

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DO
SOLO NO BRASIL NO INÍCIO DO SÉCULO
XXI: ESTUDO DE CASO – BACIA DO SÃO
FRANCISCO

Bruna Thomazinho França

Juiz de Fora

2015

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DO
SOLO NO BRASIL NO INÍCIO DO SÉCULO
XXI: ESTUDO DE CASO – BACIA DO SÃO
FRANCISCO

Bruna Thomazinho França

Bruna Thomazinho França

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DO
SOLO NO BRASIL NO INÍCIO DO SÉCULO
XXI: ESTUDO DE CASO – BACIA DO SÃO
FRANCISCO**

Trabalho de Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de Pesquisa: Sensoriamento Remoto

Orientador: Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2015

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão deste trabalho e do meu curso de graduação sinto que tenho muito a agradecer.

Agradeço à minha família: meus avós Luiza e José, minha mãe Cristina e minha tia Sandra que, mesmo estando alguns um pouco longe e outros nem tanto, sempre estiveram ao meu lado, torcendo pelo meu sucesso. Mãe, obrigada pela confiança depositada em mim e por sempre acreditar que eu conseguiria.

Ao Tales, pelo amor, sintonia e compreensão. Sua presença torna tudo mais leve e cheio de alegria. Obrigada por acreditar que daria certo e por me incentivar a nunca desistir.

Aos meus amigos e amigas. Principalmente àquelas que conquistei durante a graduação. Obrigada por fazerem dos dias momentos mais felizes e tranquilos. Torço por vocês assim como torceram por mim.

Meu muito obrigada a todos os professores que participaram da minha graduação, em especial aos do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária por terem compartilhado suas experiências e transmitido seus conhecimentos.

Foram anos de muito trabalho e aprendizado que dedico ao meu orientador Celso Bandeira que desde os projetos de Iniciação Científica mostrou ser um excelente profissional e educador. Agradeço pela ajuda, apoio, persistência e amizade.

Ao colega de curso Marcel Pereira, por ter compartilhado comigo um pouco do que sabia, contribuindo assim de forma grande e generosa com a realização desse trabalho.

À aluna Giulia Campanha por dedicar pacientemente seu tempo na ajuda da realização desse trabalho.

À todos que de alguma forma fizeram parte dessa trajetória e torceram pela minha conquista: meu muito obrigada!

“O homem é apenas um caniço, o mais fraco da Natureza; mas é um caniço pensante.

Não é preciso que o Universo inteiro se arme para esmagá-lo: um vapor, uma gota de água são suficientes para matá-lo.

(...)

Toda nossa dignidade consiste, pois no pensamento. É a partir dele que nos deveríamos elevar e não do espaço e do tempo, que não saberíamos ocupar.”

(Blaise Pascal)

RESUMO

O desenvolvimento de processos econômicos e sociais traz consigo a constante busca por aquisição de recursos naturais para atender necessidades imediatas. Essa prática tem como principais características mudanças expressivas nos ecossistemas da Terra, incluindo perda e fragmentação de habitats, degradação de solo e água além de afetar o clima em pequena escala. Assim, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto apresenta-se como importante ferramenta para acompanhar alterações provocadas pelo desenvolvimento humano. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de identificar e comparar mudanças no uso do solo ao longo do tempo em todo o território brasileiro e relacionar os impactos dessas alterações com variações no balanço hídrico em mesoescala. Para identificar as alterações no uso do solo foram utilizadas imagens de satélite (MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, produto MCD12Q1) no período de 2001 a 2012. A partir dessas imagens anuais foram realizadas comparações de imagens da região hidrográfica do rio São Francisco através um código em linguagem Fortran que gera um terceiro mapa evidenciando a natureza das transições ocorridas. Os resultados apontam para uma conversão de florestas em pastagens para o território brasileiro em geral. Além disso, na região hidrográfica do rio São Francisco verificou-se significativa transição de pastagens e savana para terras agrícolas.

Palavras-chave: mudanças no uso do solo, sensoriamento remoto, balanço hídrico.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1	USO DO SOLO NO BRASIL	4
3.2	SENSORIAMENTO REMOTO	6
3.2.1	<i>Breve histórico e principais considerações</i>	6
3.2.2	<i>MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>	9
3.3	REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	9
3.4	BALANÇO HÍDRICO	11
4	METODOLOGIA	15
4.1	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS	15
4.2	GERAÇÃO DOS MAPAS DE USO DO SOLO DE 2001 A 2012	16
4.3	COMPARAÇÃO DAS IMAGENS ANUAIS PARA A REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	17
4.4	AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O BALANÇO HÍDRICO	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5.1	COMPORTAMENTO DAS MUDANÇAS DO USO DO SOLO NO BRASIL	21
5.2	COMPORTAMENTO DAS MUDANÇAS DO USO DO SOLO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	27
5.3	RELAÇÕES ENTRE O BALANÇO HÍDRICO E USO DO SOLO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	35
5.3.1	<i>Análise das transições no uso e ocupação na região hidrográfica do rio São Francisco</i>	37
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE A	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.4.1: Parâmetros de entrada e saída de água no solo para constituição do balanço hídrico (fonte: adaptado de Liu, 2007).....	13
Figura 4.4.1: Localização das estações fluviométricas.	20
Figura 5.1.1: Comportamento das alterações das classes floresta e pastagem, para todo o Brasil, durante os anos de estudo.	22
Figura 5.1.2: Comportamento das alterações da classe terras agrícolas, para todo o Brasil, durante os anos de estudo.....	22
Figura 5.1.3: Situação do uso do solo no Brasil de 2001 a 2004.	24
Figura 5.1.4: Situação do uso do solo no Brasil de 2005 a 2008.	25
Figura 5.1.5: Situação do uso do solo no Brasil de 2009 a 2012.	26
Figura 5.2.1: Situação do uso do solo na região hidrográfica do rio São Francisco de 2001 a 2004.	28
Figura 5.2.2: Situação do uso do solo na região hidrográfica do rio São Francisco de 2004 a 2008.	29
Figura 5.2.3: Situação do uso do solo na região hidrográfica do rio São Francisco de 2009 a 2012.	30
Figura 5.2.4: Transição de pastagens para terras agrícolas na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 59).	31
Figura 5.2.5: Transição de mata fechada composta por arbustos para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 36).	31
Figura 5.2.6: Transição de mata aberta composta por arbustos para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 37).	32
Figura 5.2.7: Transição de floresta perene para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 32).	32
Figura 5.2.8: Transição de floresta decidual para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 34).....	33
Figura 5.2.9: Transição de floresta mista para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 35).	33
Figura 5.2.10: Transição de solo exposto para terras agrícolas na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 58).....	34
Figura 5.2.11: Transição de savana arborizada para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 38).....	34

Figura 5.3.1: Comportamento da estação fluviométrica de Martinho Campos (Código: 40500000) em relação à média da região e a máxima média por década.	36
Figura 5.3.2: Comportamento da estação fluviométrica de Pedras de Maria da Cruz (Código: 44290002) em relação à média da região e a máxima média por década.	36
Figura 5.3.3: Comportamento da estação fluviométrica de Boqueirão (Código: 469002000) em relação à média da região e a máxima média por década.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1.1: Classes de uso do solo abordadas pelo Tipo 2 de classificação (fonte: adaptado de NASA, 2015d).....	16
Tabela 4.4.1: Estações fluviométricas utilizadas nas análises.....	19
Tabela A.1: Transições tratadas pelo código em Fortran.	44
Tabela A.2: Áreas correspondentes à cada classe de uso do solo no Brasil nos anos de estudo (Km ²).....	47
Tabela A.3: Áreas correspondentes à cada classe de uso do solo na região hidrográfica do São Francisco nos anos de estudo (Km ²).....	48
Tabela A.4: Áreas correspondentes à cada transição ocorrida anualmente na região hidrográfica do São Francisco (Km ²).	49

1 INTRODUÇÃO

A discussão acerca de mudanças globais registradas nos ecossistemas vem sendo bastante direcionada e relacionada à disponibilidade de alimento, água e abrigo para a população do planeta. Isso ocorre porque a devastação de florestas tropicais, prática de agricultura de subsistência, intensificação da produção agrícola e expansão de centros urbanos são maneiras intensas de alteração da paisagem provocados pelo homem. Esses tipos de atividades são explicadas pela constante aquisição de recursos naturais para satisfazer necessidades imediatas em detrimento das condições ambientais (FOLEY et al., 2005).

A curto prazo, as diferentes e modernas práticas de uso e exploração do solo são aplicadas geralmente em sistemas locais, proporcionando o fornecimento de bens materiais. Em contrapartida, essas práticas podem causar ou potencializar a degradação de ecossistemas a longo prazo, podendo atingir escalas regionais e globais. Sendo assim, a sociedade encara o desafio e a responsabilidade de desenvolver estratégias que tenham como objetivo a redução dos impactos negativos ao meio ambiente, sem prejudicar a manutenção dos benefícios (econômicos e sociais) oriundos da exploração e uso do solo por meio de múltiplos serviços. Assim, mudanças constantes no uso do solo permitiram que o homem utilizasse de forma crescente os recursos do planeta. Essa prática, se realizada de forma desordenada, provoca a diminuição da capacidade do ecossistema em sustentar a produção de alimentos, manter a água doce em qualidade e quantidade desejáveis e conservar recursos florestais remanescentes. Além disso, essas mudanças no uso do solo podem prejudicar a regulação do clima e qualidade do ar (FOLEY et al., 2005).

As atividades humanas atualmente se apropriam de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ da produção do ecossistema global e seus serviços. Assim, mudanças no uso do solo permitiram que as safras de grãos em todo o mundo dobrassem nas últimas quatro décadas. Calcula-se que desde a década de 1960 até os dias de hoje, o uso de fertilizantes tenha aumentado 700% e, as áreas agrícolas irrigáveis, 70% (FOLEY et al., 2005).

Há pouco mais de 30 anos atrás, a heterogeneidade observada nas diferentes formas de uso do solo dificultavam o seu processo de reconhecimento e avaliação precisa. Entretanto, hoje com a presença das ferramentas e técnicas de sensoriamento remoto

inseridas nas análises, torna-se possível a detecção de mudanças no uso do solo em larga escala. (SRIWONGSITANON e TAESOMBAT, 2011).

Desta forma, com o avanço e a criação de técnicas de sensoriamento remoto para a observação da Terra, o conhecimento técnico passou a estar associado à preocupação ambiental principalmente a partir do momento em que processos de uso do solo e suas consequências passaram a ser vistos e reconhecidos de forma interdependente (IBGE, 2013b).

Assim, enfrenta-se hoje um desafio de gestão baseada na troca entre necessidades imediatas e capacidade do planeta em fornecer materiais e serviços a longo prazo.

Portanto, este trabalho se propõe a detectar e quantificar mudanças no uso do solo através de técnicas de sensoriamento remoto, em média e grande escalas, além de relacionar essas alterações, em mesoescala, com anomalias observadas no balanço hídrico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo foi identificar e analisar as principais mudanças ocorridas no uso do solo no Brasil no início do século XXI através de técnicas de sensoriamento remoto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar as transições no uso do solo em meso escala no período de 2001 a 2012;
- Esclarecer, a partir de ferramentas gráficas, a forma como essas modificações vêm se comportando com o passar dos anos;
- Relacionar as mudanças ocorridas no uso do solo com as alterações observadas no balanço hídrico;
- Contribuir no entendimento dos impactos causados por alterações no uso do solo e suas interferências no balanço hídrico, na escala de regiões hidrográficas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 USO DO SOLO NO BRASIL

A combinação entre concepções teóricas provenientes de estudos do uso do solo e avanços tecnológicos no ramo de sensores remotos e observação do planeta fundamentam metodologias que são capazes de orientar pesquisas sobre a dinâmica do uso do solo. Essas características são importantes uma vez que a transformação do espaço natural está diretamente ligada aos ciclos econômicos e às atividades desenvolvidas pelo homem para a obtenção de produtos e benefícios (BRITO et al., 2013).

No Século XIX, as populações que viviam nas áreas rurais, principalmente aquelas que não possuíam suas próprias terras, usavam terras de modo compartilhado para funções tais como pequenos criatórios, extração de lenha e madeira e também para complementação de necessidades básicas. No ano de 1850, essas terras passaram a ter denominação de terras devolutas e então estavam sujeitas à processos de especulação e apropriação individual (IBGE, 2013b).

As décadas de 1950 e 1960 foram marcadas por estudos relacionados à ocupação das terras por culturas agrícolas. Desta forma, as análises espaciais e também estudos regionais passam a ser utilizados em larga escala. Deve-se dar destaque ao final da década de 1960 com o surgimento do primeiro mapeamento da utilização da terra, desenvolvido por Elza Keller. Já na década de 1970, técnicas de quantificação e modelagem passaram a ser utilizadas nas análises de uso das terras e com elas surgiram os Projetos Radam e Radambrasil que serão melhor discutidos no item 3.2.1. Na década seguinte, foi introduzido e consolidado o uso de sensoriamento remoto para captação e leitura de imagens aéreas e com essa ferramenta, sistemas de classificação de uso do solo passaram a ser amplamente utilizados (IBGE, 2013b).

Segundo Abreu et al. (2011), a atividade agroindustrial mais antiga desenvolvida no Brasil é a canavieira. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, e as regiões que compreendem as maiores explorações são Sudeste, Nordeste e Sul, com destaque para o estado de São Paulo que é responsável por 60% da produção nacional. Tem-se que no período de 2000 a 2005 o aumento da produção de cana-de-açúcar, tanto para obtenção de açúcar quanto para álcool e energia, chegou a cerca de 27,6%. Essa

elevação na produção implica em conversão de novas áreas em terras de uso agrícola para suprir a demanda do produto. Lorensini (2013), analisou e identificou classes de uso do solo presentes em dois municípios de São Paulo (Flora Rica e Iacri) antes da implantação de cultura de cana-de-açúcar no local. O objetivo era avaliar a implantação desse tipo de cultura em detrimento da produção de alimentos e supressão da biodiversidade. Para isso, foram utilizadas imagens do sensor TM (Thematic Mapper) a bordo do satélite Landsat-5. Como resultado, o autor destaca que as áreas que em 2011 correspondiam à exploração de cana-de-açúcar, no ano de 1988, em ambos os municípios, eram constituídas aproximadamente por 80% de pastagens e 8,5% de culturas temporárias. Nas análises realizadas no ano de 2001, não foram identificadas áreas com cana-de-açúcar no município de Iacri, o que indica que os plantios foram resultado de alteração no uso e cobertura do solo recentes. Foi constatado também neste município que 13% das áreas que em 2011 eram ocupadas pelo cultivo da cana-de-açúcar, no ano de 2001 eram predominantemente ocupadas por culturas temporárias. Isso indica uma conversão de áreas destinadas principalmente ao plantio de alimentos.

No que se diz respeito à produção de soja no Brasil, Scolari (2006) destaca que o produto é responsável pela maior taxa de exportação agrícola do país e conseqüentemente pelas maiores arrecadações financeiras do ramo. No ano de 1980 o Brasil contou com 8,87 milhões de toneladas de soja exportadas, já no ano de 2003 esse montante já era de 35,98 milhões de toneladas. De acordo com Barbosa (2011) e IBGE (2009), a produção de soja está majoritariamente concentrada nas regiões Sul e Centro-Oeste, responsáveis respectivamente por 43,52% e 41,90% da área de cultivo do insumo.

Assim como a cana-de-açúcar e a soja, o país tem participação significativa na exportação de carne desde o ano de 1995. Essa característica implica na conversão de novas áreas em pastagens para atender ao crescimento e desenvolvimento da atividade. Estima-se que cerca de 60% das áreas ocupadas no país são destinadas a pastagens e ao cultivo de soja e cana-de-açúcar (BARBOSA, 2011; IBGE, 2009).

Desta forma, o levantamento sobre uso e cobertura do solo constitui importante ferramenta de planejamento, sendo capaz de orientar as tomadas de decisão dos gestores públicos. Isso ocorre pelo fato de esse tipo de levantamento retratar o comportamento da dinâmica do uso do solo, fornecendo subsídios à construção de indicadores ambientais e

também contribuindo na identificação de características que permitam a aplicação de alternativas a fim de promover o desenvolvimento sustentável.

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

3.2.1 *Breve histórico e principais considerações*

Segundo Novo (1988), a ideia de sensoriamento remoto teve sua origem marcada em 1860, ano em que eram utilizadas fotografias aéreas principalmente para fins militares. Já na primeira década do século XX, fatos como o aperfeiçoamento de sistemas óticos e mecanismos de exposição automática além do desenvolvimento de equipamentos fotogramétricos começaram a ocorrer.

O desenvolvimento de equipamentos sensíveis à radiação infravermelha possibilitou, em 1940, o aparecimento das primeiras medidas radiométricas de objetos de superfície. Assim, o conhecimento dessas técnicas permitiu a elaboração de filmes para detecção de camuflagens durante a Segunda Guerra Mundial e também seu posterior aperfeiçoamento.

Ainda de acordo com Novo (1988), a década de 1960 foi marcada principalmente pela diversidade e multiplicidade de sistemas sensores. Logo em seu primeiro ano houve o aparecimento da primeira fotografia orbital, e também o primeiro teste orbital bem sucedido comandado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o Mercury Atlas 4. É importante destacar que antes dessas conquistas, ocorreram também o aperfeiçoamento de foguetes, a construção de veículos espaciais tripulados e não tripulados e a partir de 1958 o desenvolvimento do programa de lançamento de satélites meteorológicos.

No Brasil, o sensoriamento remoto começou a ser explorado na década de 70 através do projeto RADAM (Radar na Amazônia). Esse projeto, organizado pelo Ministério de Minas e Energia avaliava prioritariamente a capacidade de uso da terra e também a capacidade econômica de uso dos recursos renováveis. Inicialmente a prioridade era a coleta de dados sobre recursos minerais, solos, vegetação, uso da terra e cartografia na Amazônia e em algumas áreas na região Nordeste, tendo o início da sua operação em outubro de 1970. Para realizar esses levantamentos, foi utilizado um radar de visada

lateral (SLAR – *side-looking airborne radar*) que permitia obter imagens tanto durante o dia como durante a noite e também na presença de nuvens. As metodologias utilizadas no projeto se baseavam em ponderação de feições tanto geomorfológicas quanto dos tipos de solos, fisionomia vegetal e características climáticas. Como os resultados foram satisfatórios, em junho de 1971 iniciou-se o aerolevanteamento, e em julho de 1975 o projeto foi expandido para o restante do território nacional, passando a ser chamado de RADAMBRASIL. Os produtos finais gerados pelos dois projetos consistem em 550 mosaicos na escala 1:250.000 semicontrolados e disponibilizados ao público. Assim, no período compreendido entre 1986 e 1999, com o projeto RADAMBRASIL já incorporado ao IBGE, o foco das discussões se voltou para análises em pequena escala e ordenamento territorial. Desta forma, os trabalhos envolvendo uso da terra eram desenvolvidos com uma ótica nos estudos integrados de diagnósticos e zoneamento ambientais, identificando processos produtivos e seus possíveis impactos (CPRM, 2012; IBGE, 2013b).

Com a utilização das tecnologias oriundas dos sensores e de ferramentas de geoprocessamento, muitos produtos puderam ser gerados a partir de satélites imageadores que mudam a forma e a metodologia de análise do uso da terra, proporcionando ao homem a capacidade de avaliação temporal e espacial do espaço geográfico.

Desta forma, o sensoriamento remoto pode ser definido como sendo um conjunto de componentes em utilização conjunta com o objetivo de analisar o ambiente terrestre por meio da interação entre radiação eletromagnética e substâncias presentes no planeta (NOVO, 1988).

Os sensores são sistemas que captam imagens da superfície terrestre por meio de plataformas aéreas ou orbitais. Essas imagens, na maioria das vezes, são multiespectrais, fator que as diferenciam de outras imagens digitais. Uma imagem multiespectral é obtida através de diferentes porções do espectro eletromagnético, tendo em sua composição traços do visível, infravermelho próximo, médio, comprimento de onda curto, infravermelho total e micro-ondas. Portanto para interpretar essas imagens são necessárias técnicas apropriadas de processamento de imagens, muitas delas envolvendo métodos estatísticos, incluindo estatística multivariada (CROSTA, 1999).

Ainda segundo Crosta (1999), a estrutura das imagens geradas através de sensoriamento remoto apresenta-se em forma de malha ou também chamado de *grid*. Essa malha é

constituída por linhas e colunas e cada célula pertencente a essa estrutura é denominada *pixel*, do inglês “*picture element*”. Para cada *pixel* que compõe uma imagem, existe também um outro atributo definido como DN ou nível de cinza que pode ser explicado como sendo a intensidade média de energia eletromagnética refletida ou emitida pelos diferentes elementos presentes no *pixel*, medida pelo sensor.

De acordo com Ribeiro (2001) e Silva (2011), a resolução atribuída às imagens de sensoriamento remoto apresentam quatro naturezas distintas: espacial, espectral, radiométrica e temporal. A resolução espacial diz respeito a capacidade do sensor de identificar objetos da cena de forma que quanto maior a resolução espacial, maior a capacidade do satélite de identificar objetos menores e conseqüentemente menor será o tamanho de cada *pixel*. Já a resolução espectral está diretamente relacionada com a capacidade que o sensor possui em operar em mais ou menos bandas espectrais para obter diferentes níveis de discretização de um objeto. A resolução radiométrica por sua vez, é dada pela quantidade de níveis de cinza que uma imagem possui, ou seja, uma imagem com 32 níveis de cinza possui uma melhor resolução radiométrica do que uma imagem com apenas dois tons (branco e preto). Por fim, a resolução temporal está relacionada com a frequência em que o sensor percorre uma mesma órbita, possibilitando assim captar uma mesma cena com frequência temporal determinada, podendo gerar produtos diários, semestrais, anuais, entre outros intervalos.

A respeito da classificação das imagens de sensoriamento remoto, Novo (1988) destaca que a função desse sistema é fornecer um modo de referência que organize os dados e os incorpore de forma hierárquica no próprio sistema. No ano de 1971, a Comissão Mista para Informação e Classificação do Uso da Terra (EUA), que contava com a participação da NASA, órgãos federais do governo dos EUA além dos departamentos de Agricultura e Interior entre outras entidades, se reuniu com o objetivo de desenvolver um sistema nacional de classificação de uso do solo. Esse sistema deveria considerar padrões adotados, valores ambientais e atender tanto às fontes convencionais de entrada de dados quanto às informações provenientes de sensores remotos (IBGE, 2013b).

Portanto, é importante que o sistema de classificação adotado tenha informações de classes de uso e cobertura do solo bem definidas. Desta forma, técnicas de sensoriamento remoto vem sendo utilizadas com o objetivo de verificar crescimento urbano em grandes

centros além de avaliação da frequência do desmatamento e aumento de áreas ocupadas por culturas agrícolas.

3.2.2 MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

Com o objetivo de verificar as mudanças ocorridas no planeta e suas consequências, em 1999 a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lança ao espaço o satélite Terra. Ao Terra estão acoplados cinco instrumentos que captam informações sobre atmosfera, aerossóis, oceanos, solo, neve, gelo e balanço de energia. Já no ano de 2002, a mesma instituição lança o satélite Aqua, que com seis instrumentos a bordo, é capaz de coletar informações sobre evapotranspiração dos oceanos, vapor de água na atmosfera, matéria orgânica dissolvida, nuvens, precipitação, fluxos de energia radiativa, aerossóis, cobertura vegetal e cobertura de neve e gelo. O MODIS ou *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* é um instrumento acoplado aos dois satélites, Terra e Aqua (NASA, 2015b; NASA, 2015c).

Os dados gerados pelo sensor MODIS fornecem informações a respeito da dinâmica global e também sobre processos que ocorrem no solo, nos oceanos e na baixa atmosfera, além de proporcionar a previsão precisa de alterações em escala global. (NASA, 2015a; NASA, 2015d).

O MODIS tem a capacidade de captar uma faixa de largura de 2.330 km, recolhendo assim informações de toda a superfície terrestre a cada um ou dois dias. Seus detectores processam 36 bandas espectrais e geram produtos com três resoluções espaciais diferentes, sendo elas 250 metros, 500 metros e 1.000 metros. Além disso, o produto gerado conta com diferentes resoluções temporais sendo elas diárias, a cada oito dias, a cada 16 dias, mensal, trimestral e anual, onde cada uma está relacionada ao ciclo orbital do instrumento (NASA, 2015d).

3.3 REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

A Região Hidrográfica do Rio São Francisco abrange 521 municípios, em seis estados brasileiros, sendo eles Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás, além do Distrito Federal. Devido ao fato da grande extensão do Rio São Francisco, a região é dividida em Alto (área que compreende desde a nascente até a região de Pirapora em

MG), Médio (Pirapora até Remanso no estado da Bahia), Submédio (Remanso a Paulo Afonso, BA) e Baixo São Francisco (Paulo Afonso até a foz localizada na divisa dos municípios de Alagoas e Sergipe). Sendo assim, a região como um todo ocupa uma área de drenagem de 638.576 km² representando 8% do território brasileiro, além disso a região engloba fragmentos de Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. A vazão média anual do Rio São Francisco é de cerca de 2.846 m³s⁻¹, podendo variar em períodos de seca e estiagem (ALVAREZ, OLIVEIRA e PEREIRA, 2010; ANA, 2015).

A região apresenta-se hoje em grau avançado de degradação ocasionado por diversas atividades antrópicas. Alvarez, Oliveira e Pereira (2010) destacam que a Caatinga hoje tem cerca de 50% de sua área alterada, isso porque o bioma é alvo de produtores de lenha e carvão que têm praticado o cultivo intensivo e desordenado, não havendo prática de reposição florestal. Além disso, os autores dão destaque para a remoção de vegetação nativa nas margens dos cursos d'água caracterizadas como Área de Preservação Permanente. A agricultura irrigada teve aumento expressivo nos últimos anos principalmente no estado de Pernambuco, nos municípios de Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande. O desenvolvimento da atividade gerou impactos no desmatamento principalmente para fins de ocupação de novas áreas de cultivo.

O Vale do São Francisco se destaca na produção agrícola da região. De acordo com o Governo do Estado da Bahia (2008), no ano de 2005 a cana-de-açúcar ocupava uma área plantada de 17.630 ha enquanto culturas temporárias como melão, melancia, cebola, mandioca, milho, feijão e tomate ocupavam a área de 53.000 ha cultivada, na maioria das vezes, na forma de agricultura familiar.

O regime de vazões do rio São Francisco sofreu suas maiores alterações a partir do início da operação das usinas de Três Marias (MG) e Sobradinho (BA). A regularização de vazão exercida por esses dois complexos hidroelétricos geram transtornos a jusante tais como disponibilidade de água para os diversos usos, alteração quantitativa da ictiofauna, instabilidade dos níveis de deposição de nutrientes na planície de inundação, redução da recarga subterrânea, além de prejudicar na manutenção da vazão ecológica do rio (MARTINS et al., 2011).

Portanto, observa-se que a Região Hidrográfica do São Francisco sofre pressões tanto a respeito de disponibilidade e qualidade hídrica, quanto de modificações no uso/ocupação do solo para fins industriais, agrícola e urbano. Essas características além de promoverem

problemas a nível local, podem ainda alterar a forma como a água se distribui na bacia como um todo.

3.4 BALANÇO HÍDRICO

A concepção de ciclo hidrológico considera que o fenômeno explica e viabiliza a circulação hídrica fechada e global entre superfície e atmosfera, sendo energia solar, gravidade e rotação da terra fatores que estimulam esse ciclo. Como forma de explicar a grande variabilidade nas formas de ocorrência do ciclo hidrológico em diferentes locais do planeta, o autor destaca fatores como desuniformidade de radiação que atinge os diferentes locais, diferença de temperatura entre oceano e continente, quantidade de vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio presente na atmosfera e uso e cobertura do solo (TUCCI, 2001).

Conforme o vapor d'água presente na atmosfera se condensa formando pequenas gotas de água, uma turbulência natural passa a atuar, o que faz com que essas gotículas fiquem suspensas no ar. A união dessas gotas com vapor d'água e particulado forma um aerossol. A partir do momento em que as gotas de água passam a ter um peso superior às forças ascendentes e sofrem simultaneamente a atuação de massas de ar, ocorre o fenômeno da precipitação (QUEIROZ, 2012).

A precipitação é constituída pela água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre em forma de neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. A quantificação da precipitação em uma determinada bacia, principalmente quando se trata de chuva, é de fundamental importância para que se possa determinar a disponibilidade hídrica para serviços como irrigação e abastecimento de água doméstico e industrial. Além disso, o controle de inundações e de erosão do solo pode ser melhor fundamentado em estudos relacionados à intensidade de precipitação (TUCCI, 2001).

No caminho percorrido pela precipitação, parte da água já sofre processo de evaporação. Se a bacia hidrográfica que recebe a precipitação possuir um solo com certa cobertura vegetal, ocorre o fenômeno da interceptação pelas folhas e caules. Parte dessa precipitação interceptada é também evaporada e a outra parte é direcionada ao solo. Tucci (2001) ainda destaca que quanto maior for a capacidade de interceptação vegetal de um determinado local, maior será a redução das vazões médias registradas.

Os fenômenos de evaporação e evapotranspiração transformam a água na fase líquida em vapor d'água que retorna à atmosfera. Esses dois processos ocorrem de forma natural somente se a energia proveniente do sol ou da atmosfera for inserida do sistema. A evaporação constitui um processo físico de transformação de um líquido ou sólido para o estado gasoso, já a evapotranspiração é toda perda de água provocada pela evaporação do solo e da transpiração vegetal.

A água que atinge o solo em estado líquido passa pelo processo de infiltração. Esse processo ocorre até o momento em que o solo atinge a situação de saturação de sua camada superior e então a partir desse excedente se inicia o processo de escoamento superficial. Parte da precipitação que sofreu infiltração é utilizada pelas plantas que, por fim, transferem a água à atmosfera pelo fenômeno da transpiração, em forma de vapor. Já a água infiltrada e não coletada pelas raízes das plantas, passa a exercer um movimento descendente e atinge o lençol freático. Silva (2008) conclui que o escoamento de base dos rios, proveniente da drenagem da água subterrânea, reflete o aporte de água na bacia nas estações secas, sendo um processo de fundamental importância do ponto de vista ambiental.

A parcela da precipitação que ainda restou do balanço anterior é convertida em escoamento superficial que gera vazão alimentando assim os cursos d'água. Nessa fase, a existência de cobertura vegetal no solo é de extrema importância. Através dela, a energia de movimento da água é amortecida, minimizando os efeitos da erosão além da criação de obstáculos ao escoamento, favorecendo a infiltração ao longo do percurso. Todo o ciclo hidrológico é fechado então pelo processo de evaporação que está presente em todas as suas fases.

Portanto, para quantificar o excesso ou escassez hídricos de um determinado solo utiliza-se o parâmetro denominado Balanço Hídrico. De acordo com Liu (2006), o balanço hídrico pode ser considerado uma equação de conservação de massa onde a entrada e saída de água são iguais em um determinado volume de solo por um tempo também determinado. Sendo assim, os parâmetros de entrada desse balanço são as diferentes formas de precipitação, parte do escoamento superficial e subterrâneo, condensação do orvalho, entre outros. Já a saída inclui a evapotranspiração real que é a soma da água

evaporada pelo solo e transpirada pela vegetação, água consumida por animais, população e indústrias, entre outros.

Como a medida direta dos parâmetros do balanço hídrico é uma tarefa de certa complexidade, Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram o balanço hídrico climatológico, que tem o objetivo de determinar o regime hídrico de uma determinada região sem que para isso fossem necessárias medidas diretas de parâmetros do solo. Para o desenvolvimento do método é necessário definir, para um período de tempo, a capacidade de água disponível no solo, os valores de precipitação e evapotranspiração de uma cultura de referência. Sendo assim, é possível estimar o armazenamento de água no solo, a evapotranspiração real, déficit e excedente hídricos (SOUZA e GOMES, 2008).

A Figura 3.4.1 exemplifica as saídas e entradas de água no sistema que é a base para a determinação e cálculo do balanço hídrico em um determinado local.

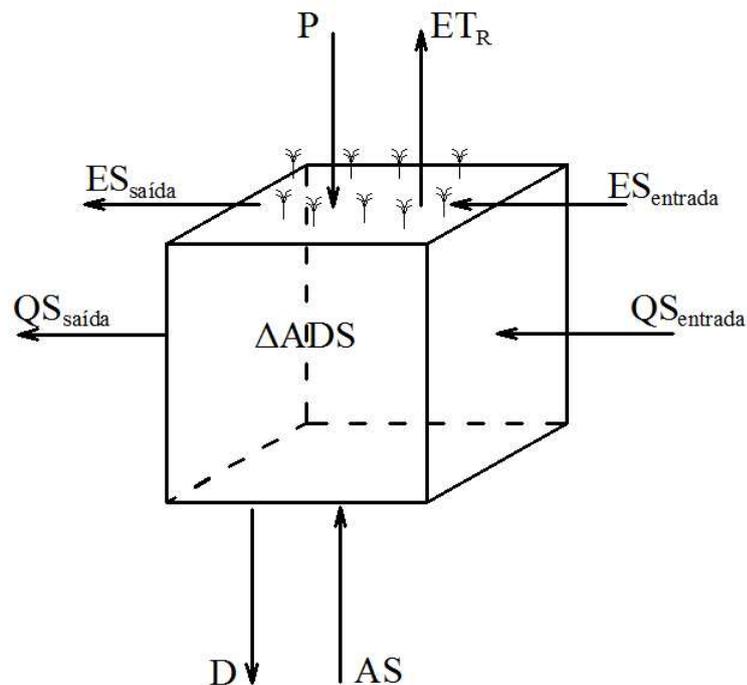


Figura 3.4.1: Parâmetros de entrada e saída de água no solo para constituição do balanço hídrico (fonte: adaptado de Liu, 2006).

Os parâmetros de entrada do sistema, de acordo com a Figura 3.4.1 são: P (representa a entrada de água no sistema em forma de precipitação), $ES_{entrada}$ (representa a parcela de escoamento superficial que entra no sistema), $QS_{entrada}$ (vazão subterrânea de entrada lateral, representada pela água que abastece os aquíferos) e AS (reabastecimento de água

subterrânea). Já os parâmetros de saída considerados nesse esquema são: ET_R (representa a evapotranspiração real das culturas em uma determinada porção de solo), $ES_{saída}$ (representa a parcela de escoamento superficial que sai do sistema), $QS_{saída}$ (vazão subterrânea de saída lateral) e D (drenagem do próprio solo).

Desta forma, é possível perceber a importância da presença de cobertura vegetal quando se trata do ciclo hidrológico e da preservação de um determinado local. Isso se dá pelo fato de a existência de cobertura vegetal promover, por exemplo, o fenômeno da interceptação e da redução da energia de movimento da água protegendo, assim, o solo de processos erosivos. Portanto, torna-se possível e justificável relacionar as alterações no uso do solo de uma determinada região com variáveis do balanço hídrico que tem mostrado alguma alteração com o passar do tempo.

4 METODOLOGIA

4.1 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

A realização deste trabalho envolveu o uso das imagens MODIS de cobertura do solo que possuem resolução espacial de 500 metros, contemplando desde o ano 2001 até ano 2012, inicialmente para todo o território brasileiro.

Essas imagens foram obtidas através do Reverb ECHO, uma plataforma que disponibiliza diferentes produtos provenientes dos sensores remotos. Para este trabalho o produto utilizado foi o MCD12Q1 que fornece dados já classificados de cobertura do solo, abordando até 17 (dezesete) classes e contemplando cinco tipos de classificação derivadas de um método supervisionado de classificação. As imagens são disponibilizadas pelo sistema em forma de cenas que são pequenos fragmentos de imagens no formato HDF e projeção Sinusoidal (SIN), que posteriormente devem ser agrupadas formando um mosaico que constitui a imagem de trabalho (NASA, 2015d).

Para a realização dos mosaicos de cada um dos anos, foi utilizada a ferramenta MRT (*MODIS Reprojection Tool*). Essa ferramenta agrupa cenas de imagens provenientes do mesmo tipo de produto que devem possuir as mesmas dimensões de bandas, mesmo tipo de dado, projeção e resolução espacial (NASA, 2011). Antes de concluir o mosaico é preciso definir qual tipo de classificação, entre os cinco disponíveis, a imagem final irá receber. Para esse trabalho escolheu-se o esquema de classificação Tipo 2 que é orientado e supervisionado pela Universidade de Maryland (UMD) nos Estados Unidos (NASA, 2015d). Esse Tipo 2 de classificação possui nível de detalhamento inferior ao do Tipo 1, entretanto contempla todas as classes necessárias para esse trabalho. Esse esquema de classificação aborda as classes que estão descritas na Tabela 4.1.1.

As imagens de cada ano, compostas por cenas já agrupadas após a realização do mosaico, foram reprojatadas para o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). De acordo com o IBGE (2015a), desde 25 de fevereiro de 2015, o SIRGAS 2000 vem sendo o único sistema geodésico de referência oficialmente utilizado no Brasil. Essa característica se dá pelo fato de o referencial estar respaldado por lei e também por garantir consistência e precisão tanto no seu uso quanto na combinação de diferentes bases de dados georreferenciadas.

Após o tratamento das imagens, foram realizados recortes de cada uma delas utilizando um *shape file* de contorno no território brasileiro para que só a área de interesse fosse analisada. Essas manipulações, bem como a transformação geográfica foram realizadas com o auxílio do software ArcGIS 10.2.1 (ESRI, 2014).

Tabela 4.1.1: Classes de uso do solo abordadas pelo Tipo 2 de classificação (fonte: adaptado de NASA, 2015d).

Código das Classes	Descrição
0	Água
1	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada (Evergreen Needleleaf forest)
2	Floresta perene composta por vegetação latifoliada (Evergreen Broadleaf forest)
3	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada (Deciduous Needleleaf forest)
4	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada (Deciduous Broadleaf forest)
5	Floresta mista
6	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem
7	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem
8	Savana arborizada
9	Savana (Pastagem)
10	Vegetação herbácea
12	Terras agrícolas
13	Área Urbana
16	Vegetação estéril ou escassa (solo exposto)

4.2 GERAÇÃO DOS MAPAS DE USO DO SOLO DE 2001 A 2012

Os mapas de uso do solo para cada ano de estudo foram gerados utilizando novamente o software ArcGIS 10.2.1 (ESRI, 2014). Com o recorte realizado nas imagens de cada ano, foi possível trabalhar a partir desse momento somente com a área de interesse que nesse caso é o território brasileiro. Como as imagens adquiridas já possuem classificação prévia,

foi necessário somente realizar uma análise da tabela de atributos que cada uma das imagens possui e assim os mapas de cobertura do solo puderam ser gerados. No que diz respeito à análise das imagens, é possível perceber alterações intensas principalmente nas classes que tratam de terras agrícolas, pastagens e florestas.

4.3 COMPARAÇÃO DAS IMAGENS ANUAIS PARA A REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Com o objetivo de verificar de que forma ocorreram as mudanças anuais no uso do solo e definir qual a sua natureza e dimensão em pequena escala, foram realizadas comparações das imagens através da metodologia desenvolvida por Ribeiro (2001).

A região escolhida para o desenvolvimento desta fase do trabalho foi a do Rio São Francisco. A motivação pela escolha dessa região hidrográfica vem da observância dos processos intensos de mudança no uso do solo recorrentes no local além de desafios relacionados aos recursos hídricos que a região enfrenta, como já descritos no item 3.3 deste trabalho.

Sendo assim, Ribeiro (2001) aplica um método baseado em um código computacional desenvolvido em linguagem Fortran. Esse código é responsável pela leitura de duas imagens de entrada que possuem o mesmo tipo e tamanho e posteriormente pela comparação *pixel a pixel* por meio da análise dos códigos de uso do solo especificados em cada uma dessas imagens. Como resultado dessa comparação, o código gera um arquivo de saída que traz em cada *pixel* uma informação do tipo de alteração anual ocorrida. Assim, foi possível gerar mapas de transições que registrem as 79 combinações de mudanças possíveis para a classificação apresentada pelo produto de entrada.

Para isso, foi preciso transformar as imagens que seriam comparadas para o formato texto (.txt). Sendo assim, elas foram lidas, duas a duas, pelo código que por sua vez gerou um terceiro arquivo, também no formato texto, nas mesmas dimensões das duas imagens anteriores, contendo uma informação de transição de uso do solo para cada *pixel*. Como exemplo, se a imagem 1 possui em um *pixel* o código 5, correspondente à Floresta Mista e a imagem 2 possui no mesmo *pixel* o código 12, correspondente à Terras Agrícolas, a terceira imagem receberá naquele mesmo *pixel* o código 55 que indica, no código, a transição de Floresta Mista para Terras Agrícolas.

Para esse trabalho foram gerados 11 mapas de transições para a região hidrográfica do rio São Francisco, compreendendo o intervalo entre os anos 2001 e 2012.

A Tabela A.1 localizada no Apêndice A caracteriza cada uma das 79 transições tratadas pelo código. As transições com códigos 17, 18, 19, 26, 27, 28, 29, 30, 40, 50, 60 e 70 não foram tratadas nesse código em Fortran, portanto não possuem descrição.

Como já dito anteriormente, para este trabalho, foi utilizado o Tipo 2 de classificação das imagens. O Tipo 2 de classificação foi utilizado por ter classes que atendiam bem a esse trabalho. Assim, o Tipo 1 não foi utilizado por possuir classes com nível de detalhamento não compatível com os objetivos desse trabalho. Pode-se citar o fato de o Tipo 1 possuir as classes “gelo e neve”, o que para esse trabalho não traria nenhum resultado. Dentro do grupo de classes que esse tipo aborda, excluem-se as classes 11, 14 e 15 que são respectivamente áreas permanentemente alagadas, vegetação natural, gelo/neve. Entretanto, o código em linguagem Fortran utilizado nesse trabalho desenvolvido por Ribeiro (2001), trata o Tipo 1 de classificação, ou seja, ele contempla inclusive as classes excluídas pelo Tipo 2. Desta forma, algumas transições tratadas pelo código não registrarão áreas com sua ocorrência e portanto aparecerão somente na Tabela A.1.

4.4 AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O BALANÇO HÍDRICO

Como Tucci (2001) destaca, o uso/cobertura do solo interfere nas fases do ciclo hidrológico e portanto podem interferir em variáveis do balanço hídrico. Desta forma, a finalidade dessa etapa do trabalho é identificar alguma alteração no que diz respeito ao comportamento hídrico de uma determinada região, em um período de tempo, e assim tentar relacioná-la às transições ocorridas no uso do solo próximas ao mesmo local. Para este trabalho, o parâmetro analisado foi a vazão dos cursos d’água na região hidrográfica do rio São Francisco.

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados do banco de dados da Agência Nacional de Águas – ANA através do Sistema de Informações Hidrológicas – HidroWeb (ANA, 2015). Foram utilizados dados de 1990 até 2014 com frequência mensal, de 18 estações fluviométricas que estão descritas na Tabela 4.4.1. Além disso a Figura 4.4.1 ilustra um mapa com a localização de cada uma dessas estações numeradas de 1 a 18.

Tabela 4.4.1: Estações fluviométricas utilizadas nas análises.

Código	Nome	Localização (Município)	Coordenadas Geográficas
(1) 40500000	Martinho Campos	Martinho Campos (MG)	-19°19'54", -45°13'17"
(2) 40530000	Abaeté	Abaeté (MG)	-19°9'46", -45°26'31"
(3) 40330000	Velho da Taipa	Conceição do Pará (MG)	-19°41'38", -44°55'51"
(4) 40400000	Álvaro da Silveira	Bom Despacho (MG)	-19°45'11", -45°7'3"
(5) 40850000	Ponte da Taquara	Paraopeba (MG)	-19°25'23", -44°32'52"
(6) 40070000	Ponte do Chumbo	Moema (MG)	-19°46'34", -45°28'45"
(7) 42290000	Ponte da BR040 - Paracatu	Lagoa Grande (MG)	-17°30'9", -46°34'16"
(8) 41135000	Pirapora - Barreiro	Pirapora (MG)	-17°22'9", -44°56'35"
(9) 43200000	São Romão	São Romão (MG)	-16°22'21", -45°4'12"
(10) 43429998	Arinos - Montante	Arinos (MG)	-15°55'26", -46°6'34"
(11) 44290002	Pedras de Maria da Cruz	Pedras de Maria da Cruz (MG)	-15°36'37", -44°23'43"
(12) 45260000	Juvenília	Juvenília (MG)	-14°15'36", -44°9'8"
(13) 45960001	Porto Novo	Santana (BA)	-13°17'29", -43°54'32"
(14) 46035000	Gameleira	Sítio do Mato (BA)	-12°52'7", -43°22'47"
(15) 46105000	Paratinga	Paratinga (BA)	-12°41'48", -43°13'35"
(16) 46360000	Morpará	Morpará (BA)	-11°33'30", -43°16'57"
(17) 46902000	Boqueirão	Mansidão (BA)	-11°21'19", -43°50'44"
(18) 48290000	Santa Maria da Boa Vista	Santa Maria da Boa Vista (PE)	-8°48'35", -39°49'26"

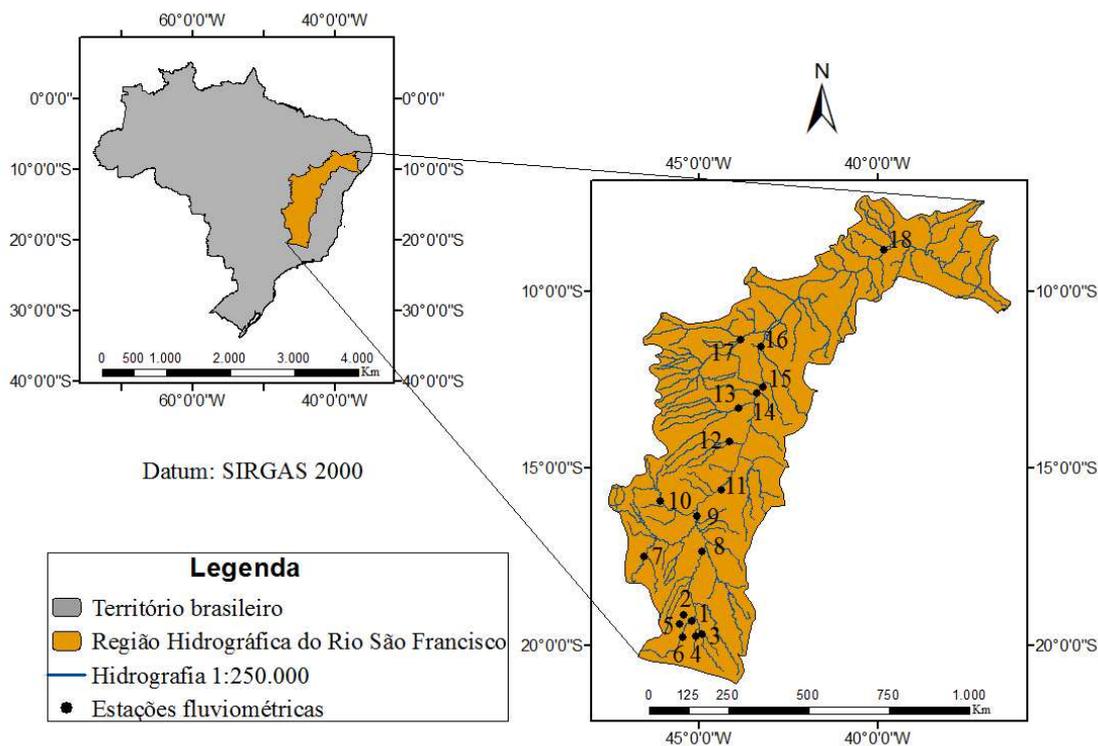


Figura 4.4.1: Localização das estações fluviométricas.

Como os dados disponibilizados pelas estações possuíam falhas, eles foram preenchidos a partir da correlação que possuíam com as outras estações. As duas estações que melhor se correlacionaram foram então utilizadas no processo de preenchimento através de uma equação de regressão linear.

Para realizar as correlações propostas pelo trabalho, as estações fluviométricas foram analisadas por grupos, de acordo com a região em que se encontravam. As estações 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8 estão localizadas do Alto São Francisco, as estações 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 estão localizadas no Médio São Francisco e as estações 16, 17 e 18 localizadas no Submédio e Baixo São Francisco.

Desta forma, os dados mensais de cada estação foram plotados em um gráfico que possuía também a média das vazões mensais de todas as estações daquela determinada região de localização. Então, a partir desses dados extraiu-se as máximas vazões mensais de cada região. Com isso, procedeu-se um cálculo de média simples dessas vazões por década. Os intervalos foram de 1990-1999, 2000-2009 e 2010 a 2014. A partir daí a informação sobre as médias das vazões máximas por década foram incluídas nos gráficos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 COMPORTAMENTO DAS MUDANÇAS DO USO DO SOLO NO BRASIL

O objetivo principal desse trabalho foi explorar e identificar as modificações sobre o uso do solo no território brasileiro e a magnitude dessas transformações em termos de área. Para isso, foram utilizados produtos de sensores remotos que possuem informações anuais sobre uso/cobertura do solo. As imagens utilizadas são provenientes do instrumento MODIS, acoplado nos satélites Terra e Aqua, operados pela NASA. Essas imagens são previamente classificadas pelo sistema e fornecem ao usuário até 17 classes diferentes de uso do solo.

Desta forma, foram gerados mapas de uso do solo de todo o território brasileiro desde o ano 2001 até o ano 2012 que contemplam todas as classes tratadas na imagem. Sendo assim, foi possível concluir que o país é predominantemente ocupado por florestas de diferentes naturezas, pastagens e terras destinadas à produção agrícola. Essas classes de predominância observadas em todos os anos de estudo, estão explicadas nas Figuras 5.1.1 e 5.1.2 que ilustram o comportamento dessas classes com o passar do tempo. Ao analisar esse gráfico é possível perceber que as curvas referentes às classes de florestas e pastagens apresentam comportamentos contrários. A medida em que uma das classes ganha área com o passar do tempo, a outra perde área simultaneamente. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de grande parte das florestas brasileiras terem sido convertidas em áreas de pastagens nesses doze anos de estudo.

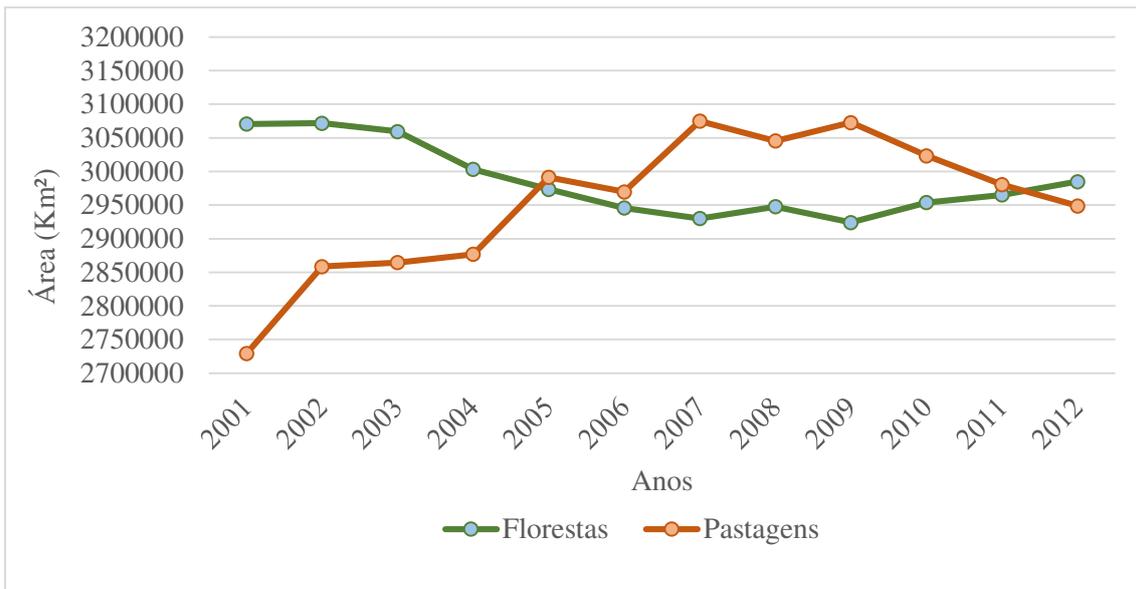


Figura 5.1.1: Comportamento das alterações das classes floresta e pastagem, para todo o Brasil, durante os anos de estudo.



Figura 5.1.2: Comportamento das alterações da classe terras agrícolas, para todo o Brasil, durante os anos de estudo.

Já para a classe que trata das terras agrícolas no Brasil, tem-se uma elevação marcante nas áreas destinadas à esse fim entre os anos de 2002 e 2004. Isso pode ser explicado, entre outros motivos, pelo aumento das áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar que teve uma elevação na produção entre os anos de 2000 e 2005 para a obtenção de açúcar, álcool e energia como destaca Abreu et al. (2011). Além disso, a soja no Brasil teve

grande destaque no ramo da exportação a partir da década de 1980. De acordo com Scolari (2009), no ano de 1995, a produção de soja destinada para a exportação foi de 16.856,4 toneladas e para o ano de 2003 esse número mais que dobrou, chegando a 35.978,2 toneladas de soja exportadas.

Portanto, estima-se através dos resultados obtidos para o Brasil, que de 2001 para 2012 houve um aumento de 3,20% das pastagens (219.821 Km²) e de 1,25% das terras destinadas ao cultivo agrícola, no entanto foi registrada queda de 1,65% das florestas (113.151,5 Km²), o que corresponde à área de dois estados da Paraíba.

Por meio das análises é possível observar também, através da Tabela A.2 (Apêndice A), que os anos de 2004 e 2008 registraram baixa quantidade de *pixels* classificados como “água”, se comparados aos outros anos de estudo. O período em que o satélite capta as imagens (períodos de cheia ou seca) influencia diretamente no produto final. Portanto acredita-se que nesses dois anos as imagens tenham sido captadas em épocas de estiagem, justificando assim a queda na quantidade de *pixels*. Já os aumentos da mesma classe observados em alguns anos de estudo podem ser explicados principalmente pela construção de grandes reservatórios de hidroelétricas destinados à produção de energia.

Além disso, a Tabela A.2 mostra em termos de área a evolução de todas as outras classes de uso do solo no Brasil nos doze anos de estudo. Para ilustrar onde essas modificações ocorreram e qual foi a magnitude das transições, as Figuras 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5 mostram a situação do uso do solo no Brasil respectivamente nos anos de 2001 a 2004, 2005 a 2008 e 2009 a 2012. Os mapas foram gerados a partir das imagens provenientes de sensoriamento remoto e por meio de técnicas e ferramentas de geoprocessamento.

Para que fosse possível observar, em mesoescala, a natureza das transições do uso do solo para posteriormente analisar suas interferências no balanço hídrico do local, a região hidrográfica do São Francisco foi selecionada e inicialmente passou pelo mesmo processo descrito anteriormente.

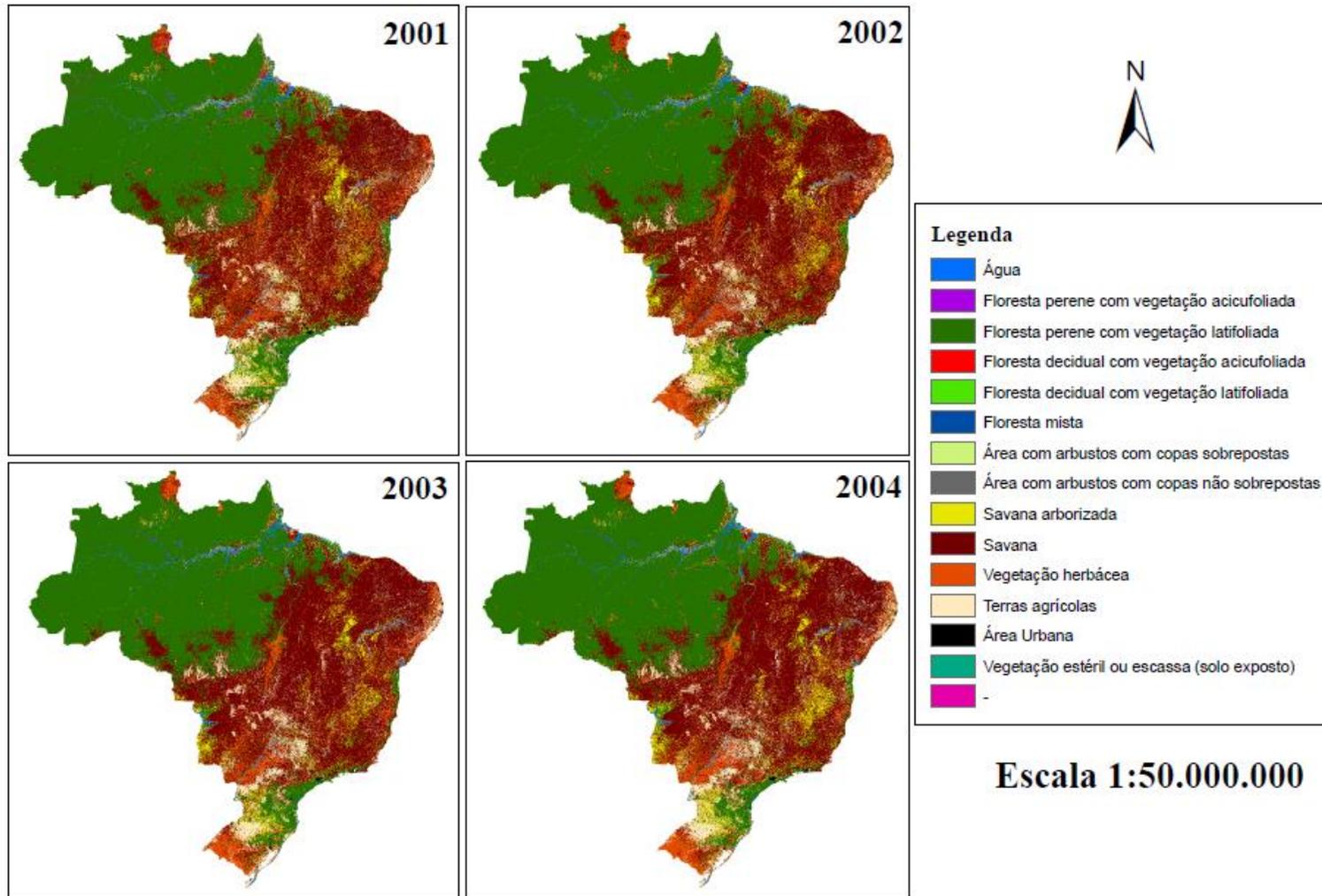


Figura 5.1.3: Situação do uso do solo no Brasil de 2001 a 2004.

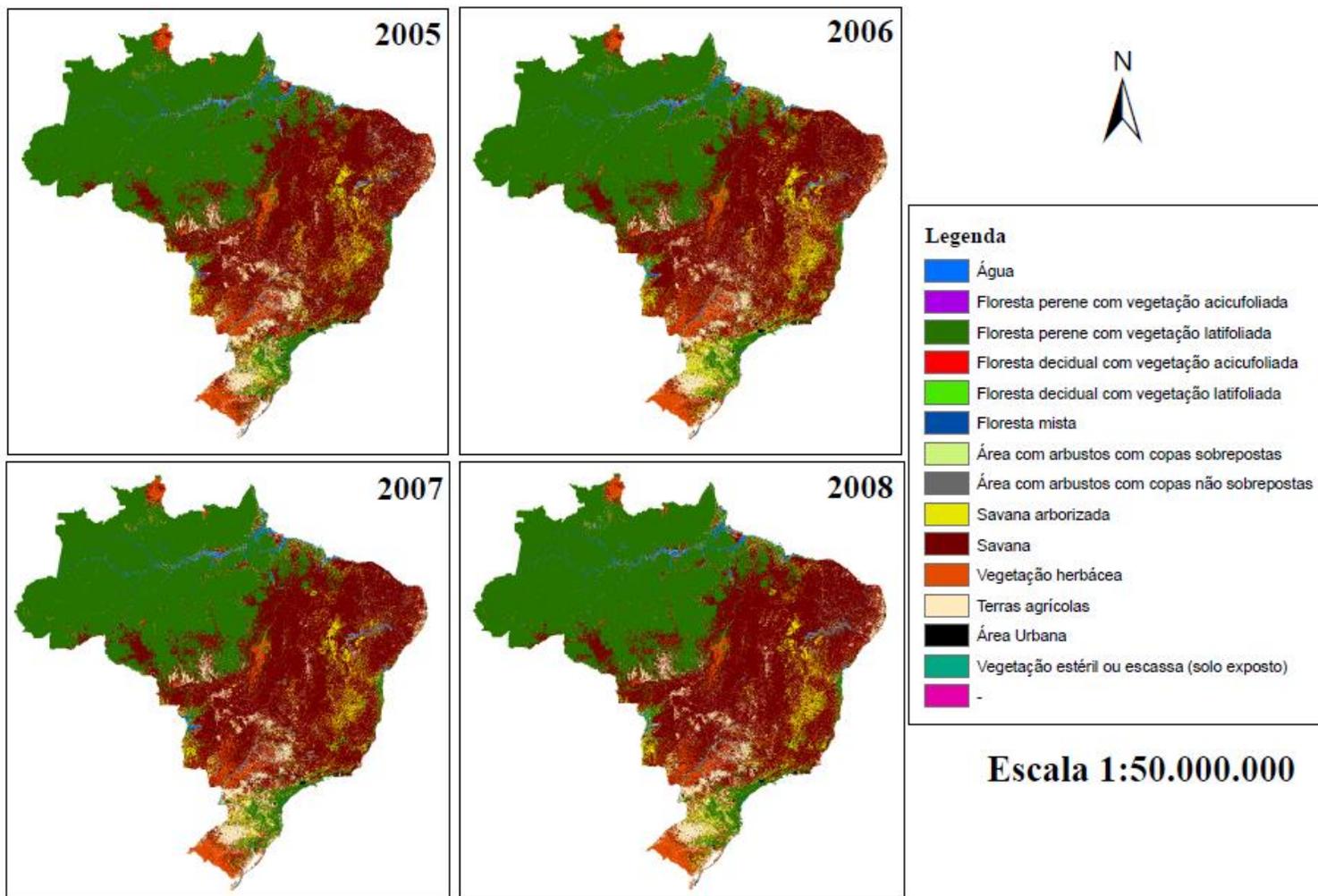


Figura 5.1.4: Situação do uso do solo no Brasil de 2005 a 2008.

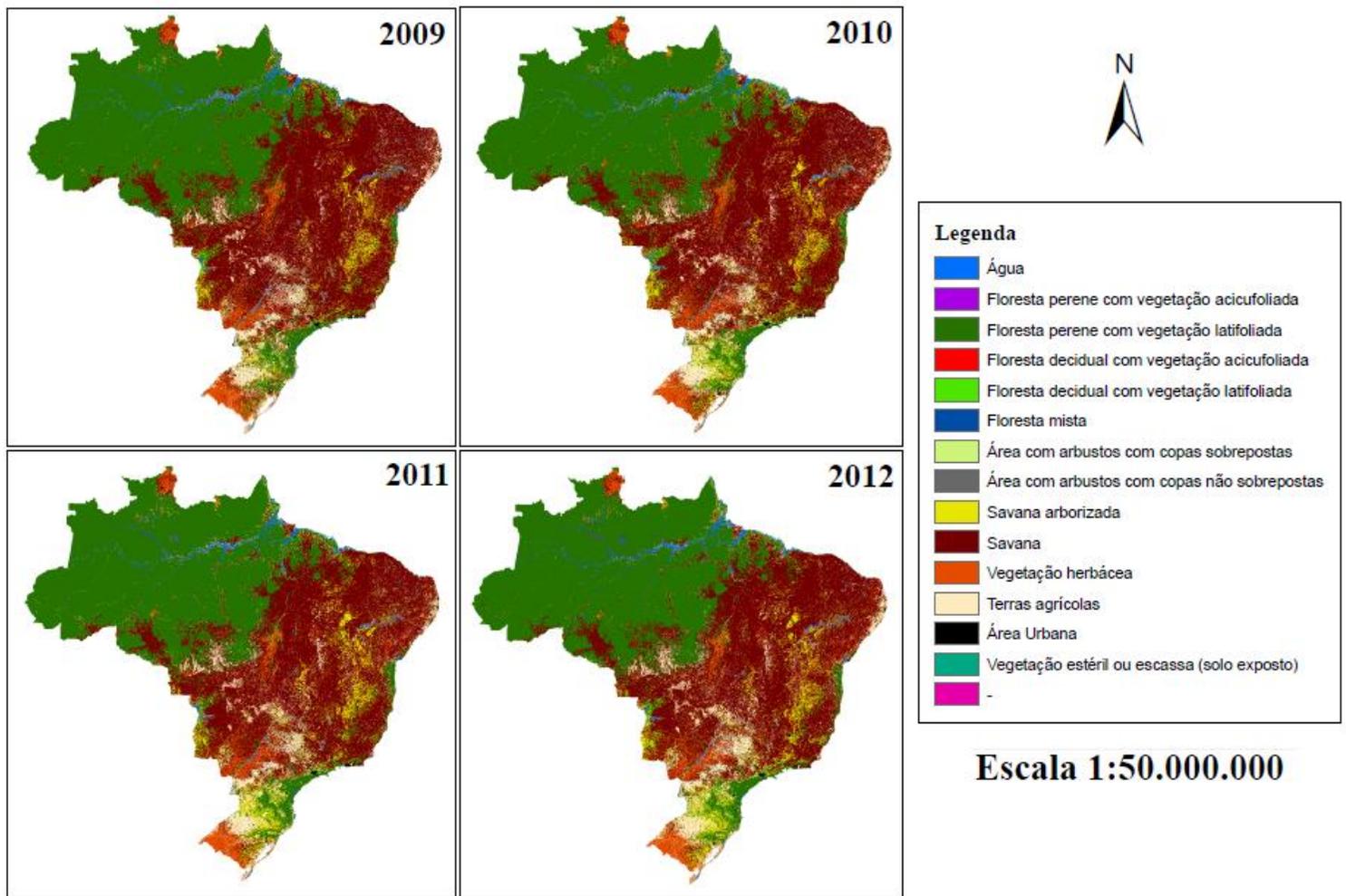


Figura 5.1.5: Situação do uso do solo no Brasil de 2009 a 2012.

5.2 COMPORTAMENTO DAS MUDANÇAS DO USO DO SOLO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Como forma de identificar a natureza das modificações ocorridas na região hidrográfica do rio São Francisco, esse trabalho fez uso de um código em linguagem Fortran desenvolvido por Ribeiro (2001) que recebe como informação de entrada duas imagens classificadas de uso do solo de mesmo tamanho e apresenta como saída uma terceira imagem que evidencia, em cada *pixel*, a transição ocorrida. No Apêndice A deste trabalho, a Tabela A.1 define quais transições são tratadas pelo código.

Inicialmente, foram gerados mapas de uso do solo de forma a ilustrar a situação na região hidrográfica do São Francisco nos anos de estudo. As Figuras 5.2.1, 5.2.2 e 5.3.3 mostram a região respectivamente nos anos de 2001 a 2004, 2005 a 2008 e 2009 a 2012. Além disso, a Tabela A.3 (Apêndice A) mostra em termos de área, a evolução do uso do solo na Região Hidrográfica do Rio São Francisco para todas as classes.

Como resultado da execução do código, para todos os anos de estudo foram gerados gráficos que evidenciam de que forma as transições ocorreram na Região Hidrográfica em questão. As Figuras 5.2.4 a 5.2.11 ilustram o comportamento das principais e mais significativas transições observadas ao longo dos anos. A Tabela A.4 presente no Apêndice A descreve em termos de área, as transições tratadas pelo código, desde o ano 2001 até o ano 2012. Tanto as figuras como a tabela podem ser explicadas da seguinte maneira: se uma classe possui, por exemplo, 8,5 km² de transição de área de “Classe A” para “Classe B” de 2001 para 2002, isso significa dizer que 8,5 km² que em 2001 eram classificados como sendo de “Classe A”, em 2002 passaram a ser “Classe B”. Como dito anteriormente, algumas alterações não foram reconhecidas e registradas pelo código, em nenhum dos anos, portanto elas não serão caracterizadas nos mapas mas estarão presentes e descritas na Tabela A.1.

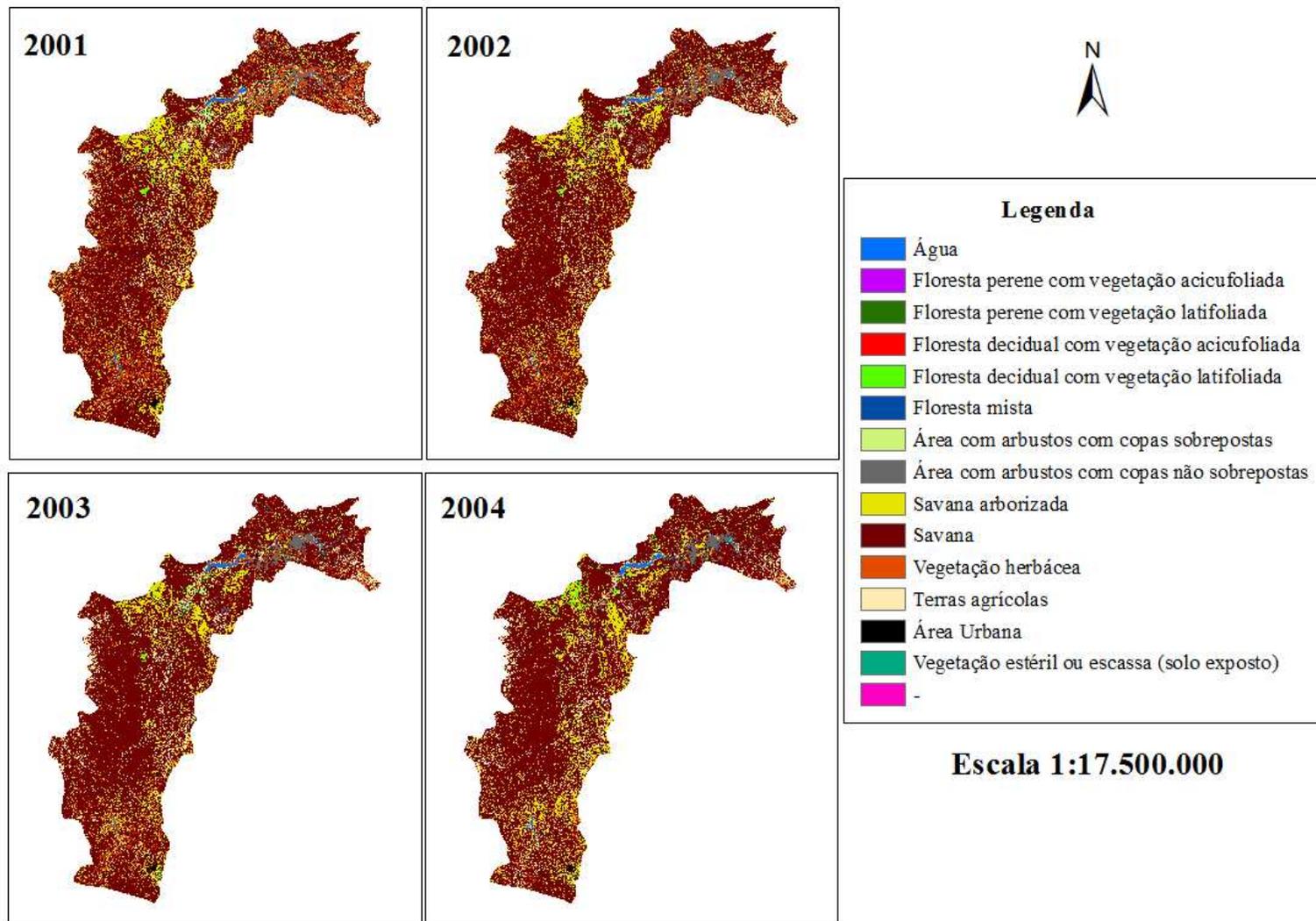


Figura 5.2.1: Situação do uso do solo na Região Hidrográfica do Rio São Francisco de 2001 a 2004.

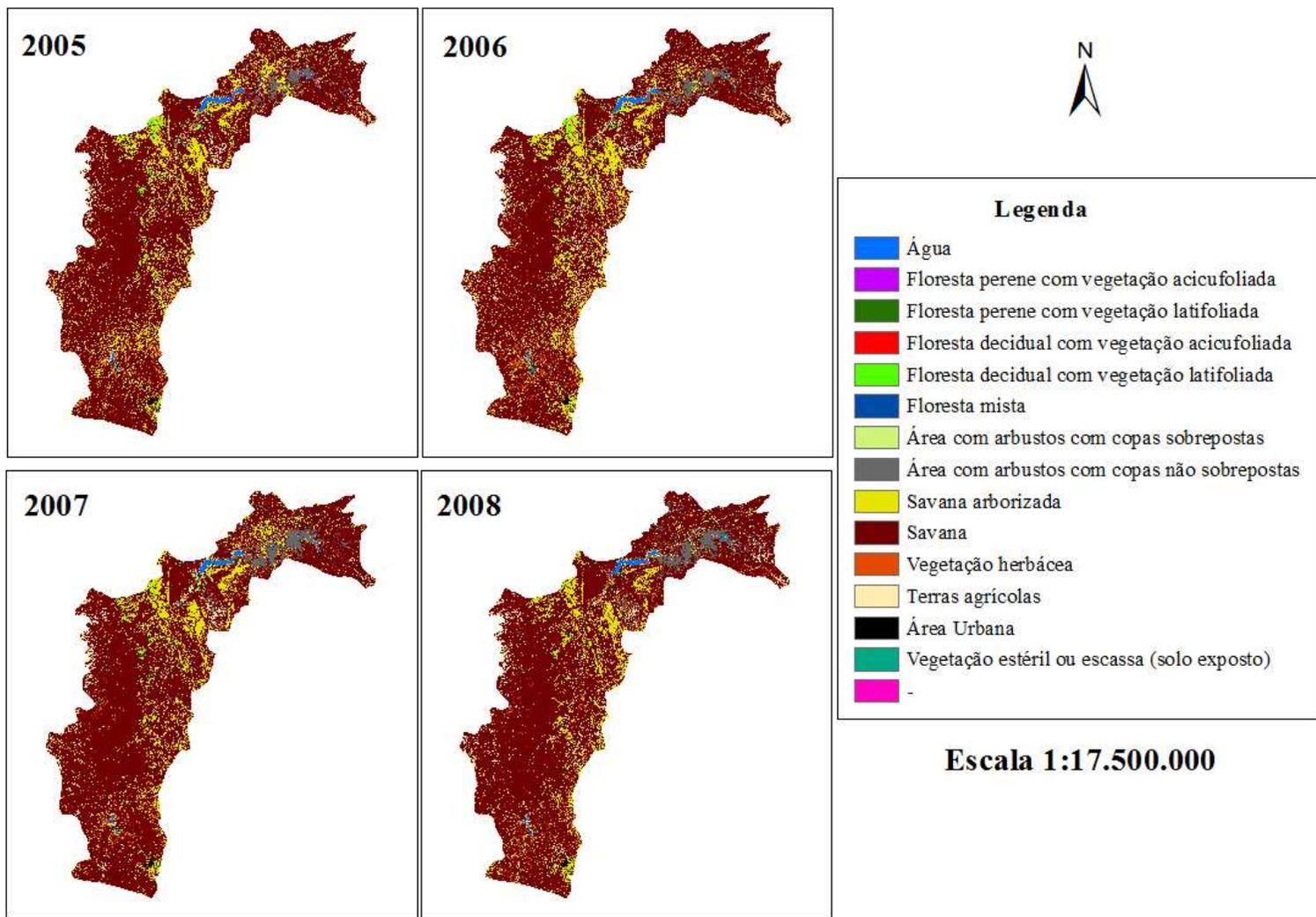


Figura 5.2.2: Situação do uso do solo na Região Hidrográfica do Rio São Francisco de 2005 a 2008.

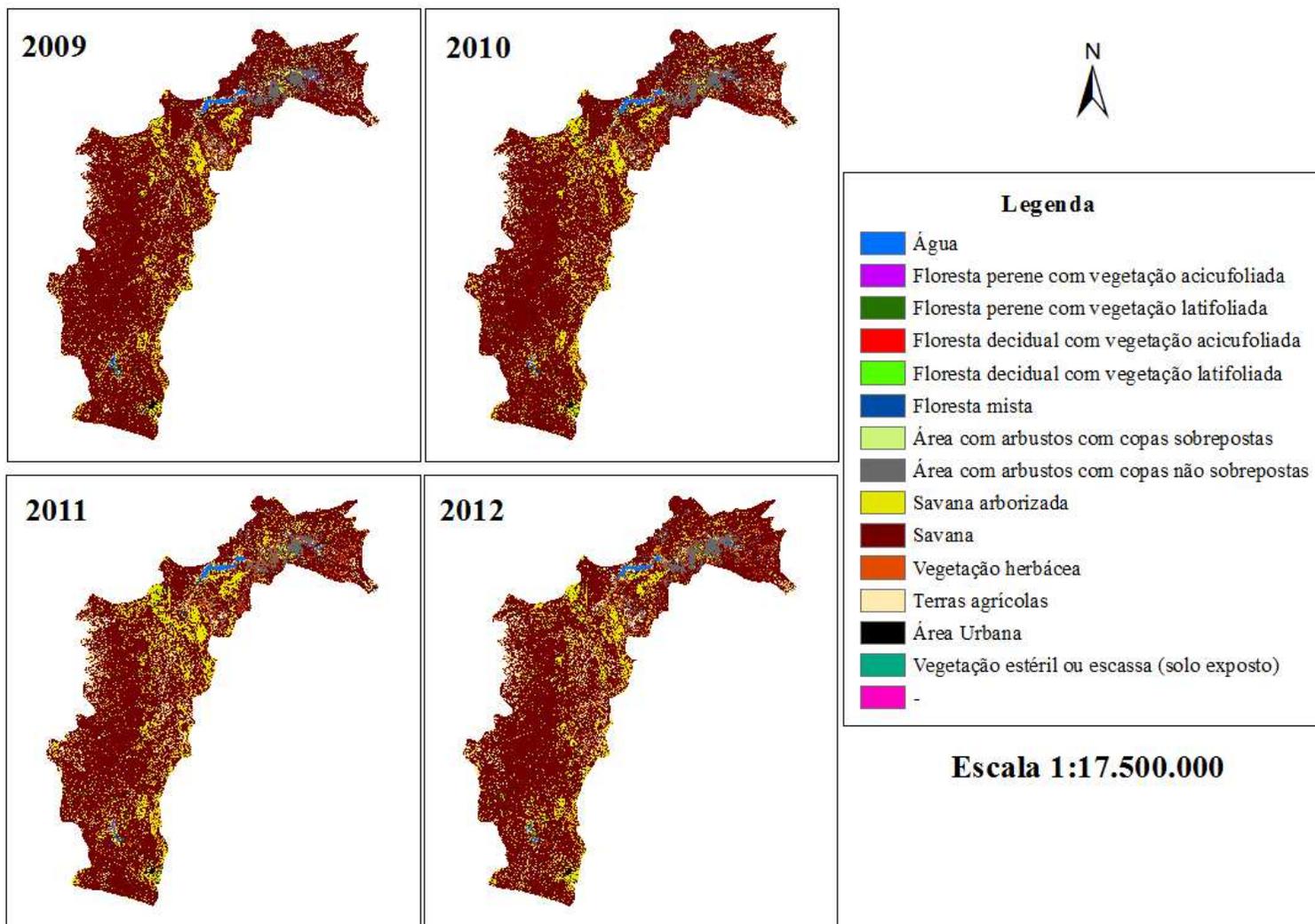


Figura 5.2.3: Situação do uso do solo na Região Hidrográfica do Rio São Francisco de 2009 a 2012.

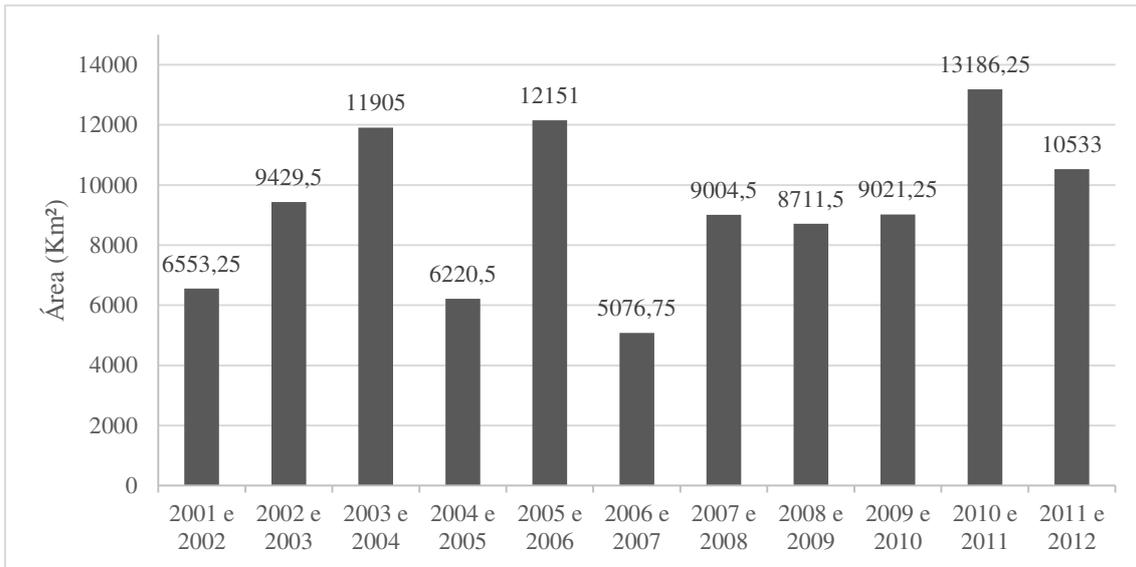


Figura 5.2.4: Transição de pastagens para terras agrícolas na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 59).

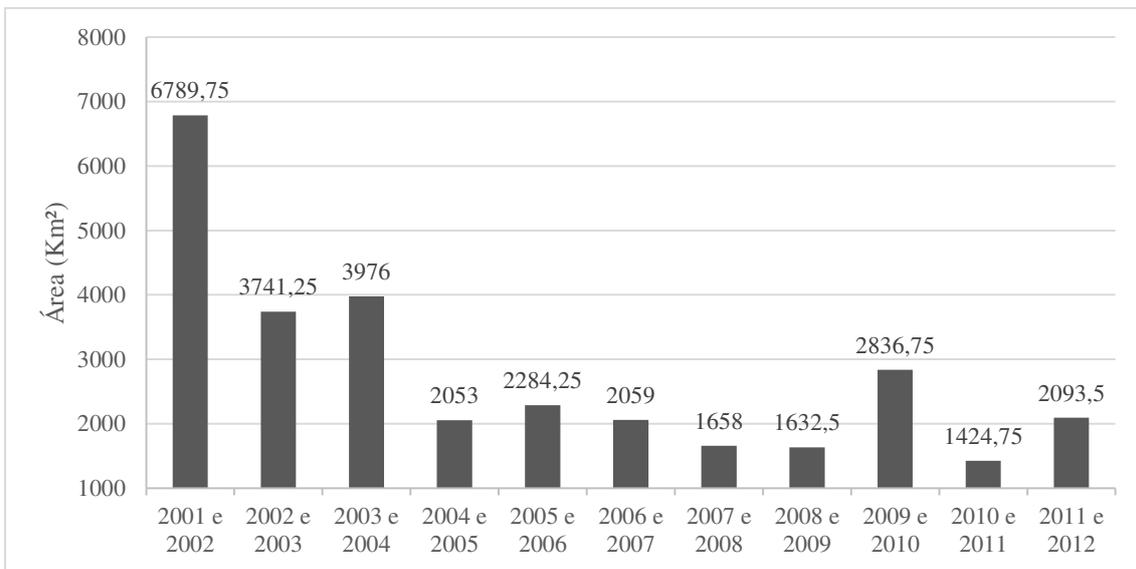


Figura 5.2.5: Transição de mata fechada composta por arbustos para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 36).

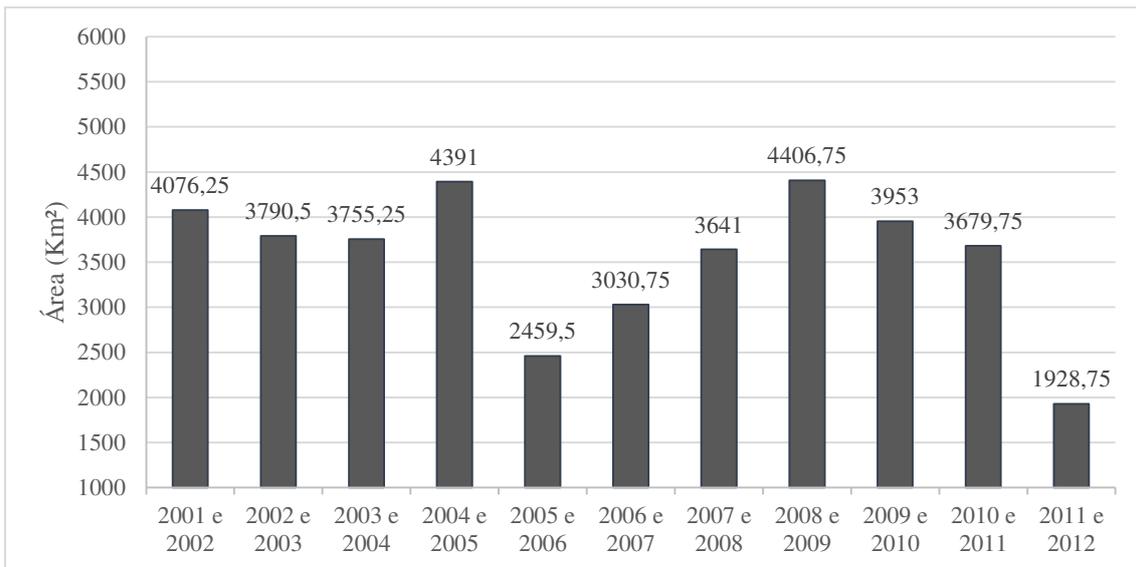


Figura 5.2.6: Transição de mata aberta composta por arbustos para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 37).

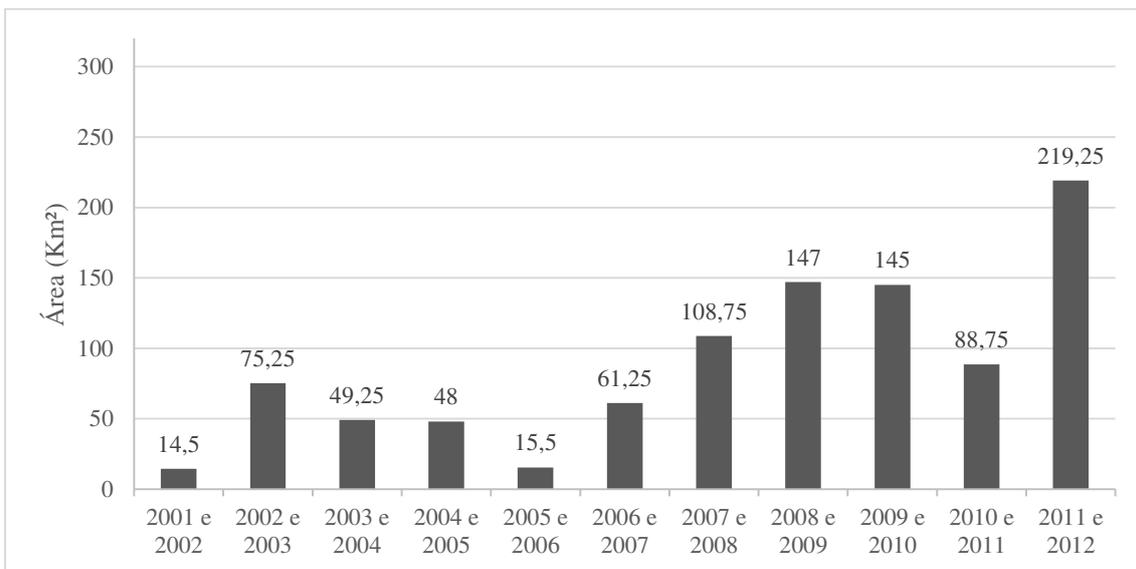


Figura 5.2.7: Transição de floresta perene para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 32).

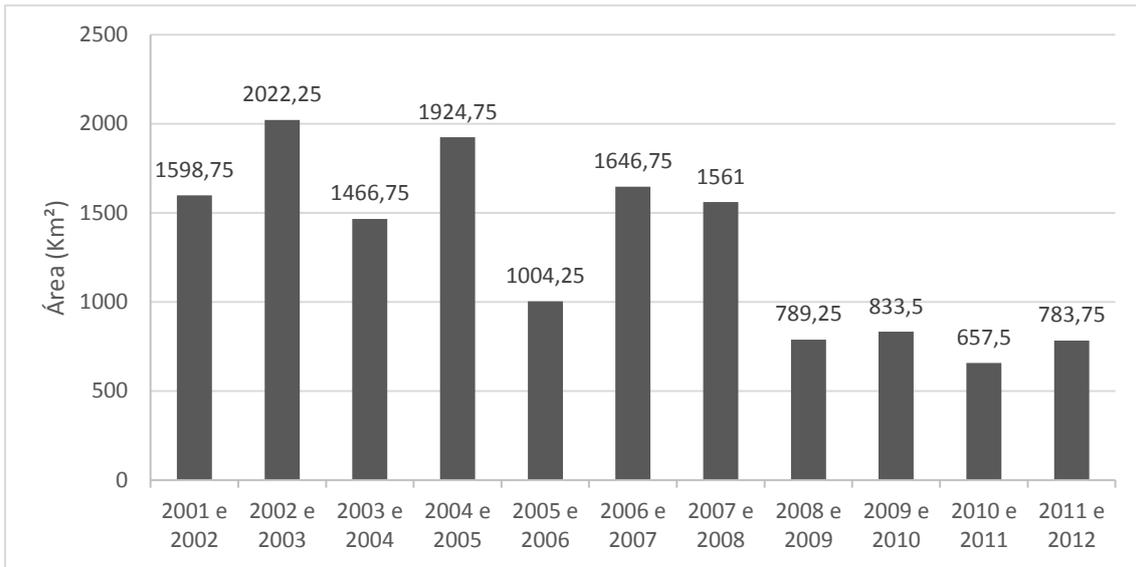


Figura 5.2.8: Transição de floresta decidual para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 34).

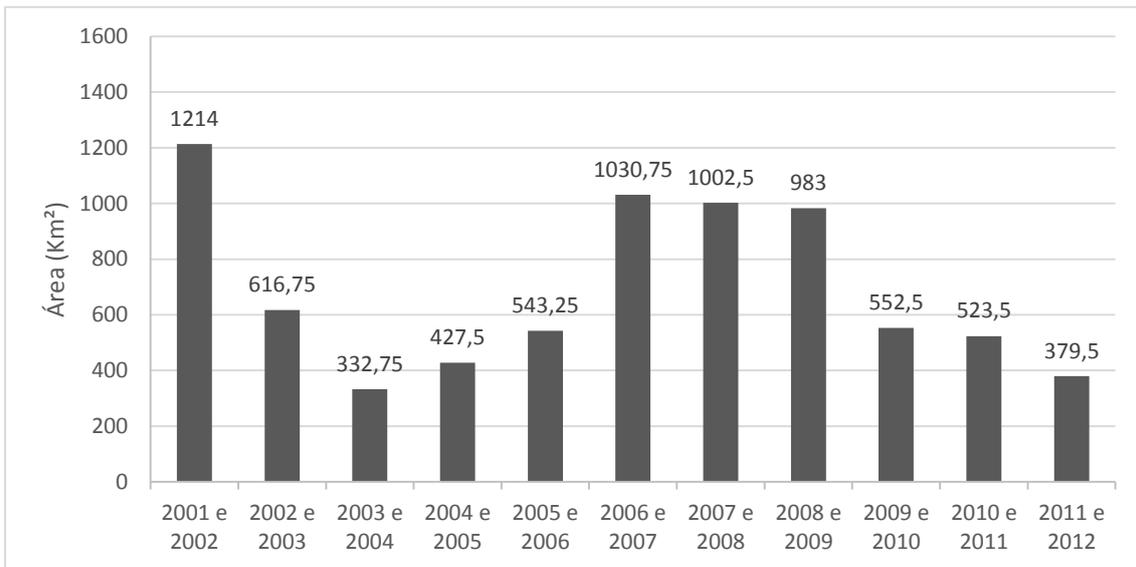


Figura 5.2.9: Transição de floresta mista para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 35).

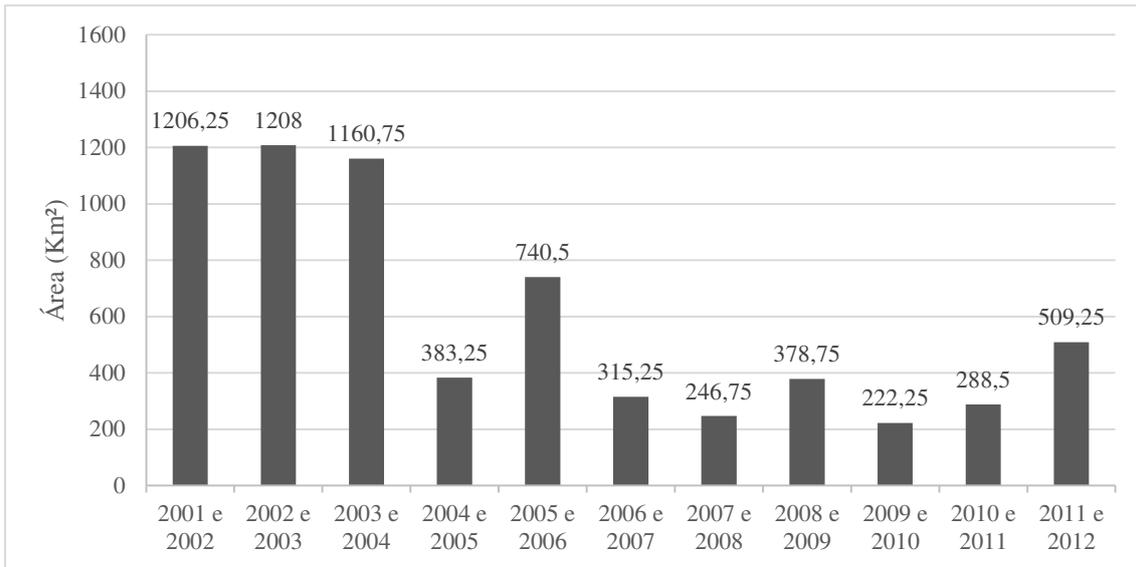


Figura 5.2.10: Transição de solo exposto para terras agrícolas na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 58).

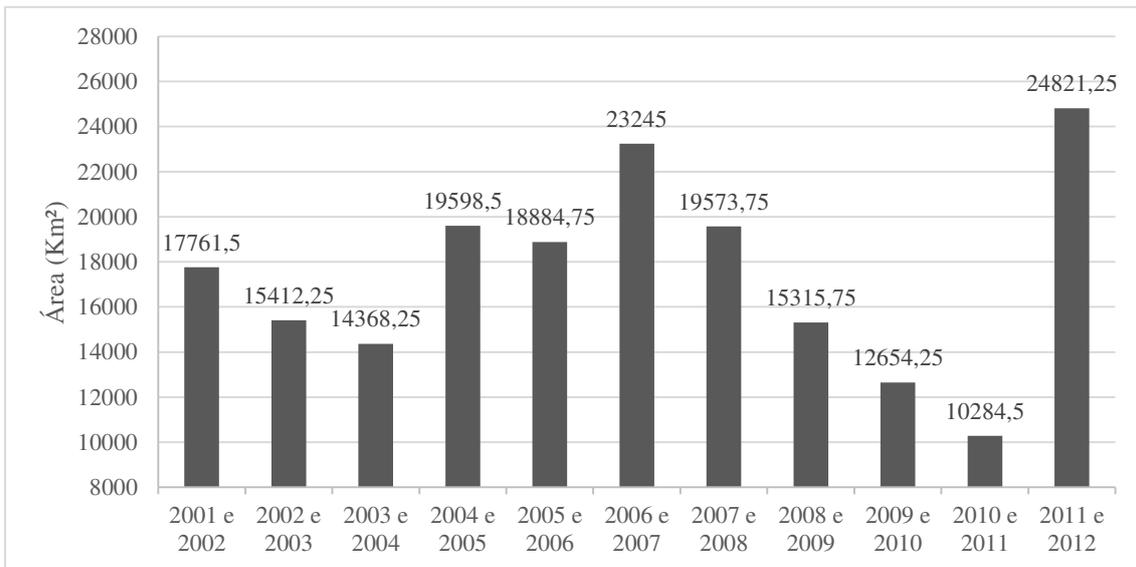


Figura 5.2.11: Transição de savana arborizada para pastagens na região hidrográfica do rio São Francisco (Transição 38).

5.3 RELAÇÕES ENTRE O BALANÇO HÍDRICO E USO DO SOLO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Com o objetivo de avaliar o impacto das alterações no uso do solo no comportamento das vazões dos rios localizados na região hidrográfica do rio São Francisco, esse trabalho analisou dados de 18 estações fluviométricas localizadas na região e comparou cada uma das estações com as vazões médias e máximas registradas. Neste item serão apresentados os principais resultados das análises gráficas.

Em uma primeira análise é possível afirmar que próximo ao ano 1991 houve um regime atípico de vazões que marca um pico muito elevado para todas estações estudadas. Essa característica, em um primeiro momento, não pode ser caracterizada pela intervenção do uso do solo ou de outro fator externo, pois foi um evento pontual de curta duração.

Por outro lado, foi possível observar também que a média das vazões das estações por região e a maioria das estações fluviométricas estudadas apresentaram elevados picos de vazão entre os anos de 2006 e 2012. Essas ocorrências podem ser observadas nas Figuras 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3 que mostram respectivamente as estações fluviométricas Martinho Campos localizada no Alto São Francisco, Pedras de Maria da Cruz, localizada no Médio São Francisco e Boqueirão no Submédio/Baixo São Francisco. É possível perceber nas três figuras, dois picos de vazões, um próximo do final do ano 2006 e o outro no início de 2012. Esses picos além de estarem presentes nas três estações descritas, apareceram também nas outras 15 estações de estudo. A reta vermelha marca a máxima vazão média atingida naquele período de tempo. Assim, observa-se que os dois picos, em todos os gráficos ultrapassaram essa faixa.

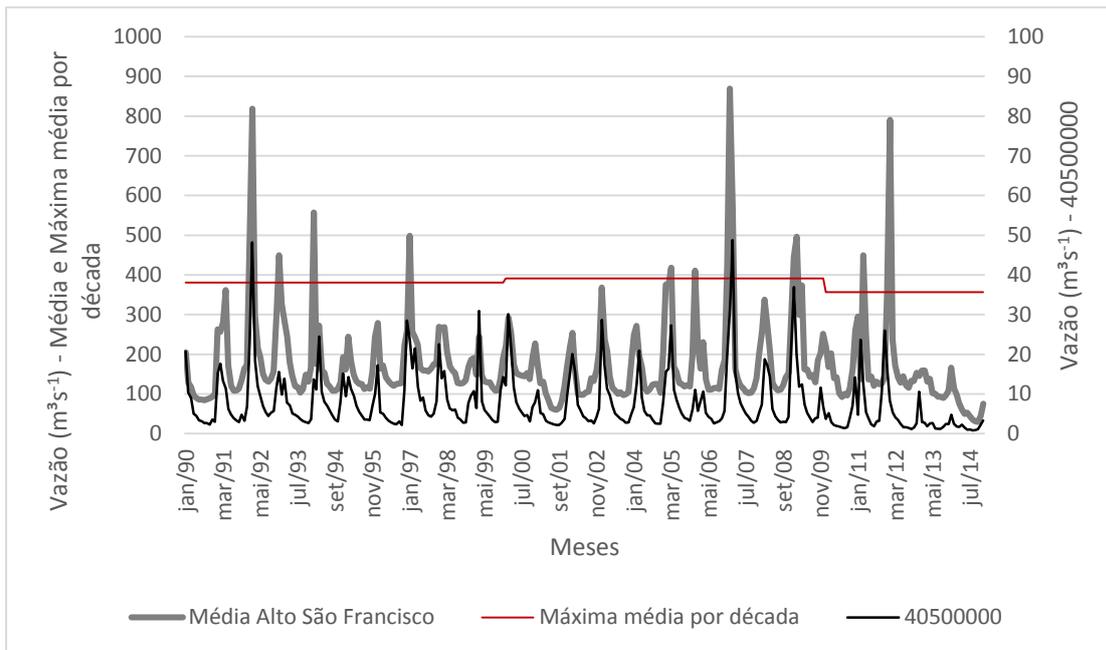


Figura 5.3.1: Comportamento da estação fluviométrica de Martinho Campos (Código: 40500000) em relação à média da região do Alto São Francisco e a máxima média por década.

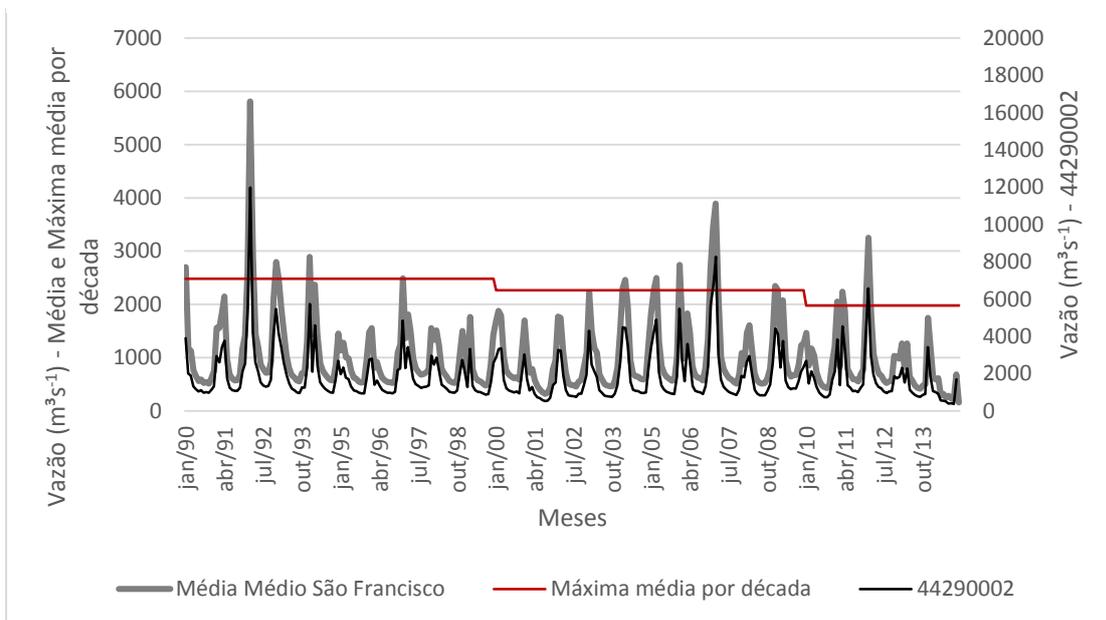


Figura 5.3.2: Comportamento da estação fluviométrica de Pedras de Maria da Cruz (Código: 44290002) em relação à média da região do Médio São Francisco e a máxima média por década.

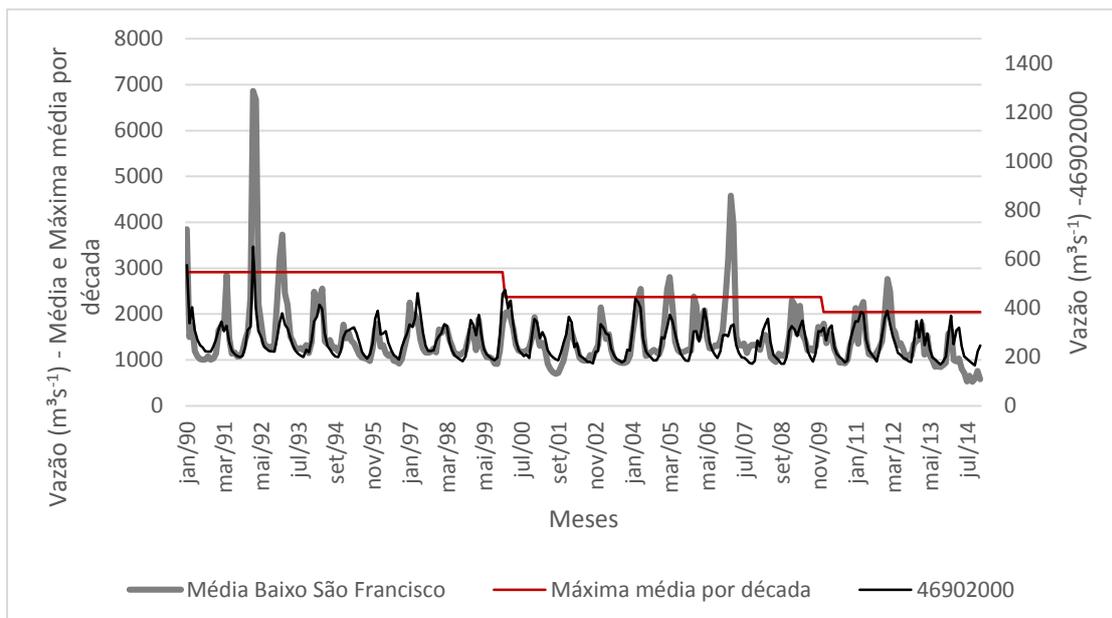


Figura 5.3.3: Comportamento da estação fluviométrica de Boqueirão (Código: 469002000) em relação à média da região do Baixo/Submédio São Francisco e a máxima média por década.

Observando os hidrogramas acima, pode-se perceber uma tendência na diminuição das vazões médias máximas para as regiões do Médio e Baixo São Francisco a partir do início do Século XXI (ano 2000).

5.3.1 *Análise das transições no uso e ocupação na região hidrográfica do rio São Francisco*

Ao analisar a Tabela A.4 que descreve as transições ocorridas na Região Hidrográfica do São Francisco, observa-se em uma primeira análise que as classes 58 (referente à transição de savana arborizada para terras agrícolas) e 59 (referente à transição de pastagens para terras agrícolas) apresentaram queda na transição de 2006 para 2007.

De acordo com a tabela, entre os anos 2005 e 2006 740,5 km² de áreas que eram compostas por savana arborizada se tornaram terras agrícolas, enquanto que de 2006 para 2007 essa conversão diminuiu, passando a ser de 315,25 km². O mesmo aconteceu com pastagens e terras agrícolas que de 2005 para 2006 apresentou conversão de 12151 km² e de 2006 para 2007 apenas 5076,75km².

Áreas destinadas a pastagens e savana se caracterizam pela pouca ou nenhuma cobertura vegetal. Desta forma, os processos de interceptação e absorção da água pelas raízes das plantas ficam prejudicados e passam a ocorrer de forma menos efetiva. Esse estado do solo facilita o escoamento superficial e conseqüentemente o aumento da vazão dos rios.

Para as duas classes descritas acima, pastagens e savanas deixaram de ser convertidas em terras agrícolas no período compreendido entre 2006 e 2007 na Região Hidrográfica do São Francisco. Uma área de ocupação agrícola, pelo simples fato de possuir algum tipo de cultura sendo desenvolvida no solo, já facilita a drenagem da água além de desacelerar sua velocidade permitindo uma melhor infiltração no solo e absorção pelas raízes. Portanto, essa não conversão implica em um aumento do escoamento superficial que conseqüentemente trará um aumento das vazões dos rios, podendo registrar picos de vazão em toda a bacia.

Então, a partir de 2007 esse cenário se mantém estável com baixa conversão de pastagens e savana em terras agrícolas. Até que em 2012 as áreas destinadas às transições 58 e 59 voltam aumentar. Sendo assim, é possível que algumas estações fluviométricas captem esse retorno ainda em 2012, registrando novamente picos de vazão nos hidrogramas.

Assim, é possível que os impactos causados na frequência de mudança do uso do solo tenham interferido no regime de vazões registrado para a Região Hidrográfica do São Francisco. O ideal seria, para esse caso, uma análise aprofundada de todos os parâmetros hidrológicos e posterior realização do balanço hídrico para confirmar essa relação.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As ferramentas aqui descritas apresentam bom desempenho de avaliação das transições de uso do solo em grande (Brasil) e mesoescala (Região Hidrográfica do São Francisco), podendo ser utilizadas por meio da metodologia apresentada e direcionada para outras regiões de interesse.

As regiões do Médio e Baixo São Francisco apresentaram uma tendência de diminuição das vazões médias máximas a partir do início do Século XXI, porém não foi possível afirmar que essas alterações tenham tido como única causa as alterações ocorridas no uso do solo.

Espera-se que esse trabalho possa contribuir para um melhor planejamento e uma melhor adequação da gestão relacionados ao uso e ocupação em todo o território brasileiro e em especial para a região hidrográfica do São Francisco.

Recomenda-se ainda que outros parâmetros do ciclo hidrológico, como precipitação e evapotranspiração, sejam também incluídos em trabalhos futuros, possibilitando assim a análise global do balanço hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, D.; MORAES, L.A.; NASCIMENTO, E.N.; OLIVEIRA, R.A. A produção da cana-de açúcar no Brasil e a saúde do trabalhador rural. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, São Paulo, v. 9, n 2, p. 49-61, 2011.

ALVAREZ, I.A.; OLIVEIRA, A.R.; PEREIRA, M.C.T.; Degradação ambiental da Bacia do São Francisco na Região Semiárida por ações antrópicas. In: WORKSHOP SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS DE MATA CILIAR NO SEMIÁRIDO, 1., 2010, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.

ANA. **Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília: DF, 2015. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx>>. Acesso em: 01 jun 2015.

BARBOSA, E.C.P. **Mudanças climáticas e o padrão do uso do solo no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

BRITO, J.L.; LEITE, M.R.; FERREIRA, E.J.; LEITE M.E. Evolução geográfica do uso/cobertura da terra na Bacia do Rio Vieira no norte de Minas Gerais. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo: USP, v. 26, p. 169-194, 2013.

CPRM. **Projeto RADAM-D – Preservação e disseminação das imagens originais geradas pelos projetos RADAM e RADAMBRASIL**, 2012. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=796&sid=9>>. Acesso em: 21 abr 2015.

CROSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: UNICAMP, 1999. p. 23-27.

ESRI. ArcGIS. Version 10.2.1, 2014. Arquivo.

FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, G.C.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P.K. Global Consequences of Land Use. **Science**, 2005. v. 309.

GOVERNO DO ESTADO DA BAHIA. **Plano de desenvolvimento do APL de fruticultura do Vale do São Francisco – Bahia**. Salvador, 2008. 31 p. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1247146529.pdf>. Acesso em: 01 jun 2015.

HIDROWEB. ANA, 2015. Dados fluviométricos. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>.

IBGE. **FAQ**. Rio de Janeiro, RJ, 2013a. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm#2>>. Acesso em: 07 mai 2015.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2013b. 171 p.

IBGE. **Censo agropecuário 2006 Brasil, Grandes Regiões e Unidade da Federação**. Rio de Janeiro, RJ, 2009. 775 p. ISSN 0103-6157

LIU, W.T.H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. p. 417-422.

LORENSINI, C.L.; GOMES, D.; SILVA, G.B.S.; VICENTE, L.E.; VICTORIA, D.C. Alterações do uso da terra em municípios com expansão de área plantada com cana-de-açúcar. In: Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica, 7., 2013, Campinas. **Anais Eletrônicos...** Campinas: Embrapa, 2013. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/971495>>.

MARTINS, D.M.F.; CHAGAS, R. M.; NETO, J.O.M.; JÚNIOR, A.V.M.; Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB: UAEA/UFCG, 2011. v. 15, n. 9. p. 1054-1061.

NASA. **ABOUT Modis**. Washington D.C., EUA. 2015a. Disponível em:

<<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 24 mar 2015.

NASA. **Aqua**. Washington D.C., EUA. 2015b. Disponível em: <<http://aqua.nasa.gov/>>.

Acesso em: 24 mar 2015.

NASA. **MODIS Reprojection Tool** for Windows NT+32-bit, 2014a. Disponível em:

<https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool>.

NASA. **MODIS Reprojection Tool User's Manual**. Washington D.C., EUA. 4.1.

Release, 2011. 69 p. Disponível em:

<https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/mrt41_usermanual_032811.pdf>.

NASA. **Reverb ECHO**. Washington D.C., EUA, 2014b. Disponível em:

<<http://reverb.echo.nasa.gov/>>.

NASA. **Terra**. Washington D.C., EUA, 2015c. Disponível em:

<<http://terra.nasa.gov/about/mission>>. Acesso em: 24 mar. 2015

NASA. **MCD12Q1**. Washington D.C., EUA. 2015d. Disponível em: <

https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd12q1 >.

Acesso em: 24 mar 2015.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações**. São José dos Campos: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1988. p. 2-5.

QUEIROZ, E.F. Sustentabilidade e impactos ambientais da agropecuária: o caso do ciclo hidrológico. **Revista de Política Agrícola**. Brasília, DF. ano 21, n. 4, p. 147-148, 2012.

RIBEIRO, C.B.M. **Sensoriamento remoto aplicado à detecção de mudanças na cobertura do solo em uma bacia hidrográfica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ: COPPE, 2001.

SCOLARI, D.D.G. Produção agrícola mundial: o potencial do Brasil. In: **Visão progressista do agronegócio brasileiro**. Brasília, DF: Fundação Milton Campos, 2006.

SILVA, A.F. **Geoestatística e sensoriamento remoto na classificação de imagens em áreas cultivadas com citros**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2011.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB: UAEAg/UFCG, 2008. v. 12, n. 3. p. 258-265.

SOUZA, J.L.M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR. v. 30. n. 2, p. 153-163, 2008.

SRIWONGSITANON, N.; TAESOMBAT, W. Effects of land cover on runoff coeficiente. **Journal of Hydrology**, Tailândia, n 410, p. 226-238, 2011.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, v. 8, n 1, 1955.

TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS: ABRH, 2001.

APÊNDICE A

Tabela A.1: Transições tratadas pelo código em Fortran.

Transições	Tipo de alteração
0	Água inalterada
1	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada inalterada
2	Floresta perene composta por vegetação latifoliada inalterada
3	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada inalterada
4	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada inalterada
5	Floresta mista inalterada
6	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem inalterada
7	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem inalterada
8	Savana arborizada inalterada
9	Savana (pastagem) inalterada
10	Vegetação herbácea inalterada
11	Áreas permanentemente alagadas
12	Terras agrícolas inalteradas
13	Área Urbana inalterada
14	Vegetação natural
15	Neve e gelo
16	Vegetação estéril ou escassa (solo exposto) inalterada
17	Não classificado
18	Não classificado
19	Não classificado
20	Água para área urbana
21	Florestas (1, 2, 3 e 4) para área urbana
22	Floresta mista, áreas compostas por arbustos e savana arborizada para área urbana
23	Savana (pastagem) para área urbana
24	Vegetação herbácea para área urbana
25	Áreas permanentemente alagadas, terras agrícolas, vegetação natural, neve e gelo e vegetação estéril para área urbana
26	Não classificado
27	Não classificado
28	Não classificado
29	Não classificado
30	Não classificado
31	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada para savana (pastagem)
32	Floresta perene composta por vegetação latifoliada para savana (pastagem)
33	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada para savana (pastagem)
34	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada para savana (pastagem)
35	Floresta mista para savana (pastagem)

36	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem para savana (pastagem)
37	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem para savana (pastagem)
38	Savana arborizada para savana (pastagem)
39	Vegetação estéril ou escassa (solo exposto) para savana (pastagem)
40	Não classificado
41	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada para vegetação herbácea
42	Floresta perene composta por vegetação latifoliada para vegetação herbácea
43	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada para vegetação herbácea
44	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada para vegetação herbácea
45	Floresta mista para vegetação herbácea
46	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem para vegetação herbácea
47	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem para vegetação herbácea
48	Savana arborizada e vegetação natural para vegetação herbácea
49	Savana (pastagem) para vegetação herbácea
50	Não classificado
51	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada para terras agrícolas
52	Floresta perene composta por vegetação latifoliada para terras agrícolas
53	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada para terras agrícolas
54	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada para terras agrícolas
55	Floresta mista para terras agrícolas
56	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem para terras agrícolas
57	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem para terras agrícolas
58	Savana arborizada e vegetação natural para terras agrícolas
59	Savana (pastagem) para terras agrícolas
60	Não classificado
61	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada para vegetação natural
62	Floresta perene composta por vegetação latifoliada para vegetação natural
63	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada para Vegetação natural
64	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada para Vegetação natural
65	Floresta mista para Vegetação natural
66	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem para Vegetação natural

67	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem para Vegetação natural
68	Savana arborizada para Vegetação natural
69	Savana (pastagem) para Vegetação natural
70	Não classificado
71	Floresta perene composta por vegetação acicufoliada para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
72	Floresta perene composta por vegetação latifoliada para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
73	Floresta decidual composta por vegetação acicufoliada para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
74	Floresta decidual composta por vegetação latifoliada para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
75	Floresta mista para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
76	Área composta por arbustos cujas copas se sobrepõem para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
77	Área composta por arbustos cujas copas não se sobrepõem para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
78	Savana arborizada para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)
79	Savana (pastagem) para vegetação estéril ou escassa (solo exposto)

Tabela A.2: Áreas correspondentes à cada classe de uso do solo no Brasil nos anos de estudo (Km²).

Classes	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
0	68174,75	71546	74343,25	69960	75447,25	73979,25	77105,25	66808,5	78223,5	75904,25	78724,5	77422
1	5913	4362,25	6167,25	4842,75	5611,75	4658	3701,25	4580,5	2583,5	3664,75	8435,75	10392,25
2	3012072	3030512	3020368,5	2966039,5	2932518,5	2905450,3	2898391,5	2908633,8	2882843	2910554,5	2926141	2943697,8
3	378,25	427,25	409,5	266,75	702	1631	1142,75	1172,75	219,25	253,5	166,5	373,25
4	52196	36527,5	32525	31994,75	34771	33941,25	26776,5	33183,75	38543,25	39280,5	30591,5	30349,75
5	52160,75	28954,75	25612,25	26305,25	35701,25	36904,5	37614	33480	42544,5	28841,5	24759,25	24755,5
6	52417,25	33826,75	26796,75	28289	26347,5	25260,5	19399,75	21089,5	23466	22918,75	24819,25	10446,25
7	35509,5	25973,5	23745,25	23511,25	19603,25	26547,75	32757	34932,5	29167,5	26441,75	23406	28683,5
8	408668,25	425797,5	339395,25	418077,5	359062,75	432075,5	336577	344216,5	322581,25	369796,5	410000,75	387928,5
9	2320459,5	2432732,8	2525058,3	2458939,3	2632202,3	2537662,3	2738304,8	2701346,5	2750306,3	2653618,8	2570353,5	2561020,3
10	434521	385226	356831,5	366319,5	312073,25	371009,5	287497	299192	258446,5	296945	304466,5	296702,25
12	367822,25	343876,5	393194,75	425972,25	390007,5	374459,25	363163,25	372039	392576	395301,75	419901,75	453385,5
13	33433,25	33432,5	33417,25	33424,75	33420	33422,5	33416	33423,75	33408,25	33421	33413,75	33418,75
16	4919	9555,75	4980,25	8959	5443,5	5914,5	7075,5	8824,5	8023,5	5998,75	7767	4370,25

Tabela A.3: Áreas correspondentes à cada classe de uso do solo na Região Hidrográfica do São Francisco nos anos de estudo (Km²).

Classes	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
0	2001	2009	2116,25	2532,75	2943	2976,5	3068,75	2714,75	2998,75	2924,25	3078,5	2773
1	14,75	3	3	13,75	17,25	20	18,25	127,25	25	19	57,75	57,5
2	477	573	501,75	578,5	702	1200	1382,5	1203,75	1450	1771,75	2289,25	2063,5
3	1	2,25	1,25	3	5,75	24	19,25	21	1,25	1,75	0,25	2
4	6140,25	6328,25	5551,75	7421,25	6023,25	5313	4038,5	2665,5	2531	2490,25	2517,75	2482,5
5	2621	1502,75	815,5	1224	1786,75	2481,75	2339	2307,75	1841	1566	836,75	677,25
6	15846,75	10371,25	7541,25	5206,25	5547,5	4025,75	3435,5	3724,75	5467,5	3872,75	3891,25	1379,75
7	14313	15402,25	14375	14263,75	11189,75	14065	18866,75	21102,75	18429,25	17621,5	14677,5	19038
8	61221	53160	47956,25	59565,5	66425	67576,75	55029,25	47299,5	46034,25	52304	67270,75	54784,75
9	324652,5	355769	369520	362318,5	376223	359841,3	383865,3	386089,8	390044	382620,5	360317	370115,5
10	51110	30437,5	21991,25	13910,75	10628	19307,75	12402,5	13636,5	9255,75	12913,75	16314,25	15795,75
12	22487,75	25214,25	30475,5	33703,75	19345,25	23899	16362,75	19797,75	22748	22750,75	29546,5	31669,5
13	2128,5	2128,5	2128,25	2128,5	2128,25	2128,25	2128,25	2128,5	2128,25	2128	2128	2128
16	294,75	418	342	448,75	354,25	460	362,5	499,5	365	334,75	393,5	352

Tabela A.4: Áreas correspondentes à cada transição ocorrida anualmente na Região Hidrográfica do São Francisco (Km²).

Transições	2001 e 2002	2002 e 2003	2003 e 2004	2004 e 2005	2005 e 2006	2006 e 2007	2007 e 2008	2008 e 2009	2009 e 2010	2010 e 2011	2011 e 2012
0	57549,25	46114	73095,5	74684,75	54404	56149,75	43640,75	47346,75	49678,5	55619,5	47673,5
1	0	0,25	0	0,5	1,25	2,25	1	4,75	2,25	3,5	5,5
2	394,5	427,5	349,5	407	580,5	908,75	946,5	780,5	993,75	1533,75	1660,25
3	1	1	0,5	2,25	4	15,75	14,75	1	1	0	0
4	3431,75	3143,25	2303,25	2254,5	2464,25	1962,75	1079,25	788,75	761	733,75	535,25
5	805,5	494	262,75	319,75	736,25	904,75	768	609	654	270,5	184,5
6	7376,25	4771,75	1782,25	1543,25	1482,25	1036,75	861,5	1082,5	1351	1248,5	491,5
7	8437	10008,75	8982,5	7801,75	7626,75	9964,75	13636,5	14089,75	12212	10592,25	11174,25
8	39618,75	34057	28928,25	35811,75	43094,5	41108,5	32520	29915,25	31529,75	39545	39451,25
9	300129,75	327206	318375,75	321514,75	324391,25	330652,25	347935,25	352819,5	349030	331783	325343,5
10	25317,25	15137	6442,25	4417	5544,75	6780,5	4904,75	4007,5	3937	5016	6229
12	12851,25	15912,5	16133,75	10868,25	9275,5	9204	8746	10859	11514,25	13402	17638
13	2128,5	2128,25	2128,25	2128,25	2128	2128	2128,25	2128,25	2127,75	2127,5	2127,5
16	220,75	248,25	197,5	217,75	232,25	280,25	274,5	248,75	205,25	196,25	206
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0
22	0	0	0	0	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0,25
23	0	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0
31	0,75	0,5	0,25	0	0	0,75	1,5	6,5	0,5	0,5	12
32	14,5	75,25	49,25	48	15,5	61,25	108,75	147	145	88,75	219,25
33	0	0,5	0	0,25	0,25	2,25	0,75	5,5	0	0,25	0

34	1598,75	2022,25	1466,75	1924,75	1004,25	1646,75	1561	789,25	833,5	657,5	783,75
35	1214	616,75	332,75	427,5	543,25	1030,75	1002,5	983	552,5	523,5	379,5
36	6789,75	3741,25	3976	2053	2284,25	2059	1658	1632,5	2836,75	1424,75	2093,5
37	4076,25	3790,5	3755,25	4391	2459,5	3030,75	3641	4406,75	3953	3679,75	1928,75
38	17761,5	15412,25	14368,25	19598,5	18884,75	23245	19573,75	15315,75	12654,25	10284,5	24821,25
39	5	14,25	5,75	6,5	1,25	2	3,5	11	7,75	4,25	41,25
41	1	0	0	1,25	0,5	1,5	1	2	3,25	0,75	8,5
42	0,25	2	0,75	2,75	1	5,25	8,75	4	17,75	3	11,25
43	0	0,25	0	0,25	0	1,75	0,75	0,75	0	0,25	0
44	57	99,5	63,25	52	42,25	43,75	32,5	14,25	54,25	53,75	90,25
45	14,5	40,5	8,25	25,5	17,5	27	36,75	21,25	32,5	16,25	39,75
46	198,75	290	244,75	127,75	306,5	124,25	160,5	178,75	217	255	337,25
47	440,25	443,25	453	625	585,75	425,25	613	791,25	858,5	2087,25	795,25
48	884,75	1012,5	954,5	1272,5	1549	766,5	436,5	283,75	434,75	590	1201,5
49	2755	3933	4403,5	3202,25	9635,75	3649,25	6750,25	3287,25	6122	6888,5	5612,75
51	0	0,5	0,75	0,5	0,75	1,25	6	3,5	4,75	0,75	6,25
52	1,25	4,75	5	5,5	3	7	13	6	34,25	4,25	17,75
53	0	0	0,25	0	0,75	0,25	0	2,5	0	0	0
54	23,5	51,25	43,25	18,25	21,25	36,5	22,25	19,5	27,5	38,75	55,5
55	152	80,5	14,25	48,75	47,75	56,5	58,75	47,5	41,5	20	28,75
56	463,25	685,25	422	189,25	705,25	230	207	397,75	405	290,25	436,75
57	760,25	686,5	638,75	691,75	320	368,5	668	1147,5	800,25	773,75	607
58	1206,25	1208	1160,75	383,25	740,5	315,25	246,75	378,75	222,25	288,5	509,25

59	6553,25	9429,5	11905	6220,5	12151	5076,75	9004,5	8711,5	9021,25	13186,25	10533
71	8,5	0	0	1,25	2	0,25	1,5	4	2	3,25	3
72	0	0,5	1,25	1	5,25	1,75	14	6	7,75	15,5	5,5
73	0	0	0	0	0,25	0	0,75	0	0	0	0
74	16	2,5	2,5	0,75	0	0,5	0,25	0,75	3	2,25	1
75	4,75	1	0,5	2	2,75	1,25	7,5	3,75	10,25	9,75	3
76	5,25	2,5	6,75	2,5	7	0,75	5	4,75	3,75	21,25	6,5
77	50,25	28,5	55	24,75	14,25	6,5	13,75	29,25	18	31	16,5
78	8	2	3,75	2,25	3	2,25	10,75	3,25	3,5	7	1,5
79	6,75	5	8	9,75	10,5	4,75	4,5	4,25	6,25	9,25	4,75

