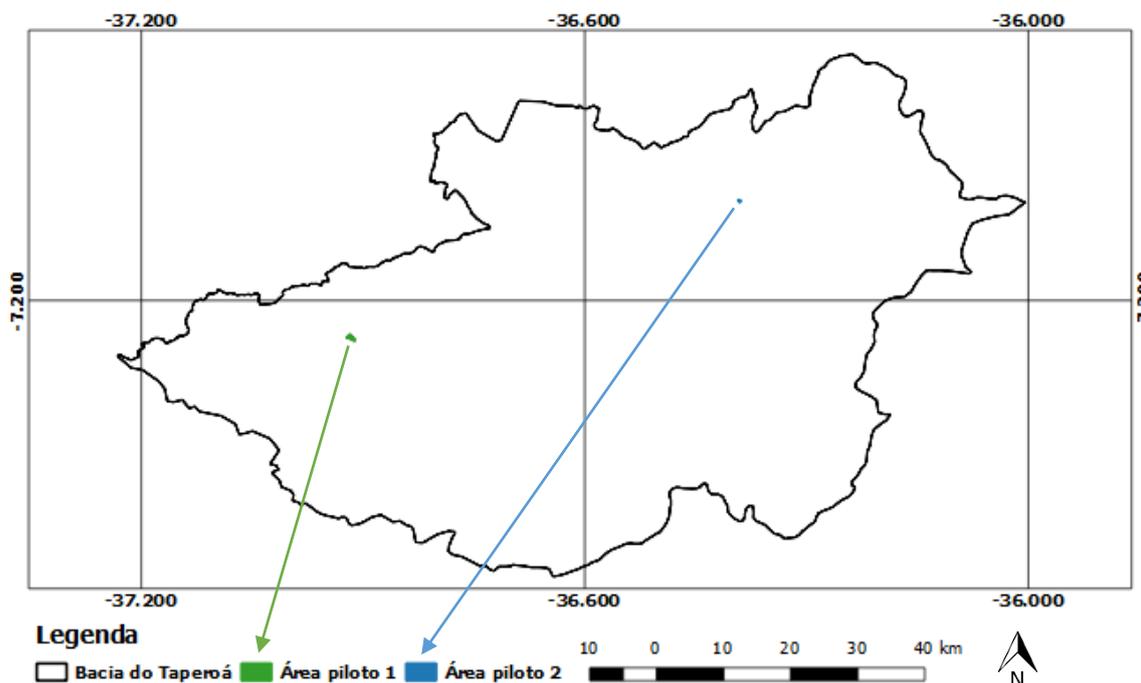


Figura 13: Mapa da bacia do Taperoá com a localização das duas áreas pilotos.
Fonte: Proprio autor.

A Figura 15 apresenta o EVI para cada ano da série temporal estudada na área piloto 1. Assim foram obtidas 30 imagens, uma para cada um dos anos estudados (1986-2015), que

representam o valor EVI ótimo de cobertura do solo para a área piloto 1. A Figura 16 apresenta EVI para cada ano da série temporal estudada na área piloto 2.

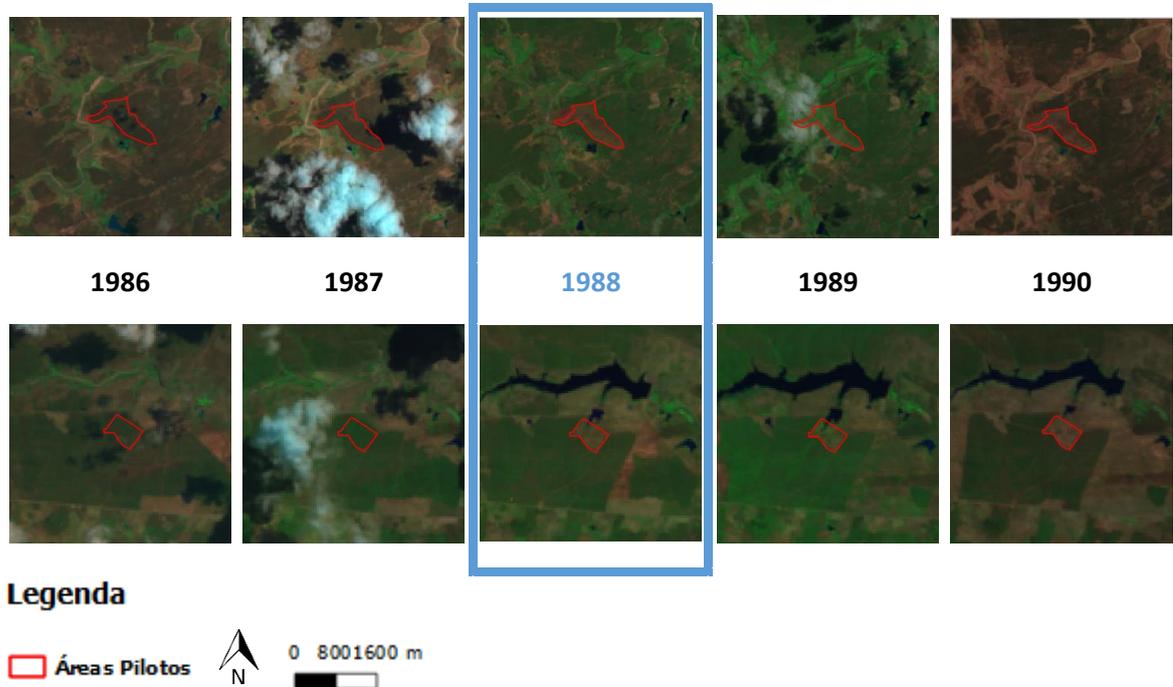


Figura 14: Imagens de satélite para as áreas pilotos.
Fonte: Proprio autor.

Devido à presença de nuvens e suas sombras em alguns pixels pertencentes as áreas pilotos em estudo, estes tiveram que ser retirados (como pode ser visto no ano de 1997 na Figura 15). A ausência destes, porém, não acarretou em perda na qualidade da avaliação quanto às alterações na cobertura do solo bem como na avaliação do desempenho ou da capacidade dos indicadores biofísicos EVI e Albedo de superfície para identificar alterações na cobertura do solo.

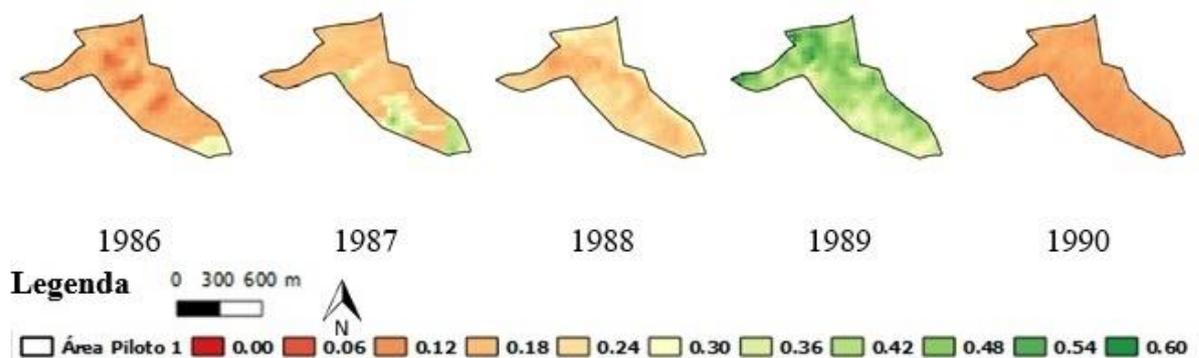


Figura 15: EVI para cada ano da série temporal na área piloto 1.
Fonte: Proprio autor.

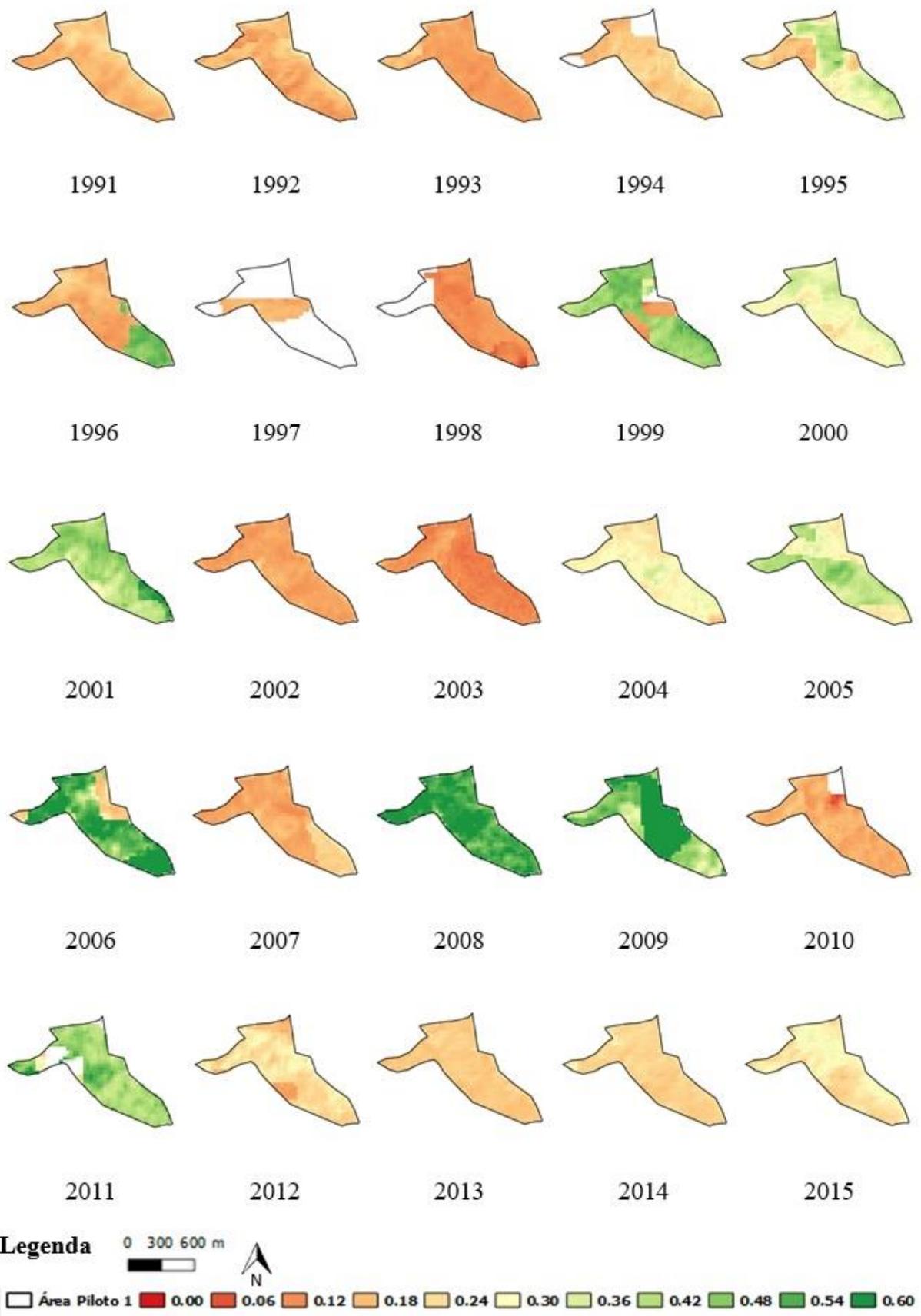


Figura 15: EVI para cada ano da série temporal na área piloto 1 (continuação).
 Fonte: Proprio autor.

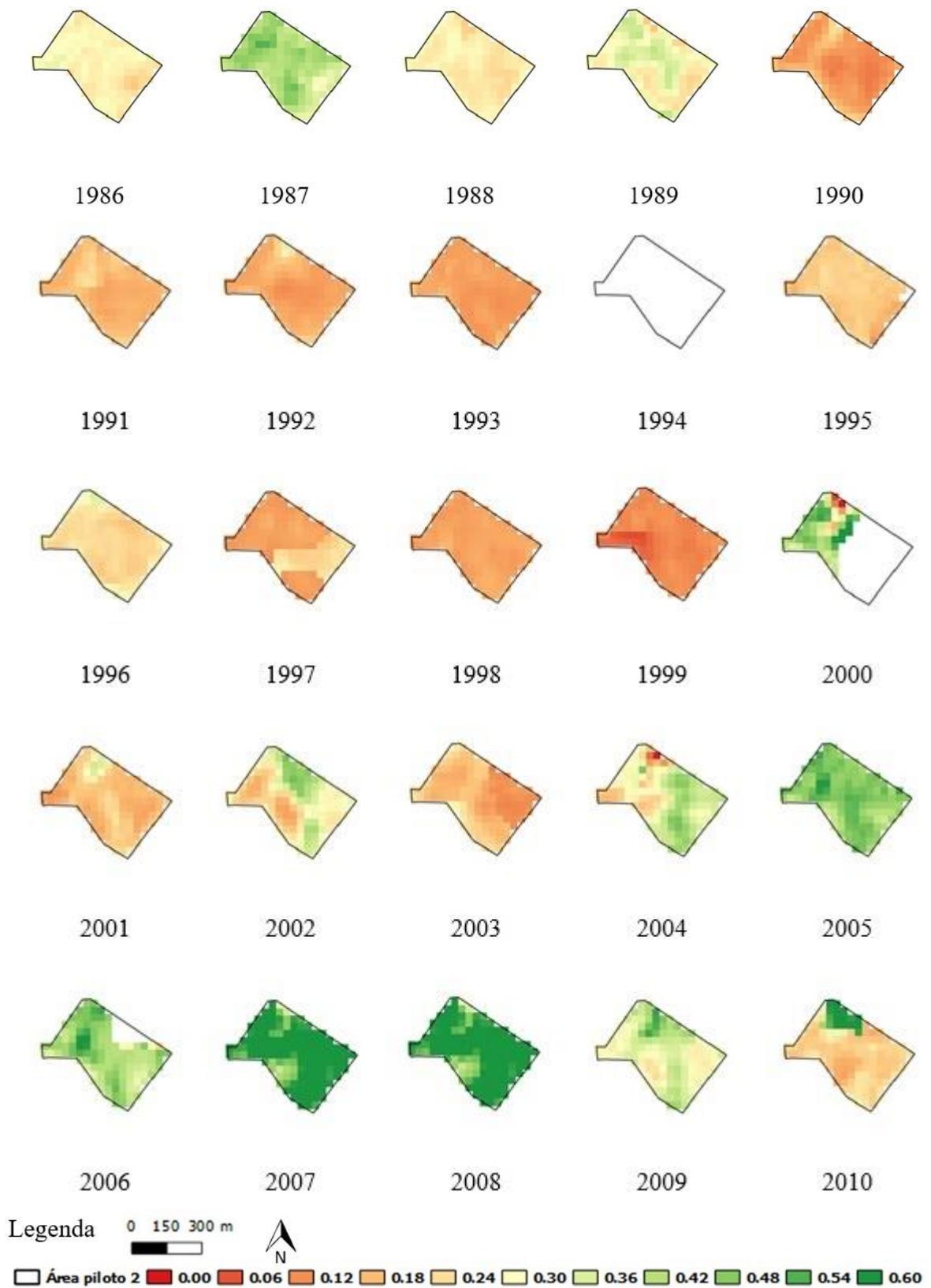


Figura 16: EVI para cada ano da série temporal na área piloto 2.
 Fonte: Proprio autor.

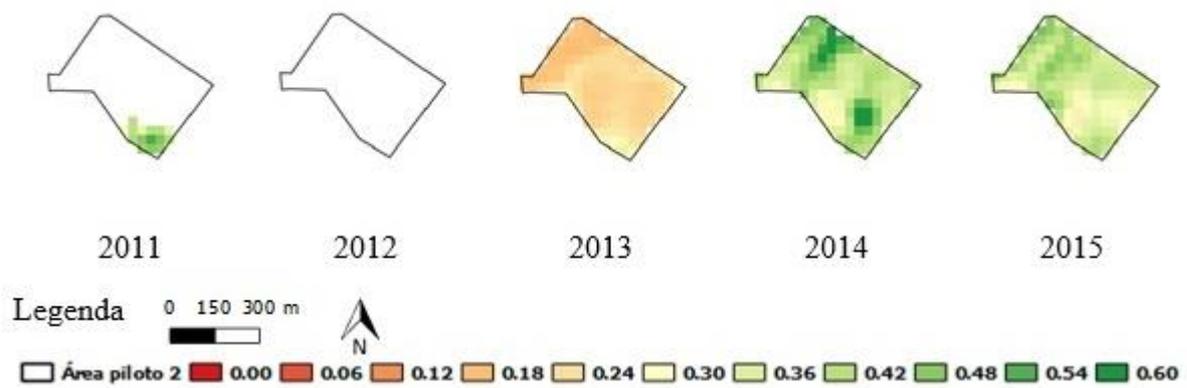


Figura 16: EVI para cada ano da série temporal na área piloto 2 (continuação).

Fonte: Proprio autor.

Na Figura 17 são mostrados os valores de tendências negativas de mudanças na cobertura do solo na série temporal de 30 anos segundo EVI, ou seja, perda na cobertura do solo para as duas áreas pilotos. Nela pode ser visto que o EVI não conseguiu representar o período onde houve a mudança abrupta da vegetação.

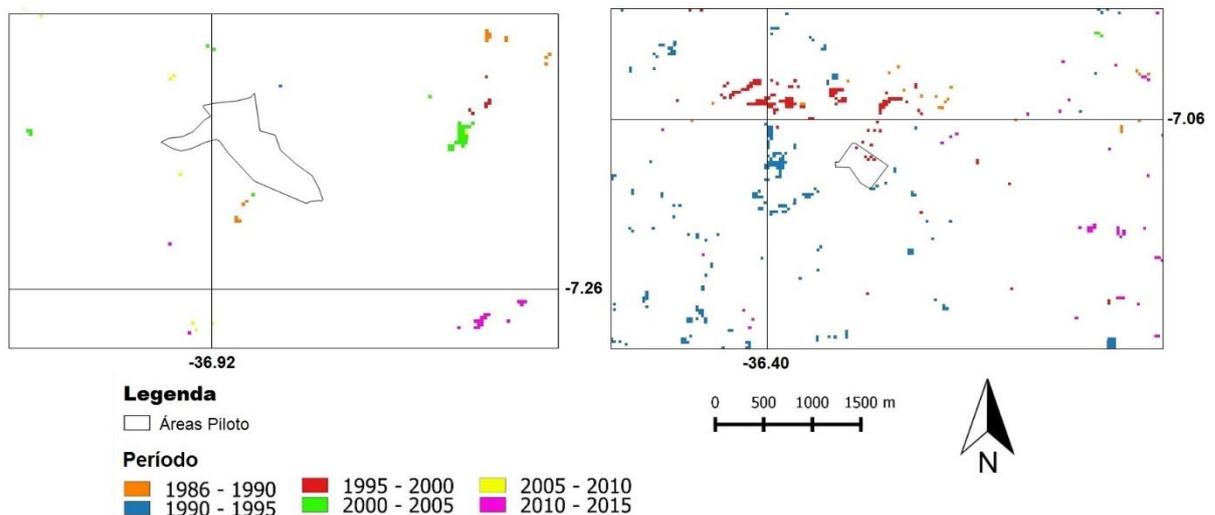


Figure 17: Áreas pilotos de visualização segundo EVI.

Fonte: Proprio autor.

Assim como afirmam Neeti e Eastman (2011), este fato demonstra a importância de investigar os resultados de mudanças na análise de tendências de longo prazo, seja por dados de campo ou com as próprias imagens de satélites utilizadas como base para o cálculo dos índices. Zhu et al. (2016) em seu trabalho usando dois índices de vegetação, o NDVI e EVI, apresentaram um método capaz de incluir os efeitos das mudanças de cobertura do solo na

avaliação das tendências na vegetação, separando os efeitos das mudanças bruscas e graduais, e fornecendo informações sobre o período em que cada tendência ocorreu.

Ao utilizar o algoritmo CCDC (*Continuous Change Detection and Classification*) para dados LANDSAT, Zhu et al. (2016) observaram que o EVI é o melhor indicador para investigar os efeitos das mudanças de cobertura do solo na avaliação das tendências na vegetação, tanto para mudanças bruscas quanto graduais. Os resultados aqui apresentados contradizem os resultados de Zhu et al. (2016) e apontam para necessidade de continuidade nas pesquisas para identificação de outros indicadores de mudança.

A Figura 18 apresenta o albedo de superfície para cada ano da série temporal estudada na área piloto 1 e a Figura 19 apresenta o albedo de superfície para cada ano da série temporal estudada na área piloto 2.

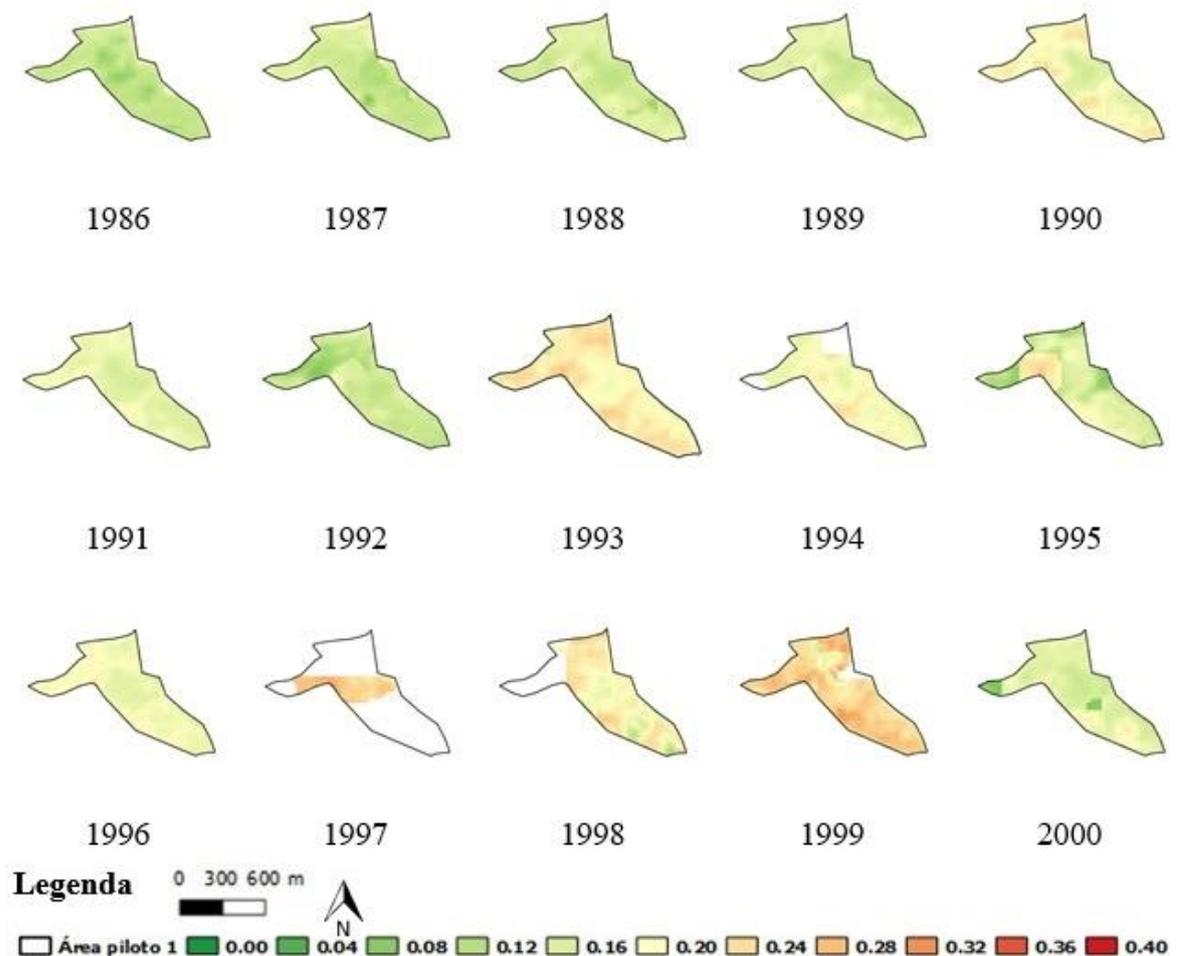


Figura 18: Albedo de superfície para cada ano da série temporal na área piloto 1.

Fonte: Proprio autor.

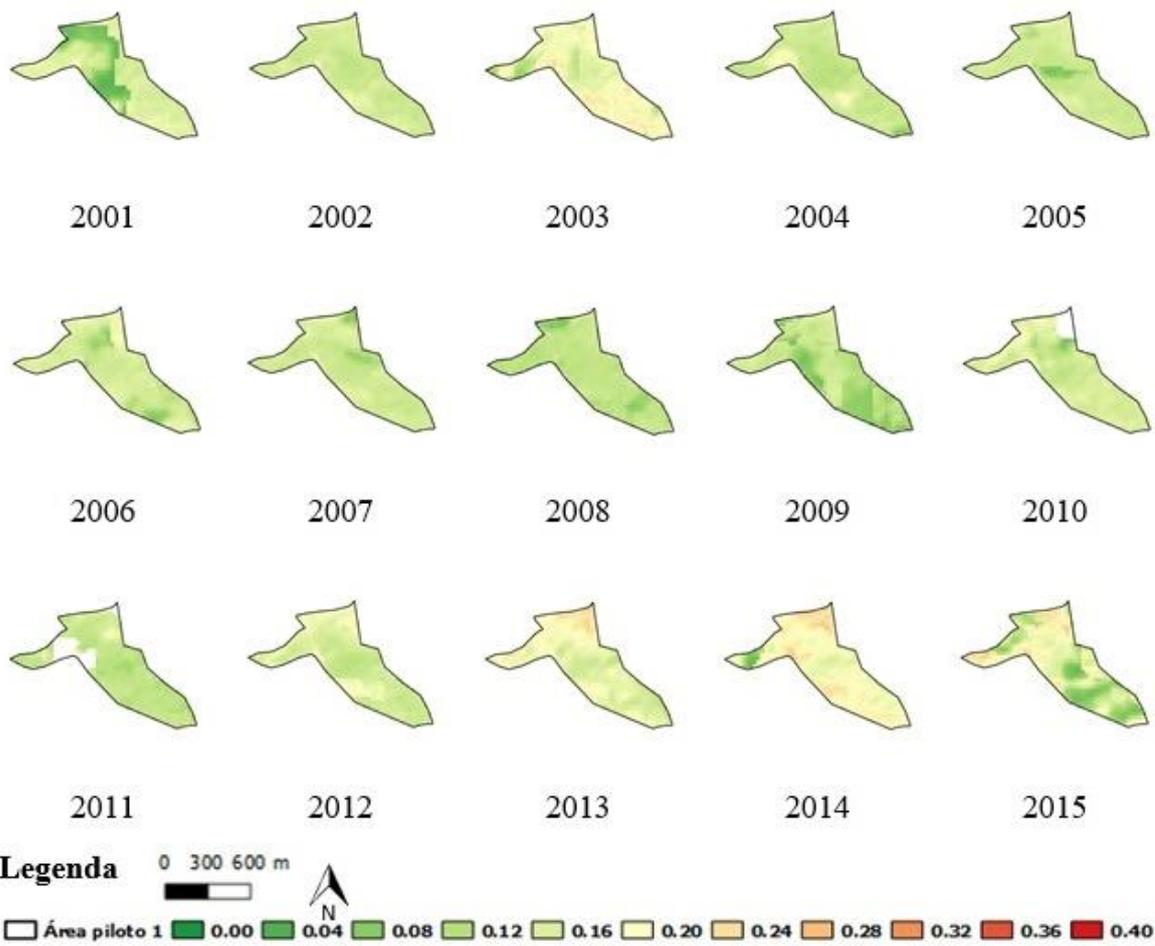


Figura 18: Albedo de superfície para cada ano da série temporal na área piloto 1 (continuação)
 Fonte: Proprio autor.

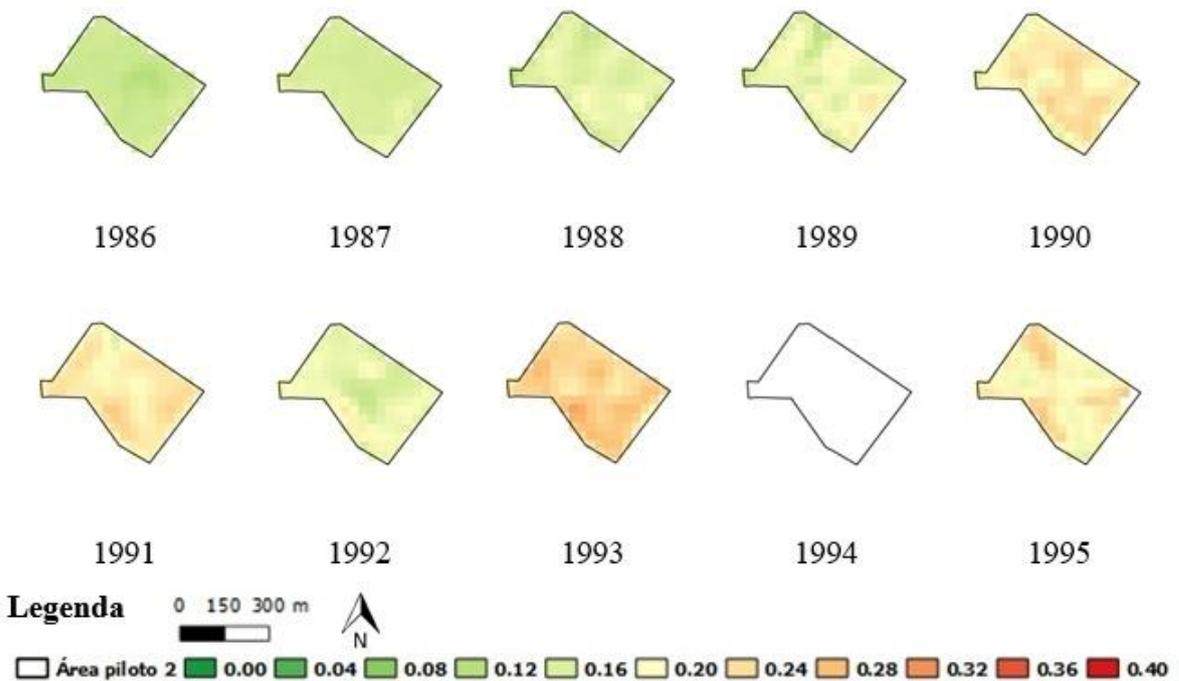


Figura 19: Albedo de superfície para cada ano da série temporal na área piloto 2.
 Fonte: Proprio autor.

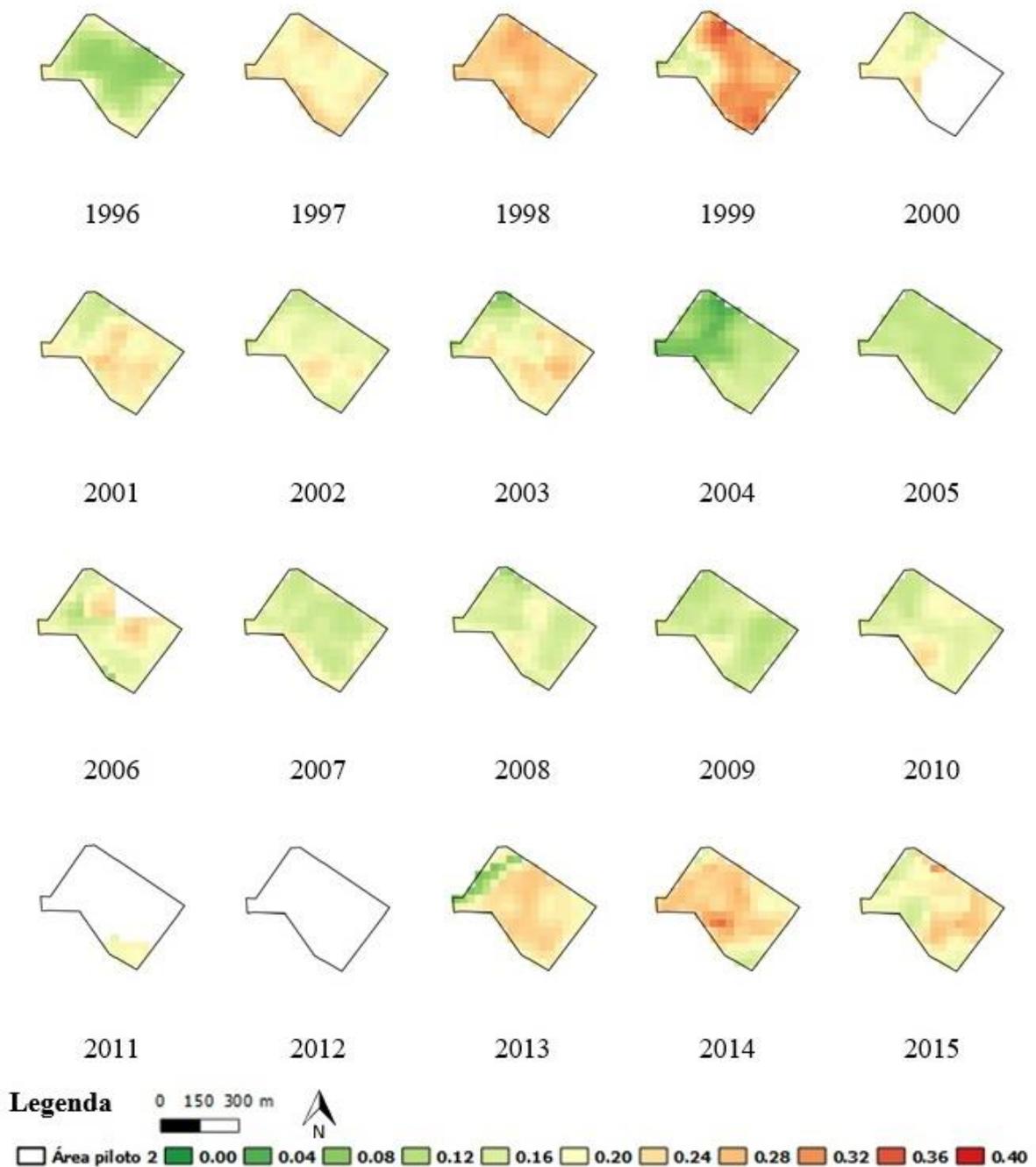


Figura 19: Albedo de superfície para cada ano da série temporal na área piloto 2 (continuação).

Fonte: Proprio autor.

Na Figura 20 são mostrados os valores de tendências de mudanças na cobertura do solo na série temporal de 30 anos segundo o albedo de superfície para as duas áreas pilotos onde ocorreram uma variação negativa significativa na cobertura do solo (esboçado em laranja), indicando o período em que ocorreu tal variação.

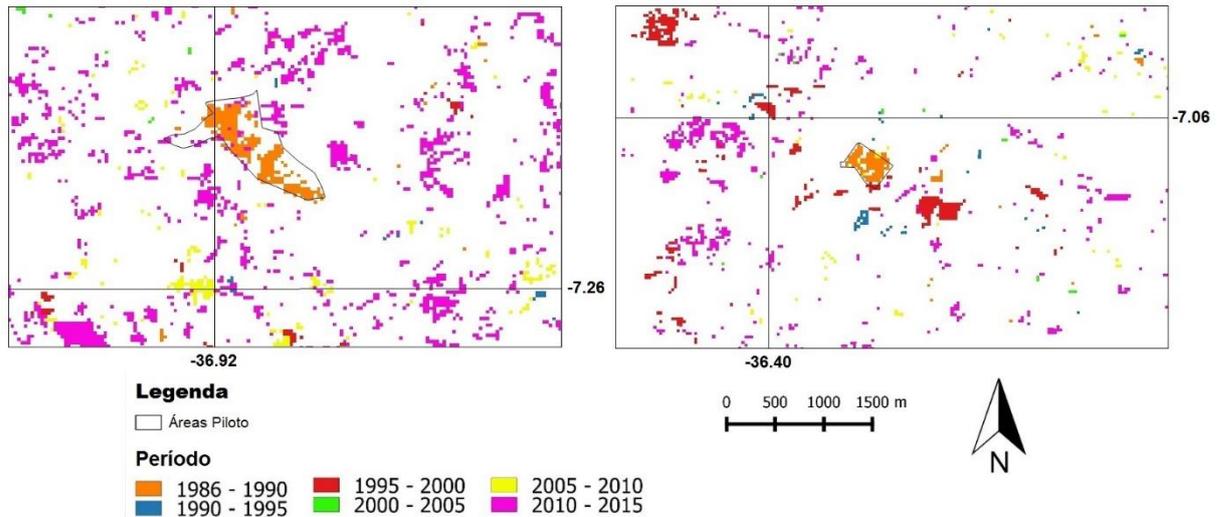


Figura 20: Áreas pilotos de visualização segundo Albedo de superfície.

Note-se que a quantidade de pixels coincidentes entre as áreas aferidas com albedo de superfície e EVI é muito pequena, e as áreas de principal agrupamento de pixels (áreas pilotos) identificados por albedo de superfície (em laranja) não são mostrados pelo EVI. Ao fatiar a análise de tendência de 30 anos em períodos de 5 anos, o albedo de superfície mostrou-se bastante sensível às mudanças abruptas da vegetação, devido a sua alta sensibilidade com a cobertura do solo assim como a estrutura dossel. Portanto, em se tratando de avaliar alterações que ocorreram em um curto espaço de tempo, este trabalho mostra que o Albedo de superfície é o indicador biofísico que melhor representa tal alteração.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que a análise de tendências de longo prazo usando indicadores biofísicos, como EVI e Albedo de superfície, derivados de uma série temporal LANDSAT de imagens é um meio eficaz para detectar e mapear a magnitude e a dinâmica temporal de uma vegetação heterogênea como a caatinga. Embora os resultados detalhados desta pesquisa são especificamente aplicáveis à Bacia do Rio Taperoá, a modelagem e métodos de sensoriamento remoto aqui usados e avaliados fornecem um leque ferramental para sistemas de monitoramento remoto e gestão de ecossistemas em geral, podendo ser usados para identificar regiões de prioridade para intervenções e observação mais detalhadas.

O Albedo de superfície foi o indicador biofísico mais adequado para o mapeamento e monitoramento de alterações na cobertura do solo, em se tratando de alterações antrópicas na vegetação. Mann-Kendall apresentou-se como sendo um indicador muito claro de mudança significativa ao longo do período.

Um problema recorrente ao utilizar imagens dos sensores dos satélites LANDSAT é a contaminação por nuvens e sombra de nuvens. O processamento massivo de imagens realizado nesta pesquisa através do algoritmo Fmask mostrou que as lacunas deixadas pela ausência desses dados dentro da série temporal podem não afetar significativamente a confiabilidade dos resultados.

Uma abordagem adicional para fazer frente a este problema poderia ser a utilização de outros satélites para reduzir a lacuna de dados nas séries temporais de imagens. Optou-se aqui por usar dados apenas dos satélites LANDSAT (resolução de 30 m) porém, alternativamente, poder-se-ia usar imagens de sensores com maior resolução espacial, como as do satélite IKONOS II, 1m de resolução, ou do SPOT 4, com 10m de resolução. Isso proporcionaria um maior detalhamento espacial e análise temporal mais precisa, porém mais imagens seriam necessárias para cobrir a área de estudo. Como são dados que têm um custo elevado de aquisição, em comparação com os arquivos do projeto LANDSAT que é gratuito, um compromisso financeiro seria necessário para desenvolver um banco de dados temporal com tais imagens.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, U. P.; ARAÚJO E. L.; EL-DEIR, A. C. A.; LIMA A. L. A.; SOUTO, A.; BEZERRA, B. M. **Caatinga revisited: ecology and conservation of an important seasonal dry forest**. *Sci World J*, 2012.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.
- ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and user's manual, version 1.0. Kimberly: **The Idaho Department of Water Resources**, p. 98, 2002.
- ANYAMBA, A.; SMALL, J. L.; TUCKER, C. J.; PAK, E. W. Assaf et al. Thirty-two years of Sahelian zone growing season non-stationary NDVI3g patterns and trends. **Remote Sensing**, v. 6, p. 3101-3122, 2014.
- ARAÚJO, E. L.; CASTRO, C. C.; ALBUQUERQUE, U. P.; **Dynamics of Brazilian Caatinga – a review concerning the plants, environment and people**. *Funct Ecosyst Commun*, 2007.
- ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; SILVA, B. B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. **Revista Caatinga**, v. 25, p. 119-127, 2012.
- ARVIDSON, T., GOWARD, S., GASCH, J., WILLIAMS, D. Landsat-7 long-term acquisition plan. *Photogramm. Eng. Remote. Sens.*, v. 72, p. 1137–1146, 2006.
- ASNER, G. P.; DEFRIES, R. S.; HOUGHTON, R.; **Typological responses of ecosystems to land use change**. In G. P. Asner, R. S. DeFries, & R. Houghton (Eds.), *Ecosystems and land use change*. Washington, D.C: AGU; 2004.
- BALA, G.; CALDEIRA, K.; WICKETT, M.; PHILIPS, T. J.; LOBELL, D. B.; DELIRE, C.; et al. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, p. 6550–6555, 2007.
- BARBOSA, H. A. Mudança e uso do solo no bioma caatinga: sistema de monitoramento por satélite. Em **Aplicações ambientais brasileiras com geoprocessamento e sensoriamento remoto**. Organizador: Bernardo Barbosa da Silva. Campina Grande – PB, 2013.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLSLAG, A. A. M. A. Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198- 212, 1998.
- BONTEMPS, S.; HEROLD, M.; KOOISTRA, L.; VAN GROENESTIJN, A.; HARTLEY, A.; ARINO, O.; et al. Revisiting land cover observation to address the needs of the climate modeling community. **Biogeosciences**, v. 9, p. 2145–2157. 2012.

BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; JUSTICE, C. O.; HUMBER, M. L. MODIS – Landsat fusion for large area 30 m burned area mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 161, p. 27–42, 2015.

BULLOCK S. H.; MOONEY H. A.; MEDINA E. **Seasonally dry tropical forests**. Cambridge University Press New York: Cambridge University Press, 1995.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893–903, 2009.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat 5 - TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 41, p. 2674-2677, 2003.

CHARNEY, J. G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 101, p. 193-202, 2006.

CORONA, P.; CHIRICI, G.; MCROBERTS, R. E.; WINTER, S.; BARBATI, A. Contribution of largescale forest inventories to biodiversity assessment and monitoring. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 2061–2069, 2011.

CORONA, P. Consolidating new paradigms in large scale monitoring and assessment of forest ecosystems. **Environmental Research**, v. 144, p. 8–14, 2016.

CUNHA, J. E. B. L.; TAVEITA, I. M. DE M.; RUFINO, I. A. A.; ALCÂNTARA, H. M. Dinâmica Sazonal da Cobertura do Solo em uma Região Semiárida e seus Impactos no Ciclo Hidrológico. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2014.

DE JONG, R.; DE BRUIN, S.; DE WIT, A.; SCHAEPMAN, M.E.; DENT, D.L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. **Remote Sens. Environ**, v. 115, p. 692–702, 2011.

ELLIS, E.; PONTIUS, R. Land-use and land-cover change. In C. J. Cleveland (Ed.), **Encyclopedia of Earth**. Washington, D.C., 2007.

ELLIS, E.C.; KAPLAN, J.O.; FULLER, D.Q.; VAVRUS, S.; KLEIN GOLDEWIJK, K.; VERBURG, P.H. Used planet: a global history. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. v. 110, p. 7978–7985, 2013.

ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M. P.; MATSCHULLAT, J. Vegetation Greenness in Northeastern Brazil and Its Relation to ENSO Warm Events. **Remote Sens**. 2014.

FARROW, A.; WINOGRAD, M. Land use modeling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America Agric., **Ecos. and Environment**, p. 249–268, 2001.

FEITOSA, J. R. P.; COSTA FILHO, J. F. da; SILVA, B. B. da. Avaliação de índices de vegetação em área irrigada do sub-médio São Francisco, Petrolina-PE, a partir de imagens do

satélite LANDSAT 5-TM. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2004.

FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, K.; KASPERSEN, P.; HUBER, S.; HORION, S.; SWINNEN, E. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships. **Remote Sensing**, v. 5, p. 664-686, 2013.

FENSHOLT, R.; LANGANKE, T.; RASMUSSEN, K.; REENBERG, A.; PRINCE, S.D.; TUCKER, C.; SCHOLES, R.J.; LE, Q.B.; BONDEAU, A.; EASTMAN, R.; et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007—An earth observing satellite based analysis of trends and drivers. **Remote Sens. Environ.** v. 121, p. 144–158, 2012.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; LIMA, E. R. V. Mapeamento das Terras para Mecanização Agrícola - Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 2, p. 233-249, 2012a.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; LIMA, E. R. V. Detecção de mudança de vegetação de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 6, p. 1473-1487, 2012b.

FRASER, R.; OLTHOF, I.; CARRIÈRE, M.; DESCHAMPS, A.; POULIOT, D. A method for trendbased change analysis in Arctic tundra using the 25-year Landsat archive. **Polar Record**, v. 48, p. 83–93, 2012.

GRECCHI, R. C.; GWYN, Q. H. J.; BÉNIÉ G. B.; FORMAGGIO, A. R.; FAHL, F. C. **Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion**. In Applied Geography, 2014.

HADDAD, N. M.; BRUDVIG, L. A.; CLOBERT, J.; DAVIES, K. F.; GONZALEZ, A.; HOLT, R. D.; TOWNSHEND, J. R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, 2015.

HIGGINBOTTOM, T. P.; SYMEONAKIS, E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions. **Remote Sensing**, v. 6, n. 10, p. 9552-9575, 2014.

HOLBEN, BRENT N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, 1986.

HUANG, C.; GOWARD, S. N.; MASEK, J. G.; THOMAS, N.; ZHU, Z.; VOGELMANN, J. E. Na automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 183–198, 2010.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.

IBRAHIM, Y. Z., BALZTER, H., KADUK, J., & TUCKER, C. J. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan west Africa from 1982 to 2012. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 5471-5494, 2015.

JACKSON, R., TEILLET, P., SLATER, P., FEDOSEJEVS, G., JASINSKI, M., AASE, J., MORAN, M. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. **Remote Sens. Environ.**, v. 32, p. 189–202, 1990.

JONG, R.; VERBESSELT, J.; SCHAEPMAN, M. E.; BRUIN, S. Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change. **Global Change Biology**, v. 18, p. 642–655, 2012.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. Griffin, London, UK, 1975.

KOVALSKYY, V., ROY, D.P. The global availability of Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ land surface observations and implications for global 30m Landsat data product generation. **Remote Sens. Environ.**, v. 130, p. 280–293, 2013.

KUUSINEN, N.; STENBERG, P.; KORHONEN, L.; RAUTIAINEN, M.; TOMPPONEN, E. Structural factors driving boreal forest albedo in Finland. **Remote Sens. Environ.**, v. 175, p. 43–51, 2016.

LAMBIN, Eric F.; GEIST, Helmut J.; LEPERS, Erika. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual review of environment and resources**, v. 28, n. 1, p. 205–241, 2003.

LAMCHIN, M.; LEE, J. Y.; LEE, W. K.; LEE, E. J.; KIM, M.; LIM, C.; CHOI, H.; KIM, S. Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. **Advances in Space Research**, v. 57, p. 64–77, 2016.

LEAL I. R.; SILVA J. M. C.; TABARELLI M.; LACHER JUNIOR T. E.: **Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of northeastern Brazil**. *Conserv Biol*, 2005.

LEHMANN, E. A.; WALLACE, J. F.; CACCETTA, P. A.; FURBY, S. L.; ZDUNIC, K. Forest cover trends from time series Landsat data for the Australian continent. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 453–462, 2013.

LHERMITTE, S.; VERBESSELT, J.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; AARDT, J.; VERSTRAETEN, W. W.; et al. Hierarchical image segmentation based on similarity of NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**. v. 112, p. 506–521, 2008.

LI, X., STRAHLER, A.H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 30, p. 276–292, 1992.

LIMA, E. DE P.; SEDIYAMA, G. C.; ANDRADE, R. G.; LOPES, V. D.; SILVA, B. B. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 61, n.1, p. 017-027, 2014.

LIU, F.; CHENA, Y.; LU, H.; SHAO, H. Albedo indicating land degradation around the Badain Jaran Desert for better land resources utilization, **Science of the Total Environment**, 2016.

LOVELAND, T. R.; DEFRIES, R. S. **Observing and monitoring land use cover change**. In: R. Defries, G. Asner, & R. Houghton (Eds.), *Ecosystems and land use change*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004.

LU, M.; CHEN, J.; TANG, H.; RAO, Y.; YANG, P.; WU, W. Land cover change detection by integrating object-based data blending model of Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v. 184, p. 374–386, 2016.

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245–259, 1945.

MARCHETTI, M.; VIZZARRI, M.; LASSERRE, B.; SALLUSTIO, L.; TAVONE, A. Natural capital and bioeconomy: challenges and opportunities for forestry. **Annals of Silvicultural Research**. v. 38, p. 62–73, 2014.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 206, 2007.

MENEZES, P. R.; NETTO, J. S. M. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília. UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MAO, DEHUA; WANG, ZONGMING; LING, LUO; REN, CHUNYING Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 528–536, 2012.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. 2. ed. São José dos Campos, Viçosa: UFV, p. 307, 2004.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: UFV, p. 320, 2005.

NASA, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Landsat Science <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7/>, 2016.

NEETI, N.; EASTMAN, J. Contextual Mann-Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series. **Transactions in GIS**, v. 15, p. 599–611. 2011.

NELLEMANN, C.; MACDEVETTE, M.; MANDERS, T.; EICKHOUT, B.; SVIHUS, B.; PRINS, A. G. **The environmental food crisis e the environment's role in averting future food crises**. In A UNEP rapid response assessment. Arendal: United Nations Environment Programme, GRID, 2009.

NEWBOLD, T.; HUDSON, L. N.; HILL, S. L.; CONTU, S.; LYSENKO, I.; SENIOR, R. A.; PURVIS, A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. **Nature**, v. 520, p. 45–50, 2015.

OECD Environmental Indicators. Development measurement and use, Organization for Economic Cooperation and Development, 2003.

OLIVEIRA, W. M. de; CHAVES, I. de B.; LIMA, E. R. V. de. Índices espectrais de vegetação de caatinga em um neossolo litólico do semiárido paraibano. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal. Anais... p. 2103-2110. INPE, 2009.

PENNINGTON T. D. **Flora da Reserva Ducke, Amazonas, Brasil**: Sapotaceae. Rodriguésia, 2006.

PIAO, S.; YIN, G.; TAN, J.; CHENG, L.; HUANG, M.; LI, Y.; et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. **Global Change Biology**, v. 21, p. 1601–1609, 2015.

PINTY, B., WIDLowski, J.-L., GOBRON, N., VERSTRAETE, M.M., DINER, D.J. Uniqueness of multiangular measurements. I. An indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 40, n. 7, p. 1560–1573, 2002.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. S. J. dos Campos: **Parêntese**. v. 1, 135 p., 2007.

QUIROGA R. M. Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. CEPAL, **Serie Manuales**, 2001.

RAHMAN, H., VERSTRAETE, M.M., PINTY, B. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model: 1. Model description and inversion on synthetic data. **J. Geophys. Res. Atmos.** v. 98, p. 20779–20789, 1993.

REICHHARDT, T. Photos stop as Landsat 7 defies engineers. *Nature*, v. 423, n. 6943, p. 907 (26 June 2003) | doi:10.1038/423907a, 2003.

ROUJEAN, J.L., LEROY, M., DESCHAMPS, P.Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. **J. Geophys. Res. Atmos.** v. 97, p. 20455–20468, 1992.

ROY, D. P., WULDER, M. A., LOVELAND, T. R., WOODCOCK, C. E., ALLEN, R. G., & ANDERSON, M. C. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154–172, 2014.

ROY, D.P.; JU, J.; KLINE, K.; SCARAMUZZA, P.L.; KOVALSKYY, V.; HANSEN, M.; LOVELAND, T.R.; VERMOTE, E.; ZHANG, C. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 35-49, 2010.

SANNIER, C.; MC ROBERTS, R. E.; FICHET, L. V.; MAKAGA, E. M. K. Using regression estimator with Landsat data to estimate proportion forest cover and net proportion deforestation in Gabon. **Remote Sensing of Environmental**. v. 151, p. 138–148, 2014.

SANNIER, C.; MC ROBERTS, R. E.; FICHET, L. V. Suitability of global forest change data to report forest cover estimates at national level in Gabon. **Remote Sensing of Environmental**. v. 173, p. 326–338, 2016.

SANTOS J. C.; LEAL I. R.; ALMEIDA-CORTEZ J. S.; FERNANDES G. W.; TABARELLI M. **Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest**. *Trop Conserv Sci*, 2011.

SCHAAF, C.B.; GAO, F.; STRAHLER, A.H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; STRUGNELL, N.C.; ZHANG, X.; JIN, Y.; MULLER, J.P. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 135-148, 2002.

SCHUCKNECHT, A.; ERASMI, S.; NIEMEYER, I.; MATSCHULLAT, J. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. **Eur. J. Remote Sens**, v. 46, p. 40–59, 2013.

SEMARNAT, **Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México 2010, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales**, Dirección General de Estadística e Información Ambiental, 2012.

SHUAI, Y.; SCHAAF, C.; ZHANG, X.; STRAHLER, A.; ROY, D.; MORISETTE, J.; et al. Daily MODIS 500 m reflectance anisotropy direct broadcast (DB) products for monitoring vegetation phenology dynamics. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, p. 5997–6016, 2013.

SILVA, B. B. et al. Org. **Aplicações ambientais brasileiras com geoprocessamento e sensoriamento remoto**, EDUFCEG, Campina Grande, 2013.

SONNENSCHNEIN, R.; KUEMMERLE, T.; UDELHOVEN, T.; STELLMES, M.; HOSTERT, P. Differences in Landsat-based trend analyses in drylands due to the choice of vegetation estimate. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 6, p. 1408–1420, 2011.

SOUZA, B. I.; SILANS, A. M. P. B.; SANTOS, J. B. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 8, n. 2-3, p. 292-298, 2004.

SOUZA, B. I.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. Caatinga e desertificação. **Mercator** (Fortaleza. Online), v. 14, p. 131-150, 2015.

STEIN A.; RILEY J.; HALBERG N. Issues of scale for environmental indicators Agriculture. **Ecosystems and Environment**, p. 215–232, 2001.

STROPPIANA, D; BORDOGNA, G.; CARRARA, P.; BOSCHETTI, M.; BOSCHETTI, L.; BRIVIO, P. A. et al. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 69, p. 88-102, 2012.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.13, p.51-63, 2008.

TUCKER, C. J.; PINZON, J. E.; BROWN, M. E.; SLAYBACK, D. A.; PAK, E. W.; MAHONEY, R.; et al. An extended AVHRR 8km NDVI dataset compatible with MODIS and

SPOT vegetation NDVI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 20, p. 4485–4498, 2005.

USGS, UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat Project Description. <https://landsat.usgs.gov/landsat-project-description>, 2016.

USGS, UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Product Guide Landsat 4-7 Surface Reflectance (LEDAPS) Product. Version 7.8. https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf, 2017a.

USGS, UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Product Guide Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product. Version 4.0. https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf, 2017b.

VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 1, p. 106–115, 2010.

VRIELING, A.; DE LEEUW, J.; SAID, M. Length of growing period over Africa: Variability and trends from 30 years of NDVI time series. **Remote Sens.**, v. 5, p.982–1000, 2013.

WANG, X.L.; SWAIL, V.R. Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. **J. Climate**, v. 14, p. 2204–2221, 2001.

WESSELS, K. J.; VAN DEN BERGH, F.; SCHOLE, R. J. Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 10-22, 2012.

WULDER, M.A., WHITE, J.C., LOVELAND, T.R., WOODCOCK, C.E., BELWARD, A.S., COHEN, W.B., FOSNIGHT, G., SHAW, J., MASEK, J.G., ROY, D.P. The global Landsat archive: status, consolidation, and direction. **Remote Sens. Environ.** v. 185, p. 271–283, 2016.

WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; GOWARD, S. N.; MASEK, J. G.; IRONS, J. R.; HEROLD, M.; et al. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. **Remote Sensing of Environment** v. 112, n. 3, p. 955–969, 2008.

XU, L.; MYNENI, R. B.; CHAPIN III, F. S.; CALLAGHAN, T. V.; PINZON, J. E.; TUCKER, C. J.; et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. **Nature Climate Change**, 2013.

YANG, J.; GONG, P.; FU, R.; ZHANG, M.; CHEN, J.; LIANG, S.; et al. The role of satellite remote sensing in climate change studies. **Nature Climate Change**. v. 3, n. 10, p. 875–883, 2013.

YUE, S.; WANG, C.Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. **Water Resour. Res.** v. 38, n. 6, p. 1068, 2002.

ZHU, Z.; et al. Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from from Guangzhou, China (2000–2014) **Remote Sensing of Environment**, 2016.

ZHU, Z.; WANG, S.; WOODCOCK, C. E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snowdetection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. **Remote Sensing of Environment**, v. 159, p. 269–277, 2015.

ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, p. 152–171, 2014.

ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 83-94, 2012.

ZHONG, Q.; LI, Y. H. Satellite observation of surface albedo over the Qinghai-Xizang plateau region. **Advances in Atmospheric Science**, v. 5, p. 57-65, 1988.

APÊNDICE I: Dia juliano e data da passagem de cada satélite das 162 imagens LANDSAT que foram utilizadas na análise

Ano	Landsat 5						Qt	Landsat 7						Qt	Landsat 8				Qt	Total	
1986	222	238	270				3														3
	10/ago/86	26/ago/86	27/set/86																		
1987	177	193	209	225	241	273	6														6
	26/jun/87	12/jul/87	28/jul/87	13/ago/87	29/ago/87	30/set/87															
1988	196	212	228	244			4														4
	14/jul/88	30/jul/88	15/ago/88	31/ago/88																	
1989	182	214	230				3														3
	01/jul/89	02/ago/89	18/ago/89																		
1990	169	185	217	249			4														4
	18/jun/90	04/jul/90	05/ago/90	06/set/90																	
1991	188	204	220	252			4														4
	07/jul/91	23/jul/91	08/ago/91	09/set/91																	
1992	175	191	207	223	239	255	6														6
	23/jun/92	09/jul/92	25/jul/92	10/ago/92	26/ago/92	11/set/92															
1993	209	225	241	257			4														4
	28/jul/93	13/ago/93	29/ago/93	14/set/93																	
1994	196	212	228				3														3
	15/jul/94	31/jul/94	16/ago/94																		
1995	183	199	231	247			4														4
	02/jul/95	18/jul/95	19/ago/95	04/set/95																	
1996	154	218	234	266			4														4
	02/jun/96	05/ago/96	21/ago/96	22/set/96																	
1997	188	204	220	268			4														4
	07/jul/97	23/jul/97	08/ago/97	25/set/97																	
1998	223	239	255				3														3
	11/ago/98	27/ago/98	12/set/98																		

Ano	Landsat 5						Qt	Landsat 7						Qt	Landsat 8				Qt	Total
1999	178	194	258				3	218						1						4
	27/jun/99	13/jul/99	15/set/99					06/ago/99												
2000	181	197	213	229	245		5	173	253					2						7
	29/jun/00	15/jul/00	31/jul/00	16/ago/00	01/set/00			21/jun/00	09/set/00											
2001	183	199	215	231	263		5	175	191	207	223	239	255	6						11
	02/jul/01	18/jul/01	03/ago/01	19/ago/01	20/set/01			24/jun/01	10/jul/01	26/jul/01	11/ago/01	27/ago/01	12/set/01							
2002								194	210	226	242			4						4
								13/jul/02	29/jul/02	14/ago/02	30/ago/02									
2003	189	205	221	237	253		5	245						1						6
	08/jul/03	24/jul/03	09/ago/03	25/ago/03	10/set/03			02/set/03												
2004	176	192	208	224	240	256	6													6
	24/jun/04	10/jul/04	26/jul/04	11/ago/04	27/ago/04	12/set/04														
2005	194	210	226	242			4	186	202					2						6
	13/jul/05	29/jul/05	14/ago/05	30/ago/05				05/jul/05	21/jul/05											
2006	165	197	213				3	157	237					2						5
	14/jun/06	16/jul/06	01/ago/06					06/jun/06	25/ago/06											
2007	184	200	216	232			4													4
	03/jul/07	19/jul/07	04/ago/07	20/ago/07																
2008	171	187	203	219	235	267	6	227	243					2						8
	19/jun/08	05/jul/08	21/jul/08	06/ago/08	22/ago/08	23/set/08		14/ago/08	30/ago/08											
2009	173	189	205	221	253		5	181	197	213	245			4						9
	22/jun/09	08/jul/09	24/jul/09	09/ago/09	10/set/09			30/jun/09	16/jul/09	01/ago/09	02/set/09									
2010	176	192	240				3	152						1						4
	25/jun/10	11/jul/10	28/ago/10					01/jun/10												
2011	163	243	259				3	203	219	235	251			4						7
	12/jun/11	31/ago/11	16/set/11					22/jul/11	07/ago/11	23/ago/11	08/set/11									
2012								190	206	222	238	254		5						5
								08/jul/12	24/jul/12	09/ago/12	25/ago/12	10/set/12								
2013								192	208	224	240			4	184	200	216	232		8
								11/jul/13	27/jul/13	12/ago/13	28/ago/13				03/jul/13	19/jul/13	04/ago/13	20/ago/13	4	

Ano	Landsat 5						Qt	Landsat 7						Qt	Landsat 8				Qt	Total
2014								195	211	227	243			4	187	203	219	235	4	8
								14/jul/14	30/jul/14	15/ago/14	31/ago/14				06/jul/14	22/jul/14	07/ago/14	23/ago/14		
2015								182	198	214	230			4	190	206	222	238	4	8
								01/jul/15	17/jul/15	02/ago/15	18/ago/15				09/jul/15	25/jul/15	10/ago/15	26/ago/15		
Total	Landsat 5						104	Landsat 7						46	Landsat 8				12	162