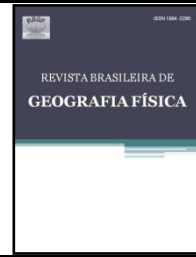




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



As geotecnologias e a detecção de trajetórias evolutivas da paisagem: possibilidades metodológicas e aplicações

Rômulo Weckmüller¹; Raúl Sánchez Vicens^{1,2}

¹ Laboratório de Geografia Física, Universidade Federal Fluminense - Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n° - Niterói/RJ - Brasil, CEP: 24210-346 / weckmuller@gmail.com (autor correspondente). ² Departamento de Geografia, Universidade Federal Fluminense - Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n° - Niterói/RJ - Brasil, CEP: 24210-346 / rsvicens@id.uff.br

Artigo recebido em 21/04/2018 e aceito em 14/12/2018

RESUMO

O entendimento de como os sistemas terrestres evoluem é importante na busca de estratégia que otimizem a utilização dos recursos naturais e minimizem os impactos ambientais. O monitoramento das mudanças da cobertura vegetal e do uso da terra, através de técnicas de sensoriamento remoto tem sido fundamental neste sentido. A necessidade de se conhecer o histórico de coberturas da terra ou trajetórias evolutivas de uma paisagem é fundamental para os órgãos tomadores de decisão. Este tipo de análise propicia o conhecimento do estado da paisagem, ou seja, se a mesma encontra-se degradada, estável ou intacta, agregando informações para otimizar o ordenamento territorial e/ou ambiental. Para tal, o sensoriamento remoto se apresenta como uma metodologia eficiente, devido à facilidade de obtenção de dados históricos sobre grandes porções do território, através de imagens de satélite. Sendo assim, este artigo objetiva discutir a evolução epistemológica das geotecnologias, particularmente dos estudos de mudanças utilizando séries temporais, que acredita-se ser o futuro desta temática, destacando sua evolução teórica e metodológica, assim como as perspectivas de pesquisa, utilizando extensa revisão na literatura científica especializada.

Palavras-chave: Detecção de Mudanças, Séries Temporais, Sensoriamento Remoto.

Geotechnologies and trajectory-based change detection: methodological possibilities and applications

ABSTRACT

Understanding how terrestrial systems evolve is important in the search for strategies that optimize the use of natural resources and minimize environmental impacts. Monitoring of vegetation changes through remote sensing techniques has been fundamental in this regard. The necessity of know the history of land cover or evolutive trajectories of a landscape is fundamental to the decision-making bodies. This type of analysis provides knowledge of the state of the landscape, ie, if it is degraded, stable or intact, adding information to optimize land use planning. To do this, the remote sensing becomes an efficient methodology, due to the ease of obtaining historical data on large swathes of territory, through satellite images. Thus this article aims to discuss the epistemological evolution of geotechnologies, particularly the studies of time series analysis, believed to be the future of this subject, highlighting your theoretical and methodological evolution, as well as the research perspectives, using extensive review in the specialized scientific literature.

Keywords: Change Detection, Time-series, Remote Sensing.

Introdução

O uso da terra e de recursos naturais são elementos essenciais da existência humana. Com o início da agricultura, os humanos começaram a usar a terra para cultivar plantas e criar animais. Para negociar o excedente, rotas comerciais precisaram ser abertas. Depois, com a Revolução Industrial, as atividades humanas foram ampliadas para a exploração de energia fóssil, combustível essencial para o desenvolvimento da indústria

nesse período histórico. Industrialização esta que possibilitou o aumento das aglomerações urbanas e, conseqüentemente, da população mundial (Steffen et al., 2007; Vitousek, 1997).

O crescimento populacional contínuo ao longo do século XX elevou a demanda por alimentos e energia, fazendo com que a agricultura e a indústria se reinventassem. A Revolução Verde surgiu para suprir esta demanda, com aplicação de pesticidas industriais, fertilizantes, introdução de máquinas no campo, novas variedades de cultivos,

entre outros; ou seja, aumentando o poder humano de transformação (e degradação) das paisagens (Tilman et al., 2011).

A conversão de ecossistemas naturais para outros usos, causada pelos seres humanos, já atua em escala global. Cerca de metade da superfície terrestre atualmente é utilizada como terras agrícolas ou pastagens (Kareiva et al., 2007). Nagendra et al. (2013) defendem que para mitigar os efeitos negativos das mudanças antrópicas da paisagem deve-se conhecer onde e por que estas ocorrem, o que a literatura chama de *drivers* de mudança da paisagem, numa tradução literal pode-se entender como a causa destas (DeFries et al., 2004; Griffiths et al., 2012).

De uma maneira geral estes *drivers* de mudança acontecem em variadas escalas temporais e espaciais, às vezes interligadas, podendo ser oriundas de causas próximas (extração de madeira, expansão de cultivos agrícolas, entre outros) ou causas subjacentes (como dinâmicas migratórias ou políticas de subsídios, por exemplo), ou seja, questões econômicas e sociais, que contribuem para o entendimento das mudanças em si (DeFries, 2013; Lambin e Geist, 2006). Pode-se encontrar estes tipos de causas no que Andrade et al. (2015) e Costa et al. (2013) chamam de geoinformações, ou seja, qualquer informação espacializada que contenha dados que ajudem a entender a mudança (podem ser censos ou cadastros rurais, por exemplo). Estes autores defendem a associação de geotecnologias com as geoinformações, para uma “modelagem baseada em agentes”, onde os agentes tem a capacidade de interagir e modificar o meio ambiente.

As Geotecnologias, aliás, apresentam-se como uma importante ferramenta na obtenção e manipulação de dados temporais, permitindo também integrar dados de naturezas distintas (matriciais, vetoriais e tabulares), como imagens de satélite e dados censitários, por exemplo. Como as mudanças induzidas pelo homem ocorrem em um ritmo cada vez mais rápido, espera-se que os sistemas de monitoramento baseados em sensoriamento remoto, que imageam o Planeta Terra em tempo integral, tenham papéis cruciais na política ambiental e tomada de decisão (Chen et al., 2012).

Maus et al. (2016) acrescentam que a observação da Terra por satélites é a única maneira de providenciar uma contínua e consistente base de dados sobre a cobertura e uso da terra. Esta abundância de dados temporais possibilitam a obtenção das trajetórias evolutivas da cobertura da terra, que representam uma assinatura espectral-temporal da paisagem.

Neste contexto, este artigo tem como objetivo apontar a relação entre as geotecnologias e a detecção de trajetórias evolutivas da paisagem, ressaltando o que a literatura apresenta de mais sofisticado metodologicamente e conceitualmente nesta temática. Para tal, pretende-se abarcar alguns fundamentos teóricos desta ciência em formação, destacando as evoluções metodológicas e conceituais, além de algumas perspectivas interessantes de estudos.

Desenvolvimento

As Geotecnologias e o seu anseio epistemológico

Antes de abordar as geotecnologias propriamente ditas, é interessante trazer um debate sobre as informações que por ela são trabalhadas, sua base epistemológica e suas perspectivas como campo de ciência.

Castiglione (2009) defende que o melhor termo seria geoinformações. Para o autor, falar de geoinformação significa necessariamente falar não apenas dos hoje chamados Sistemas de Informação Geográfica (SIG), ou ainda dos censos e cadastros rurais utilizados na chamada “modelagem baseada em agentes” de Costa et al. (2013); mas também de todas as formatações que, ao longo da história, cumpriram a função de instrumentalizar tanto a metafórica transferência do conhecimento quanto a análise da dimensão espacial dos fenômenos. Sendo assim, são essas várias formatações que permitem a contextualização conseqüente de uma geoinformação. Portanto, por estes *sistemas de geoinformação* entende-se não apenas os sistemas computacionais que hoje dão conta desta representação, mas também outros sistemas não computacionais, ou configurados em bases não computacionais, que permitam a compreensão e a contextualização de uma dada informação no espaço geográfico no qual ela se encontra inserida.

Castiglione (2009) discute ainda a aparição e transformação ao longo do tempo das geoinformações, deste o tempo pré-histórico até o século XXI. Para o autor, os pictogramas que representavam esta natureza de informações sobre um dado espaço geográfico podem ser considerados, à partida desta análise, como as formas mais primitivas que sobreviveram daquilo que se poderia considerar como sendo um conjunto de geoinformações, em face de sua função de transmissão ou comunicação de conhecimento acerca da dimensão espacial de algum fenômeno e de sua formatação gráfica capaz de representar um dado aspecto do espaço geográfico, percebido pela ação inteligente dos humanos daquela época.

Almeida (2007) contribui para esta discussão quando cita uma espécie de almanaque

dos agricultores, feita pelos Sumérios em 2500 a.C., sobre os preceitos e regras que um agricultor deve ter nas suas relações com a natureza, ou seja, as geoinformações. Já no século XXI, Castiglione (2009) destaca a desmaterialização destas, através de representações cartográficas digitais no mundo computacional.

Atualmente, a popularização cada vez maior de *softwares* de imagens de satélite, como o *Google Earth*, por exemplo, e as informações espacializadas no cotidiano das pessoas através de seus *smartphones*, fez com que a demanda por geoinformações aumentasse, ajudando na consolidação das geotecnologias no cenário científico nacional e internacional.

Castiglione (2003) ressalta o caráter interdisciplinar das geotecnologias (Castiglione refere-se somente ao geoprocessamento em seu trabalho, porém entende-se que pode ser estendido para todas as geotecnologias). O autor ressalta que a interdisciplinaridade pode ser desagregadora, se não for entendida como um convite ao efetivo diálogo entre as disciplinas que lhe são fundamentais, a despeito de serem, por vezes, bastante diferentes. Isto é um dos fatores que nos ajudam a entender o insistente debate realizado por alguns geógrafos entre as dicotomias entre geografia física e humana.

Quanto à questão de revolução paradigmática causada pelas Geotecnologias, Dobson (1993) afirma que esta questão tem sido considerada principalmente como uma revolução tecnológica. Ainda assim o autor destaca que algumas características podem conferir como uma revolução intelectual, levando-se em conta a correspondência entre a possibilidade de difusão de aplicação tecnológica e a inteligência espacial. Porém Buzai (2001) acredita que ainda há uma dificuldade no desenvolvimento da epistemologia das geotecnologias, pois apesar da mesma ter como disciplina base a Geografia, se desenvolve dentro uma ampla faixa de processos interdisciplinares, o que acaba gerando incertezas e ajustes conceituais que começaram a ser tratado dentro do campo chamado de Ciências da Informação Geográfica.

Câmara et al. (2004) acrescenta que a tecnologia de sistemas de informação geográfica evoluiu de maneira muito rápida a partir da década de 1970. Como este desenvolvimento foi motivado desde o início por forte interesse comercial, não foi acompanhado por um correspondente avanço nas bases conceituais da geoinformação. Os autores também acreditam que as raízes deste problema estão na própria natureza interdisciplinar desta. Ponto de convergência de áreas como Informática,

Geografia, Planejamento Urbano, Engenharia, Estatística e Ciências do Ambiente, a Ciência da Geoinformação ainda não se consolidou como disciplina científica independente; para que isto aconteça, será preciso estabelecer um conjunto de conceitos teóricos, de aplicação genérica e independentes de aspectos de implementação.

Como uma tentativa única no cenário científico brasileiro, Câmara et al. (2004) propõe em seu trabalho estabelecer argumentos que configurem uma epistemologia para as geotecnologias (Ciências da Geoinformação, nas palavras do autor, um novo ramo da ciência). Primeiramente o seu trabalho propõe tomar o conceito de *espaço geográfico* como uma noção-chave, a partir do qual será possível construir os fundamentos teóricos desta nova disciplina científica. Ao fazer uma revisão das diferentes concepções de *espaço geográfico*, eles não pretendem estabelecer juízo de valor, mas estabelecer como a tecnologia de GIS permite a expressão computacional destes conceitos e o que estas diferentes escolas nos podem ensinar sobre as limitações atuais das Geotecnologias.

A seguir uma breve explanação destas diversas correntes e uma sistematização de sua correlação com as Geotecnologias (Tabela 1). Câmara et al. (2004) começa sua viagem epistemológica pela Geografia Idiográfica de Hartshorne, em 1936. O conceito de “unidade-área” é apresentado em Hartshorne como elemento básico de uma sistemática de estudos geográficos, denominada pelo de “estudos de variação de áreas”. Na visão de Hartshorne, uma *unit-area* é uma partição do espaço geográfico, definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, que apresenta características individuais próprias; que seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço.

A partir da decomposição do espaço em “unidades de área”, o pesquisador poderá relacionar, para cada uma destas partições, as correspondentes características físicas e bióticas que a individualizam em relação a todas as demais componentes do espaço. A proposta de Hartshorne tem contribuições relacionadas com o conceito de espaço e lugar, próprios da Geografia, fundamentais para a distinção e o estabelecimento das relações entre as formas de utilização de determinadas áreas e o seu entorno, além de oferecer uma base metodológica para o uso do conceito de “unidade de área” em Geotecnologias.

A representação computacional que correspondente aos conceitos de “unidade de área” em Hartshorne é o polígono fechado, que delimita cada região de estudo e um conjunto de atributos, tipicamente armazenados num banco de dados

relacional (Câmara et al., 2004; IBGE, 2013). Costa (2003) contribui para esta discussão lembrando o possibilismo de La Blache, que define as paisagens como o resultado das superposições, ao longo da história, dos dados naturais e das influências humanas, ou seja, acrescentando a importância do fator tempo às análises espaciais e, conseqüentemente, às representações computacionais dentro das geotecnologias.

Segundo para a Geografia Quantitativa, Câmara et al. (2004) observa que a base desta é a busca da aplicação do método hipotético-dedutivo que caracteriza as ciências naturais nos estudos geográficos. A lógica subjacente ao método hipotético-dedutivo é a de que existe uma realidade externa à nossa existência, e esta realidade pode ser capturada (ainda que de forma aproximada) utilizando os princípios da lógica e da matemática.

Esta busca por uma linguagem matemática objetivava dar à Geografia um caráter mais exato, mais científico (Santos, 1986). Através de estudo e análise, os fenômenos podem ser explicados através de teorias científicas, que devem ser passíveis de experimentação e portanto, de refutação (Popper, 1975). Ideias estas pioneiramente levantadas por David Harvey, em 1969, com seu livro *“Explanation in Geography”*, onde propõe os modelos descritivo e explicativo, considerando a tarefa de verificação como uma avaliação da relação entre o observado no mundo empírico e o mundo abstrato teórico; transformando meras especulações em teorias científicas.

Costa e Rocha (2010) consideram que o uso de modelos matemáticos e estatísticos em conjunto com computadores melhorou os métodos e enriqueceu a Geografia, possibilitando a construção de mapas e entendimento da dinâmica de utilização da terra, porém a intensidade do uso dessas técnicas e modelos não respondeu a todas as inquietações e questões das ciências sociais.

Apesar da forte relação entre os conceitos da Geografia Quantitativa e as Geotecnologias, apenas a partir de meados da década de 1990, os SIG passam a dispor de representações computacionais adequadas à plena expressão dos conceitos desta escola, adepta de técnicas que exigem muito processamento de dados, como as análises espaciais e a geostatística. Adicionalmente, a tecnologia da primeira década dos anos 2000 das Geotecnologias ainda enfatizava a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. No entanto, um significativo conjunto de fenômenos espaciais são dinâmicos e as representações estáticas utilizadas em SIG não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios da Ciência da

Informação Espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos dinâmicos (Câmara et al., 2004). Em trabalho bem mais recente, Gilberto Câmara nos mostra essa quebra de paradigma, que representa os fenômenos dinâmicos e se apresenta como o futuro das geotecnologias, melhor discutida no tópico 2.3 deste artigo.

Na perspectiva da Geografia Crítica, Câmara et al. (2004) acredita que Milton Santos é um dos geógrafos mais empenhados em apresentar novos conceitos de espaço geográfico. Em seus trabalhos, Santos dá especial ênfase ao papel da tecnologia como vetor de mudanças da sociedade e condicionante da ocupação do espaço, no que denomina o “meio técnico-científico-informacional”. Apesar de enfatizar a contribuição da tecnologia para a Geografia, Santos não examina em detalhe o problema do uso constante de ferramentas tecnológicas como SIG em estudos geográficos. Mesmo assim, seus conceitos são extremamente relevantes para o amadurecimento de uma epistemologia para as Geotecnologias e também, como um novo campo do conhecimento científico.

Os conceitos de Santos do espaço geográfico sobre “fixos e fluxos” e “sistemas de ações e objetos”, além de configurarem uma organização em rede, apresentam as características dinâmicas do espaço. Ainda com respeito ao problema de modelagem computacional dos *sistemas de ações e objetos*, Câmara et al. (2000) apresentam uma proposta para modelar o processo de produção de informação em bases de dados georreferenciados, levando em conta o objetivo final a ser alcançado com os procedimentos de Análise Geográfica. Esta proposta visou capturar uma das dimensões do conceito de “sistemas de ações”: a intenção do especialista ao modelar o espaço geográfico.

Segundo Câmara et al. (2004), o conceito de Milton Santos de “espaço como sistemas de objetos e sistemas de ações” caracteriza um mundo em permanente transformação, com interações complexas entre seus componentes. Santos apresenta uma visão geral, que admite diferentes leituras e distintos processos de redução, necessários à captura desta definição abstrata num ambiente computacional. A riqueza deste conceito está em deslocar a ênfase da análise do espaço, da *representação cartográfica* para a dimensão da *representação do conhecimento geográfico*, pois como diz o próprio Milton Santos, “geometrias não são geografias”. A Geografia Crítica tem uma importante contribuição para as Geotecnologias, sendo um de seus principais méritos o de apontar

para uma visão muito rica do espaço geográfico, enfatizando a noção do processo e do dinamismo (Tabela 1).

Tabela 1: Teoria Geográfica e Geotecnologias (Adaptado de Câmara et al., 2004).

<i>Teoria</i>	<i>Tecnologia GIS associada</i>	<i>Conceito-Chave</i>	<i>Representação Computacional</i>	<i>Técnicas Análise</i>
Geografia Idiográfica	Anos 80 – meados anos 90	Unidade da região (unit-area)	Polígono e atributos	Interseção conjuntos
Geografia Quantitativa 1	Final da década de 90	Distribuição Espacial	Superfícies (grades)	Geoestatística + lógica <i>fuzzy</i>
Geografia Quantitativa 2	Meados da década de 00	Modelos espaço-tempo	Funções	Modelos multi-escalares
Geografia Crítica	Segunda década do século XXI	Objetos e ações; Fixos e Fluxos	Ontologias e espaços não-cartográficos	Representação do conhecimento
		<i>Time-First</i>	Curvas espectrais-temporais	Séries temporais e <i>Big Data</i>

Buzai (2001) denomina este ambiente das geotecnologias atuais como ciberespaço e vê este como uma matriz de banco de dados ligada a uma rede global. Esta matriz corresponde a um novo espaço que se sobrepõe e complementa as paisagens geográficas reais, no que o autor chama de espaço relacional. Este espaço relacional encontrado hoje nas telas de computadores, como uma representação do conhecimento e realidade geográficas, começa a abrir novas vias de exploração e são muitos os geógrafos interessados em se lançar em novas pesquisas.

Jensen (2009) usa a teoria das ciências para classificar o estágio de desenvolvimento do sensoriamento remoto, mas entende-se que se pode estender também para as geotecnologias como um todo. A teoria das ciências aponta que as disciplinas científicas passam por quatro estágios de desenvolvimento, onde Wolter (1975) sugere que este crescimento está baseado numa curva sigmoide. Os estágios são: (1) crescimento inicial com pouco incremento da literatura; (2) crescimento exponencial com publicações dobrando em intervalos regulares; (3) início do declínio do número de publicações; (4) taxa de crescimento aproxima-se de zero. Através de extenso levantamento do número de publicações e criação de instituições especializadas, Jensen (2009) concluiu que as geotecnologias atualmente estão no estágio 2, onde o crescimento acentuado das publicações se mantém desde os anos 1990. Os autores também pontuam que há proximidade do estágio 3, visto o aumento das especializações e controvérsias teóricas, mas este estágio ainda não foi atingido pois não há tendência de declínio nas publicações.

Em 1990, seguindo o avanço da tecnologia e do número de artigos na área, as geotecnologias se depararam com um novo conceito, que resultou numa quebra de paradigma para esta área: o conceito de *GIScience*, desenvolvido por Michael Goodchild, geógrafo britânico-americano, professor emérito da Universidade da Califórnia (Goodchild, 1992). Desde então as ferramentas GIS (*Geographic Information System*) passaram a serem vistas também como ciência (*Geographic Information Science*). De acordo com Mark (2003), *GIScience* seria o desenvolvimento e uso de teorias, métodos, tecnologias e dados para entender processos, relações e padrões espaciais.

Goodchild (2010) acredita em cinco caminhos de desenvolvimento para as próximas décadas na *GIScience*: (1) informações georreferenciadas em tempo real a todo momento; (2) possibilidades de qualquer pessoa produzir um mapa; (3) mais dinamicidade dos dados proporcionada pela tecnologia; (4) dados produzidos em várias dimensões, para muito além do 2D; (5) o desafio de se formar profissionais e pesquisadores especializados nas ciências geoespaciais, integrados com o avanço tecnológico.

Contudo, conclui-se que cada vez mais as Geotecnologias vêm se consolidando como ciência. Mesmo caminhando na interdisciplinaridade, inerente desta, elas tem como sua base epistemológica os conceitos e correntes da geografia, que mesmo com suas discussões e contradições internas foi capaz de oferecer uma sustentação teórica avançada e já amadurecida. Espera-se que cada vez mais outros ramos da ciência participem deste processo de construção epistemológica das Geotecnologias,

desmistificando o papel infeliz ora atribuído a esta como tecnicista, ou uma simples ferramenta metodológica, mas sim como uma Ciência, sólida, madura e com letra maiúscula.

Deteção de Mudanças por Sensoriamento Remoto

O processamento de imagens multitemporais e deteção de mudanças tem sido um campo de pesquisa ativa em sensoriamento remoto por décadas, tornando-o a maior fonte de dados espacializados atualmente para o monitoramento da cobertura da terra (Lu et al., 2014; Jianya et al., 2008). Em 2001, um congresso bienal (*Multitemp – Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*) foi organizado para tratar especificamente deste tema, com a 1ª edição realizada na Universidade de Trento, na Itália; e a última na cidade de Brugge, na Bélgica, em 2017.

Detectar mudanças significa identificar alterações na superfície terrestre por meio da análise de imagens da mesma área coletadas em diferentes datas (Singh, 1989). De acordo com Turner e Meyer (1994) dois tipos de mudança são geralmente distinguidas na cobertura da terra: conversão e modificação. A conversão representa uma mudança de um tipo de cobertura para outra, como por exemplo, o desmatamento de florestas para áreas de agricultura. A modificação corresponde a uma mudança de condição dentro de uma categoria de cobertura da terra, como por exemplo a intensificação de construções em uma área urbana. De um lado, a conversão pode ser considerada como uma mudança abrupta, pois uma cobertura é substituída por outra, enquanto que, por outro lado, a modificação é mais sutil, uma vez que o caráter da cobertura pode ser mudado, sem alterar a sua classificação. Para Coppin et al. (2004), detectar estas modificações na paisagem é um dos principais desafios nos estudos de monitoramento de mudanças.

A análise multitemporal de imagens de satélite permite a avaliação de dinâmicas espaciais como os processos de urbanização, catástrofes naturais, desmatamentos e outras alterações na paisagem, sejam de origem natural ou antrópica (Singh, 1989). Desta maneira, permite entendermos melhor a relação e interação entre sociedade e natureza, contribuindo para a gestão e utilização dos recursos, de uma maneira mais eficiente e sustentável (Lu et al., 2004).

Tendo em vista a impossibilidade de listar todas as aplicações das técnicas de deteção de mudanças na cobertura da terra e reconhecendo que há muito potencial a ser explorado, Lu et al. (2004) destacam que o pesquisador precisa ter a aplicação bem clara em sua pesquisa, para assim ter a

sensibilidade de escolher a técnica que seja mais adequada aos seus objetivos.

Existem muitas técnicas para a análise multitemporal e cada uma possui uma forma própria de lidar com a extração e com a classificação das mudanças. Não existe um método universalmente aceito. Os parâmetros de escolha dessas técnicas dependem do objetivo da pesquisa e/ou da preferência por parte do pesquisador por determinada ferramenta (Coppin et al., 2004; Jensen, 2009). Para se obter uma boa deteção de mudanças, a mesma deve fornecer as seguintes informações: (1) variação de área de mudança, (2) distribuição espacial dos tipos alterados; (3) trajetórias de tipos de cobertura da terra, e (4) avaliação da precisão da deteção de mudança (Lu et al., 2004).

O desenvolvimento de metodologias efetivas para a análise de dados multitemporais é um dos mais importantes e desafiadores temas com o qual a comunidade de sensoriamento remoto se deparará nos próximos anos. A complexidade de se trabalhar com dados temporais e o dinamismo dos mesmos exige esforço científico contínuo para melhor aproveitamento da grande quantidade de informação disponível. O acesso a este grande conjunto de dados atuais de observação da terra, chamado de *big data* pela comunidade científica internacional, oferecerá aos pesquisadores melhores oportunidade de descrever e entender as mudanças. (Bruzzone et al., 2003; Câmara et al., 2016). Devido à importância do monitoramento das alterações da superfície da terra, a pesquisa em técnicas de deteção de mudança é um tema ativo, e novos trabalhos estão constantemente sendo desenvolvidos. Nos últimos anos um grande progresso tecnológico tem sido observado, com o desenvolvimento de novas plataformas e sensores (Lu et al., 2004; Lu et al., 2014).

Dentre as várias técnicas de deteção de mudanças, há um esforço da literatura em separá-las em grandes grupos. Coppin et al. (2004) classifica-as pelo número de imagens utilizadas. Caso sejam apenas duas, a metodologia é bitemporal, se forem utilizadas três ou mais delas então a metodologia é de análise da trajetória temporal. Porém Peiman (2011); Zhou et al. (2008) e Kiel (2008) salientam que a classificação mais usual das técnicas de deteção de mudanças seria em dois grandes grupos: pré-classificação e pós-classificação. Desta maneira, a sistematização estará baseada na metodologia de deteção de mudanças empregada, antes ou depois da classificação.

A análise pós-classificação consiste na geração de uma classificação para cada data em separado, para uma posterior deteção de

mudanças na comparação destes mapas temáticos, que pode ser em uma integração entre o sensoriamento remoto e um Sistema de Informações Geográficas (Lu et al., 2004). É uma técnica abundante na literatura por ter sido o precursor das análises temporais.

Kiel (2008) salienta que a maior desvantagem talvez resida na sua exigência em tempo e custo, visto os mapeamentos e validações a serem realizados antes de detectar as mudanças. Além disso, Jensen (2005) acrescenta que os erros de classificação de cada data estabelecem uma maior probabilidade de erro no mapa de mudanças, pois a acurácia da detecção de mudanças é dependente de classificações individuais. Deer (1995) também acredita que os resultados desta técnica ficam muito restritos às classes iniciais, que são normalmente discretas. Já Coppin et al. (2004) acredita que um bom esquema de classificação pode ajudar no foco da detecção de mudanças ao isolar as transformações que não importam aos objetivos.

A análise pré-classificação, também chamada de análise direta, consiste na classificação de todas as imagens de diferentes datas juntas. A premissa básica é a de que todas as alterações na cobertura terrestre deverão resultar em mudanças nos valores de radiância (Singh, 1989). A combinação de um conjunto de imagens para uma análise direta é chamada de imagem multitemporal. Uma vez construída, esta imagem multitemporal é classificada uma única vez para a detecção das mudanças, sob o princípio de que nas áreas onde ocorreram as transformações se concentrem discrepâncias estatísticas quando comparadas com o restante da imagem, que se manteve inalterado (Mas, 1999; Coppin et al., 2004). O conhecimento e experiência do pesquisador são fundamentais para trabalhar com esta imagem multitemporal, visto o aumento na dimensionalidade de dados a serem trabalhados.

De acordo com Bruzzone et al. (2003), numa análise direta recomenda-se o uso de imagens do mesmo satélite e sensor, para evitar diferenças geométricas e interferências atmosféricas entre elas, além, é claro, de diferenças entre as resoluções espaciais e espectrais. Estes autores sugerem também o uso de imagens de uma mesma época do ano, para evitar a contaminação da imagem por mudanças fenológicas sazonais, provenientes das diferentes intensidades de umidade ao longo do ano.

De acordo com Zhou et al. (2008), as técnicas pré-classificação geralmente produzem mapas de mudança e não mudança, não especificando os seus tipos ou trajetórias. Porém, Kiel (2008) acrescenta ser comum a classificação

quantitativa e qualitativa das mudanças após o limiar de separação entre classes de mudança e invariantes, sendo a construção de bandas transformadas e índices de vegetação um bom recurso de auxílio a este propósito.

Muitos são os trabalhos que se destacam no uso desta técnica. Weismiller et al. (1977) constataram que a subtração de imagens (chamada pelos autores de “classificação delta”) pode ser considerada muito simples quando aplicada à zona costeira, pois muita informação é perdida na imagem diferença resultante. Nelson (1983) considerou a diferença entre índices de vegetação a técnica mais efetiva para detectar mudanças no dossel das florestas, já que associa razão e diferença no mesmo método. Esta mesma técnica foi apontada por Soares e Hoffer (1997) como efetiva para o acompanhamento do crescimento de eucaliptos em um reflorestamento de trinta mil hectares em Minas Gerais.

Já Kiel (2008) comparou e avaliou diversas técnicas de análise direta na detecção de mudanças numa área rural do Rio Grande do Sul e não encontrou nenhuma que se sobressaísse muito sobre a outra. Porém o autor ressalta que talvez a presença significativa de nuvens e a escolha do mesmo por uma escala regional tenham contribuído para este resultado.

Kennedy et al. (2007) automatizaram o processo de detecção de distúrbios em áreas florestadas para grandes séries temporais. Estes autores plotaram os valores da banda do infravermelho próximo do Landsat/TM de dezoito anos de análise numa área público/privada do estado de Oregon, nos Estados Unidos. Cada alteração nesta curva corresponde a uma trajetória diferente. Após observarem todas as trajetórias na paisagem, os autores classificaram-nas de forma automática, de acordo com o “padrão” de suas curvas no infravermelho médio. Em Kennedy et al. (2010), a metodologia de extração das trajetórias evolutivas do trabalho anterior foi sofisticada com a implantação do pacote de algoritmos *LandTrendr*, desenvolvido pelos autores, que permite obter o grau de degradação de uma paisagem, além de detectar distúrbios e recuperações na vegetação.

Potencial do Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de técnicas e aplicações que permitem a aquisição de informação sobre objetos ou fenômenos, através do uso de sensores, sem que haja contato direto entre os mesmos (Novo, 2010). Esta tecnologia é muito útil para se estudar recursos naturais, monitoramento ambiental, levantamentos geológicos, estudos

cartográficos, estudos urbanos, dentre outros, em função da ampla visão que se tem a partir do ponto de vista de cima, ajudando a compreender diversos fenômenos em diferentes escalas (Abreu, 2010).

Existem, basicamente, três níveis de coleta de dados por sensoriamento remoto, genericamente chamados de: laboratório ou terrestre, aéreo e orbital; definindo-se para cada um, uma faixa de escala de detalhamento específica, que influi diretamente na resolução espacial do dado obtido (Novo, 2010).

As imagens orbitais são comumente as mais utilizadas para os mapeamentos de uso e cobertura da terra. Uma imagem orbital tem estrutura matricial, onde a menor unidade é o pixel e eles são distribuídos em linhas e colunas. Cada pixel armazena um valor que corresponde ao nível de reflectância do alvo. Esta reflectância se estende por várias faixas do espectro eletromagnético, ao contrário das fotografias comuns, que absorvem somente a faixa espectral do visível, similar ao que os olhos humanos enxergam (Abreu, 2010).

De acordo com Florenzano (2002), os sistemas de sensores remotos permitem obter imagens e outros tipos de dados (mapas, gráficos e tabelas, por exemplo) através do registro dessas reflectâncias no espectro eletromagnético, caso esta coleta de dados seja feita por um satélite orbital. Cada feição tem sua resposta espectral característica, que a diferencia de outras, tornando possível o mapeamento dos diferentes usos e coberturas, através de uma classificação digital.

Entendemos por classificação digital o processo de extração de informação em imagens com o objetivo de reconhecer padrões e objetos homogêneos. Os métodos de classificação de imagens são aplicados com o objetivo de criar representações temáticas de fenômenos, feições e objetos dispostos sobre a superfície terrestre. Estes métodos delimitam porções em que a resposta espectral dos alvos apresentam as mesmas características (Seabra, 2012).

Atualmente, encontramos uma variedade de classificações digitais que se aplicam à

elaboração de mapas de cobertura da terra. As classificações mais comuns são a baseada em pixels e a orientada a objetos. A classificação baseada em pixels requer muito esforço em imagens de alta resolução, visto que um pixel pode não ser representativo da feição em que se encontra. A orientada a objetos tem sido alvo de muitas pesquisas recentemente, pois agrupa pixels com respostas espectrais semelhantes em segmentos, mais condizente com a realidade (Blaschke, 2010).

O processo de classificação orientada a objeto utiliza os polígonos gerados na segmentação para definição dos objetos. As características espectrais de forma e relações de vizinhança são as informações utilizadas na descrição destes objetos. A partir destes descritores os objetos podem ser agrupados em categorias com significado ou em classes temáticas (Definiens, 2010). Cruz et al. (2007) apontam que a classificação orientada a objeto busca modelar o conhecimento para identificação de feições, baseada na descrição de padrões identificadores, tais como textura, cor, métrica e contexto.

Atualmente, o sensoriamento remoto vem apresentando diversos avanços no desenvolvimento de sensores com resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal cada vez maiores, e também no desenvolvimento de programas com novas concepções metodológicas de interpretação de imagens e computadores com capacidade de processar um maior número de informações. Além disso, dados temporais estão cada vez mais acessíveis, com grandes acervos de imagens de satélite disponíveis gratuitamente. Este avanço tecnológico e disponibilidade de dados reflete nas pesquisas de técnicas de detecção de mudanças na cobertura da terra, apontando para uma provável evolução das atuais técnicas, assim como a criação de novas abordagens, reforçando cada vez mais o potencial do sensoriamento remoto para estudos de mudanças na paisagem (Weckmüller e Vicens, 2016).

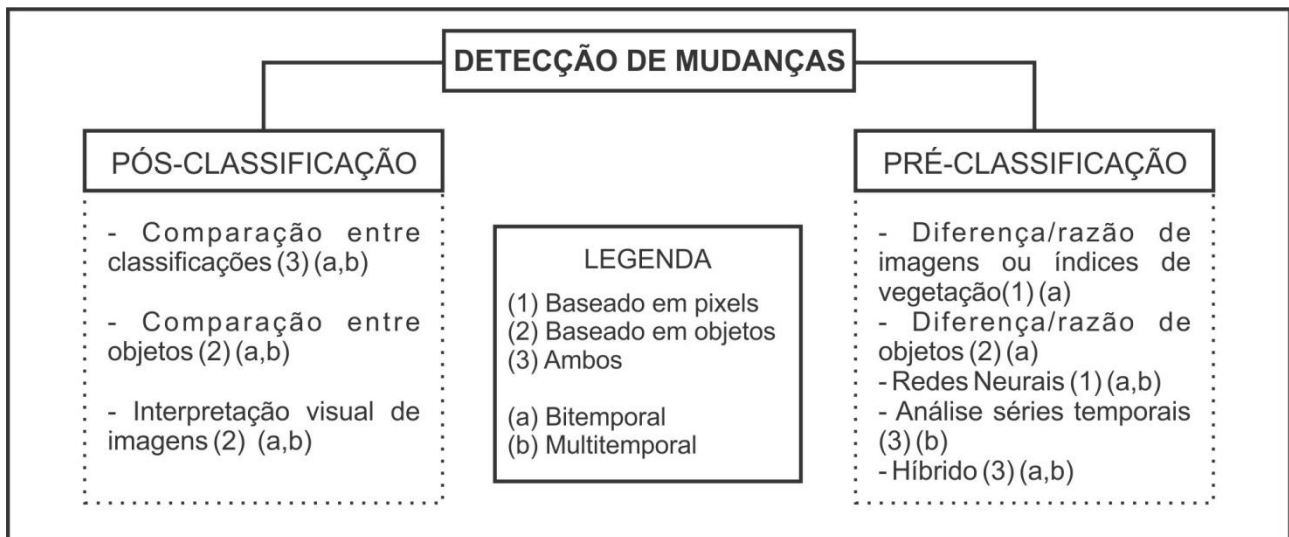


Figura 1 - Quadro síntese de detecção de mudanças.

Uso e Cobertura da Terra

Os termos Uso e Cobertura da terra são cada vez mais encontrados em pesquisas e trabalhos de diversas áreas. Instituições públicas e privadas se utilizam dessas informações para seu gerenciamento e planejamento. Porém, muitas vezes esses conceitos são utilizados de forma confusa, chegando a serem apresentados como uma coisa só. Maktav e Sunar (2010) consideram a distinção destes conceitos fundamental para um planejamento e gestão bem sucedidos. Visto a importância deste tipo de informação nas questões atuais, faz-se necessário explicar o que se entende por uso e cobertura da terra, para melhor compreensão desta pesquisa.

Segundo Jensen (2009), a cobertura da terra está relacionada ao revestimento da superfície terrestre, incluindo aspectos bióticos e abióticos, podendo ser vegetação, agriculturas, construções humanas, rochas, água, etc. Abreu (2010) acrescenta que as coberturas são mais facilmente percebidas, pois elas são a materialização da interação do homem com o meio, sendo percebidas nas imagens de sensoriamento remoto.

O uso da terra é a maneira pela qual, e a finalidade para a qual, os seres humanos utilizam a terra e seus recursos (Meyer, 1995). De maneira indireta, é possível identificar padrões em imagens orbitais que podem ser associados a determinados usos, porém o mais eficiente é a efetuação de trabalhos de campo para o reconhecimento e validação destes usos (Abreu, 2010). Segundo Maktav e Sunar (2010), o usos e a cobertura são intrinsecamente ligados, servindo como base para o desenvolvimentos de normas de zoneamento.

Também é muito comum encontrarmos na literatura trabalhos sobre uso e cobertura do solo e uso e cobertura da terra. De acordo com Abreu (2010), o uso dos termos solo e terra pode parecer

ambíguo, no entanto, em uma análise mais profunda, verifica-se que o termo solo é mais restrito, limitando-se a aspectos físicos e químicos relacionados à pedologia. Já o termo terra parece estar relacionado à ideia de superfície terrestre, portanto mais adequado para mapas de uso e cobertura. Sendo assim, este trabalho adotará o termo cobertura da terra, para os mapeamentos.

A importância do Pré-Processamento

A aquisição de imagens por sensoriamento remoto está sujeita a erros de variadas fontes. A maioria devido aos defeitos que os sensores possam apresentar ao longo de sua vida útil, e por perdas de estabilidade da plataforma que aloja o sensor. Mas há também erros originários de fatores externos que, de acordo com Meneses e Almeida (2012), formam um conjunto composto por deformações de escala, incorreções nas posições espaciais dos pixels, perda de contraste entre os alvos ou registros incorretos dos valores digitais dos pixels. Os autores ressaltam que quando o pesquisador utiliza uma imagem, é necessário corrigi-la, ou compensá-la dos erros que apresenta. Algumas dessas correções são realizadas antecipadamente à distribuição das imagens, pelas empresas ou órgãos fornecedores, enquanto outras cabem, exclusivamente, à decisão do usuário.

As correções destas distorções fazem parte do conjunto de funções de processamento que se denomina pré-processamento. São várias as técnicas de pré-processamento, pois as mesmas se ajustam ao tipo de estrutura do erro, sabendo-se previamente sua fonte de distorção. Constitui uma importante etapa de processamento, pois suaviza o efeito dos erros nos processamentos subseqüentes (Meneses e Almeida, 2012).

Para a detecção de mudanças na paisagem, o pré-processamento é de fundamental

importância, pois minimiza diferenças geométricas e radiométricas entre as imagens que podem resultar em falsas mudanças (Mas, 1999). De acordo com Coppin e Bauer (1996), estas falsas mudanças podem ser resultantes das diferenças de absorção e espalhamento atmosféricos devido a variações no vapor de água e/ou concentrações de aerossóis na atmosfera em momentos distintos no tempo, diferentes ângulos do posicionamento solar no momento de aquisição, problemas de calibração dos sensores, entre outros problemas já previamente citados.

Lu et al. (2004) destacam que antes de implementar a detecção de mudanças, as seguintes condições devem ser atendidas: (1) um registro preciso das imagens multitemporais; (2) correção atmosférica e/ou normalização radiométrica entre as imagens; (3) estados fenológicos semelhantes entre as imagens; e (4) seleção de imagens com mesma resolução espacial e espectral, se possível. Coppin e Bauer (1996) consideram as correções geométricas e radiométricas, assim com as normalizações, como as mais importantes técnicas de pré-processamento para a detecção de mudanças.

Correção Geométrica

A correção das distorções geométricas trata, prioritariamente da remoção de erros sistemáticos e não-sistemáticos presentes em todos os tipos de imagens de sensoriamento remoto. Os erros sistemáticos são provenientes de características conhecidas da Terra e da plataforma do sensor. Os erros não-sistemáticos são ocasionados pela alteração na altura do satélite (Marotta e Vieira, 2005). De acordo com Meneses e Almeida (2012), esta correção ocorre fundamentalmente em duas fases.

Na primeira fase são eliminadas as distorções geométricas introduzidas no momento de aquisição das imagens, causadas pela rotação, inclinação e curvatura da Terra, e devida à instabilidade da plataforma (erros sistemáticos). Por depender de uma série de parâmetros da exatidão da plataforma, que o pesquisador não tem acesso e/ou conhecimento, esta etapa fica a cargo dos laboratórios de produção destas imagens. Na segunda fase, realizada pelo usuário, corrigi-se as distorções remanescentes da primeira etapa e distorções geradas pela visão cônica dos satélites (erros não sistemáticos). O objetivo é que seja possível localizar na imagem a posição geográfica dos alvos, através de um par de coordenadas e um sistema de referencial geodésico, com a maior exatidão possível. Isso constitui o que se denomina registro de imagens, que utiliza transformações geométricas simples, usualmente transformações

polinomiais, para estabelecer uma equivalência entre as coordenadas espaciais da imagem e as coordenadas geográficas de uma base cartográfica e/ou outra imagem; fazendo com que a imagem orbital assuma as propriedades de escala e de projeção (Marotta e Vieira, 2005; Meneses e Almeida, 2012).

Chen et al. (2012) ressaltam que o registro de imagens para a detecção de mudanças deve ser multitemporal, ou seja, todas as datas devem ser co-registradas. Os autores ressaltam o cuidado neste processo, aconselhando um erro médio quadrático (RMS) ao nível do sub-pixel, em imagens de satélites com média ou baixa resolução espacial. Porém, Jianya et al. (2008) destacam que este nível de precisão é possível quando se usa imagens de um mesmo sensor, sendo muito difícil conseguir um alto grau de precisão no registro de imagens provenientes de sensores diferentes, devido às suas distintas resoluções e características de aquisição. Neste caso, e em caso de áreas montanhosas e/ou densamente urbanizadas, os autores aconselham optar pelo processo de ortoretificação de imagens.

Li et al. (2002) acreditam que um registro de alta precisão é necessário para uma detecção de mudanças baseada em pixels, evitando a detecção de falsas mudanças. Acrescentando a esta discussão, Chen et al. (2014) fizeram um extensivo trabalho de comparação entre a influência do erro de registro na precisão de diferentes métodos de detecção de mudanças em áreas urbanas, suburbanas e rurais. Os autores concluíram que em todas estas áreas, as técnicas de detecção de mudanças baseada em pixels foram as mais sensíveis à erros de registro entre imagens.

A exatidão posicional de uma imagem proveniente de sensoriamento remoto pode ser avaliada através do Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) definido no Decreto-lei nº. 89.817 de 1984, que regulamenta a classificação dos produtos cartográficos quanto à sua exatidão, dividido em 3 classes: A, B e C. O PEC é um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão dos trabalhos cartográficos (BRASIL, 1984). De acordo com Menezes e Couto (2013), é necessária a revisão desta legislação, obsoleta, na visão dos autores, visto o avanço da cartografia analógica, vigente na época do decreto, para a digital nos dias de hoje.

Neste contexto, Telles et al. (2013) destacam o esforço de revisão deste padrão de referência, com a mudança para o paradigma digital, cuja denominação passaria a ser PAP-PCD (Padrão de Acurácia e Precisão para Produtos Cartográficos Digitais). Esta revisão da PEC não é

oficial, pois não foi homologada. Porém, no meio científico, serve como apoio para avaliação dos produtos cartográficos digitais. A tabela a seguir

apresenta os valores em metros de erro médio e desvio padrão do PEC e do PAP-PCD (Tabela 2).

Tabela 2: Erro médio (EM) e desvio padrão (DP) do PEC e PAP-PCD para diferentes escalas (Fonte: Telles et al., 2013).

PEC	PAP-PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		EM	DP	EM	DP	EM	DP	EM	DP
-	A	6,25 m	3,75 m	12,5 m	7,5 m	25 m	15 m	62,5 m	37,5 m
A	B	12,5 m	7,5 m	25 m	15 m	50 m	30 m	125 m	75 m
B	C	20 m	12,5 m	40 m	25 m	80 m	50 m	200 m	125 m
C	D	25 m	15 m	50 m	30 m	100 m	60 m	250 m	150 m

Correção Radiométrica

As interações da radiação solar e da radiação refletida por alvos da superfície terrestre com constituintes da atmosfera interferem no processo de sensoriamento remoto, já que o espalhamento e a absorção ocasionam mudanças na direção de propagação ou perda de energia para outros constituintes atmosféricos (Kaufman, 1989). Estas interferências dependem do comprimento de onda eletromagnética. Quanto menor, maior será a intensidade do efeito que provoca a redução do contraste da imagem, porém sem alterar a sua dimensão, em um processo chamado de atenuação atmosférica (Zullo, 1994).

Desta maneira, um fator fundamental numa detecção de mudanças por análise direta é a correção radiométrica das imagens. De acordo com Song et al. (2001), esta correção pode ocorrer de duas formas: absoluta e relativa.

A correção absoluta é aquela que utiliza parâmetros de calibração do sensor e da atmosfera. Segundo Pimenta et al. (2013), estes parâmetros podem ser estimados, caso o modelo adotado seja alternativo, ou medido, caso o método usado seja o físico, que tenta retratar a complexidade da atmosfera e sua complexa interação com a radiação. Este último requer muito conhecimento acerca dessas interações por parte do pesquisador. A correção relativa utiliza somente dados da própria imagem, não exigindo parâmetros atmosféricos.

Normalização Radiométrica

Em algumas circunstâncias, aplicações que envolvem classificação e detecção de mudanças, a correção atmosférica é desnecessária, principalmente quando os dados utilizados no método não derivam de dados de radiância. Song et al. (2001), em testes realizados com uma série

multitemporal de imagens Landsat, mostraram que métodos complexos de correção atmosférica por extração de aerossol melhoram muito pouco a classificação e a detecção de mudanças. Os melhores desempenhos foram encontrados para métodos mais simples como o DOS. Resultado similar foi encontrado por Schroeder et al. (2006). Para a maioria das séries históricas de imagens de satélites não existem informações associadas às condições atmosféricas, iluminação, entre outras. Em função disso, Canty et al. (2004) acreditam que a normalização baseada na informação radiométrica intrínseca às imagens é uma alternativa sempre que a radiância absoluta da superfície não é necessária, como no caso da detecção de mudanças.

Testes realizados por Schroeder et al. (2006) para vários métodos de correção radiométrica, comparando por datas e por bandas em imagens Landsat, mostraram que a normalização produz sempre os melhores resultados para séries temporais. Esses resultados são similares aos de Olson (1995) quem reportou a correção relativa como preferível à correção absoluta para detecção acurada de mudanças em floresta boreal.

A normalização é realizada num par de imagens correspondentes, de datas diferentes (sendo uma delas a referência), onde diferentes técnicas são empregadas para selecionar feições pseudo-invariantes (PIFs) as quais são subsequentemente utilizadas para calibrar empiricamente séries temporais de imagens. Sendo assim a normalização radiométrica pode ser considerada uma correção relativa que consiste em minimizar diferenças radiométricas entre imagens, para que as mesmas possam ser comparadas ou classificadas em conjunto.

Proposta por Hall et al. (1991), com o nome de Retificação Radiométrica, a normalização desenvolvida por estes autores consiste no uso de um conjunto de pontos invariantes ao longo do tempo entre a imagem referência e a imagem a ser normalizada, para determinar os parâmetros de regressão linear através dos mínimos quadrados (*Ordinary Least Square Regression*).

O ajuste entre a imagem de referência e as imagens a serem normalizadas segue dois critérios: a seleção manual de feições pseudo-invariantes (*Pseudo-invariant Features – PIF*) (Schott et al., 1988) ou a ordenação estatística através de detecção multivariada de alterações (*Multivariate Alteration Detection – MAD*) (Nielsen et al., 1998; Canty et al., 2004). Ambos métodos foram comparados em trabalho desenvolvido por Schroeder et al. (2006) que acharam poucas diferenças entre eles, com um desempenho ligeiramente melhor do MAD.

Embora seja um método com maior consumo de tempo e esforço, a utilização de PIFs, que de acordo com Song et al. (2001), representam formas bem definidas espacialmente e espectralmente estáveis ao longo do tempo, permite uma maior representatividade das diferentes coberturas invariantes, sendo selecionados PIFs claros e escuros, como sugerido por Eckhardt et al. (1990).

A coleta destes PIFs pode ser feita de várias maneiras. Uma delas seria a geração de pontos aleatórios, sendo escolhidos aqueles que possuem menor diferença entre si, o que apontam para possíveis áreas estáveis. Porém, este método é questionável no sentido de talvez não atender a heterogeneidade das classes de uma imagem, pois os pontos resultantes desta filtragem podem estar predominantemente em corpos d'água, por exemplo. Cronemberger (2014) e Weckmüller e Vicens (2015) desenvolveram um método de coleta de PIFs que consiste em pelo menos trinta pontos invariantes por classe, manualmente, que represente toda a heterogeneidade da cobertura da terra na cena.

Fernandes et al. (2017) desenvolveram um código em linguagem R que automatizou todo o processo de normalização radiométrica. O código normaliza em pares de imagens, desenvolvendo uma equação de regressão linear para cada ano da série temporal, levando-se em conta a mesma imagem referência. Os dados de saída são a imagem normalizada e um gráfico entre esta e a

referência para análise de qualidade dos resultados (equação linear e R^2).

Trajetórias evolutivas da paisagem

Estudos de mudanças na cobertura da terra são comuns na literatura, pois seus resultados são fundamentais para ações de planejamento e/ou gestão do território. Eles contemplam a quantificação e localização de desmatamentos, urbanizações, antropizações, intensificações de cultivos, reflorestamentos, entre outros fenômenos de mudanças.

Neste contexto, as trajetórias evolutivas surgem como complemento dos estudos de mudanças, aprofundando as informações sobre o histórico da cobertura da terra. Esta perspectiva abre um horizonte maior de entendimento sobre a degradação da paisagem, que possibilita ao pesquisador conhecer importantes informações sobre a paisagem, como por exemplo: a idade de uma pastagem e a classe que precedeu sua ocorrência; a intensidade da urbanização e em que classe ocorreu esta pressão; ou ainda o abandono de uma área de cultivo e o tempo de recuperação da mesma para uma vegetação secundária (Weckmüller e Vicens, 2016).

De acordo com Banskota et al. (2014), as detecções de mudança baseadas em trajetórias utilizam padrões espectrais-temporais para identificar tipos de distúrbios e suas magnitudes. Os autores as dividem em 4 categorias: (1) Baseada em limiares, (2) Simple ajuste da curva, (3) Curva hipotética e (4) segmentação da trajetória. A categoria 1 exige como pré-requisito um limiar que configure mudanças florestais. Já as categorias 2, 3 e 4 geram suas próprias trajetórias estimando os limiares com base nas informações da série temporal.

Gilberto Câmara, respeitado no mundo inteiro por suas pesquisas e publicações na área das geotecnologias, defende as trajetórias evolutivas como uma quebra de paradigma nos estudos de mudança (Câmara et al., 2016). Até agora a variável espaço era priorizada em relação ao tempo, ou seja, os mapeamentos eram feitos para cada data com comparação posterior dos seus resultados, o paradigma chamado de “*Space First*” (Figura 2a). A partir desse momento há uma mudança importante neste paradigma, pois a variável tempo passa a ser a mais importante, com o uso de séries temporais, chamado de “*Time First*” (Figura 2b). Assim, o mapa deixa de ser um resultado absoluto, exigindo o complemento de uma assinatura espectral-temporal de suas classes de mudança (Maus et al., 2016).

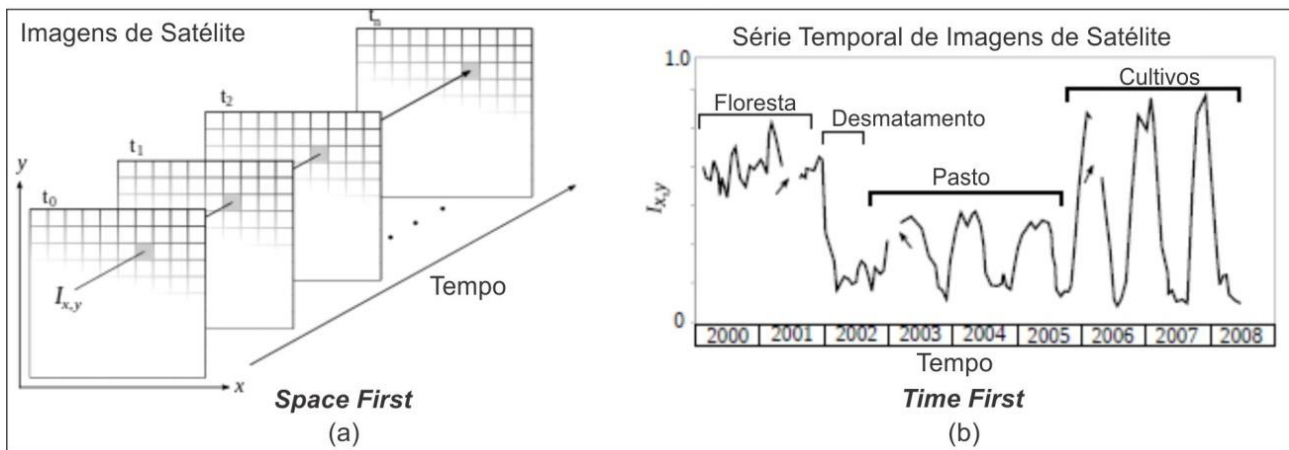


Figura 2: (a) Uma matriz tridimensional de imagens de satélite, onde o pixel $I(x,y)$ é classificado separadamente, priorizando a variável espaço (b) uma série temporal de índice de vegetação I na localização do pixel (x,y) , priorizando a variável tempo. As setas indicam lacunas de dados (adaptado de Maus et al., 2016).

A necessidade de se entender a paisagem numa perspectiva temporal, levando em consideração as diferentes intensidades e frequências de mudanças no uso e cobertura da terra da mesma ao longo do tempo são de fundamental importância para o ordenamento territorial/ambiental. Banskota et al. (2014) destacam que, diferente da detecção de mudanças bitemporal, as trajetórias possibilitam entender a natureza das mudanças, assim como sua magnitude.

O conhecimento destas trajetórias evolutivas pode servir como subsídio para os órgãos tomadores de decisão, pois estão diretamente relacionados com o grau de transformação da paisagem, ou seja, o estado da mesma. As informações sobre a degradação ou estabilidade da paisagem raramente são utilizadas no planejamento, ordenamento ou gestão do território. Sendo assim, acredita-se que o uso destas informações para fins de planejamento são de suma importância para sua eficiência. Cabe ao pesquisador decidir qual a melhor metodologia para classificar as trajetórias, de acordo com sua experiência e/ou características da área de estudo (Weckmüller e Vicens, 2016).

As trajetórias evolutivas apresentam diferentes características quanto às transformações entre as classes. De acordo com Mertens e Lambin (2000), as trajetórias podem representar mudanças irreversíveis, reversíveis ou cíclicas. As trajetórias cíclicas, como o próprio nome já diz, correspondem àquelas que possuem um comportamento de ciclo, onde as mudanças entre as classes costumam se repetir num certo período de tempo, como por exemplo, trajetórias de

agricultura, onde período de plantio e colheita são intercalados. As permanentes ou irreversíveis representam uma quebra de classes, ou seja, uma mudança de uma classe para outra, sem que haja um padrão estabelecido no tempo, como por exemplo trajetórias de desmatamento, onde a classe floresta é suprimida por outra classe. A Tabela 3 lista os tipos de trajetórias mais comuns e sua respectiva classificação.

Tabela 3: Diferentes tipos de trajetórias e sua classificação.

<i>Trajeto�rias C�clicas</i>	<i>Trajeto�rias Permanentes</i>
Mudan�as fenol�gicas (provocada pelas altera�es das esta�es do ano)	Antropiza�es (classe para antr�pico)
Rotaa�o de culturas (diferentes respostas espectrais para o plantio e colheita)	Desmatamentos (floresta para classe)
	Reflorestamentos (classe para floresta)
	Urbaniza�es (classe para urbano)

Kennedy et al. (2014) classificaram os diferentes tipos de trajetórias de acordo com suas curvas espectrais temporais: (a) estresse ou perda cr nica; (b) ganho ou aumento; (c) mudanças definitiva; (d) mudanças e resiliência; (e) mudança cíclica (Figura 3). Assim como Gilberto Câmara, os autores supracitados defendem a utiliza o de séries temporais, pois a bitemporalidade não é capaz de definir qual processo de trajetórias está atuante na paisagem (Figura 3f e 3g).

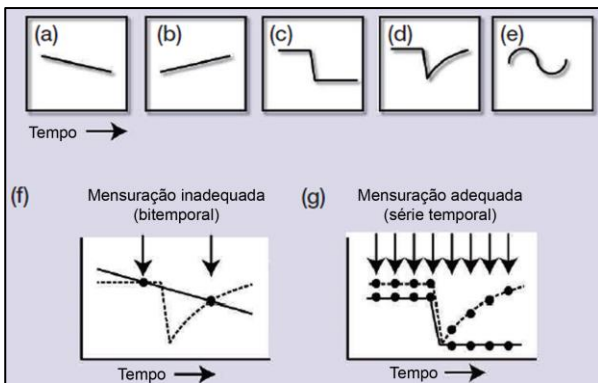


Figura 3.2: Tipos de trajetórias de acordo com sua curva espectral: (a) estresse ou perda crônica; (b) ganho ou aumento; (c) mudanças definitiva; (d) mudanças e resiliência; (e) mudança cíclica. Ineficiência da bitemporalidade (f) em explicar trajetórias espectrais temporais (g). Fonte: adaptado de Kennedy et al. (2014).

Os mapeamentos das trajetórias evolutivas possibilitam a aplicação em uma grande diversidade de objetivos devido à sua natureza interdisciplinar. Estudos de mudanças na vegetação, como desmatamentos e revegetações, são os mais comuns na literatura, mas também se encontra estudos em ambientes urbanos, áreas agrícolas e associações destes com geoinformações.

Mertens e Lambin (2000) utilizaram as trajetórias evolutivas para espacializar os desmatamentos no sul do Camarões e projetar cenários futuros para esta paisagem, com a utilização de modelos matemáticos. Mena (2008) cruzou as trajetórias do norte da Amazônia equatorial com dados demográficos e distância das estradas, para entender suas dinâmicas e localizar áreas principais de mudanças. Hepinstall-Cymerman et al. (2009) utilizaram as trajetórias para entender a urbanização em sua área de estudo e seus impactos no meio ambiente, através da inserção destes dados numa modelagem ecológica. Seabra (2012) utilizou as trajetórias como subsídio à identificação de áreas prioritárias para recuperação na bacia hidrográfica do rio São João (RJ), por meio de uma abordagem geocológica. Weckmüller e Vicens (2013) utilizaram trajetórias evolutivas da paisagem para entender a ocorrência espaço-temporal de fenômenos de desmatamento, expansão urbana e regeneração florestal em Petrópolis (RJ).

Alguns trabalhos de trajetórias também utilizaram métodos baseados nos algoritmos *LandTrendr*, que acredita-se ter uma forte perspectiva de se tornar a tendência paradigmática das detecções de trajetórias evolutivas, pois analisa a série temporal como um todo, com suas

respectivas curvas espectrais temporais, atendendo ao dinamismo atual de mudanças da paisagem (*time-first*).

O *LandTrendr* (*Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery*) é um pacote de algoritmos de detecção de mudanças baseado em pixels, desenvolvido por Kennedy et al. (2010), que objetiva gerar trajetórias espectro-temporais que expressam os eventos ocorridos no pixel no decorrer do tempo, resumidamente em três fases: pré-processamento, segmentação temporal e classificação das trajetórias. O conceito de segmentação temporal, criado pelo autor, é importante, pois se difere do uso da palavra segmentação usada até então na literatura, de cunho estritamente espacial. A segmentação temporal do algoritmo *LandTrendr*, resumidamente, consiste na simplificação de uma trajetória espectral temporal, identificando quebras estatísticas do comportamento linear entre a imagem inicial e a final da série (Figura 4).

O *LandTrendr*, além de estar disponível gratuitamente à comunidade científica no portal eletrônico da Universidade de Oregon, nos EUA (<http://landtrendr.forestry.oregonstate.edu>), dispõe de um documento de guia do usuário que detalha bem toda a organização de pastas, processamento de dados de entrada e execução do algoritmo. Este guia é fundamental, visto que a ferramenta não possui interface gráfica, é executado por código no software Envi IDL. Recentemente, em Kennedy et al. (2018), o *LandTrendr* foi adicionado como uma função no *Google Earth Engine* (disponível gratuitamente em: github.com/KennedyResearch/LandTrendr-2012).

Kennedy et al. (2012) aplicaram o *Landtrendr* analisando padrões de desmatamentos e recuperações vegetais em áreas protegidas públicas e privadas, além das ecorregiões de uma floresta temperada no noroeste dos Estados Unidos. Griffiths et al. (2012) adotaram as trajetórias evolutivas geradas por este algoritmo em uma cena *Landsat* que corresponde à parte da região dos Cárpatos, no leste da Romênia, para entender o comportamento da cobertura da terra nos principais acontecimentos na Europa entre 1984 e 2010, concluindo que o colapso do socialismo provocou uma diminuição drástica no desmatamento e o abandono de muitas terras agrícolas, enquanto que a ascensão da União Europeia contribuiu para a retomada de cultivos nestas áreas agrícolas. Fragal et al., (2016) utiliza as trajetórias para mensurar a perda de florestas de várzea num trecho do baixo rio Amazonas entre 1984 e 2009. Weckmüller (2018) utilizou o *LandTrendr* para entender a magnitude, duração e idade das mudanças florestais no estado do Rio de

Janeiro entre 1984 e 2016. Os dois últimos autores concluíram que o *LandTrendr* obteve uma acurácia entre 65 e 70% de acerto nas classes de trajetórias propostas. Kennedy et al. (2018) implementaram os algoritmos *LandTrendr* na plataforma *Google Earth Engine*, devido ao grande acervo de imagens

e capacidade de processamento em nuvem deste. Os autores conseguiram entre 85% e 95% de concordância entre os resultados do algoritmo no Envi IDL e no software da *Google*.

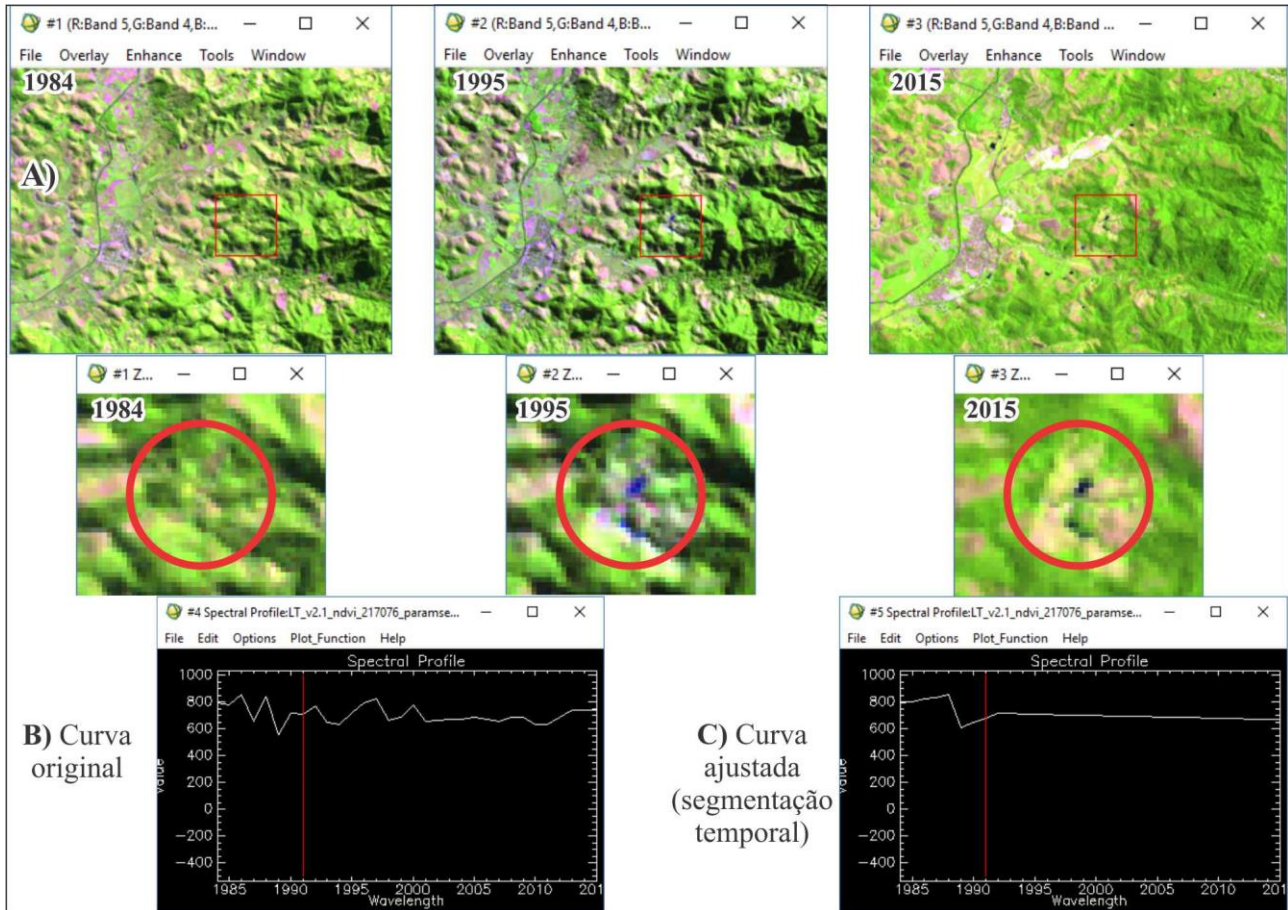


Figura 4: (A) Composições RGB 543 Landsat TM 5 datadas de 1985, 1990 e 2010 (datas na própria imagem) de uma amostra de mudança, com destaque para um desmatamento por queimada seguido de regeneração. (B) Curva espectral original e (C) curva espectral ajustada em segmentos da classe de trajetória destacada. Estes gráficos são do NDVI (eixo y) ao longo de toda a série temporal (eixo x). Fonte: Weckmüller (2018).

Validação de Trajetórias

Tema recorrente sobre detecção de mudanças e mapeamentos em geral, a avaliação da precisão da técnica é fundamental. Muitas são as possibilidades de avaliação. Uma das mais comuns e efetivas, muito utilizadas na literatura, é o índice kappa associado à análise da matriz de confusão. Considera-se que a análise da matriz de confusão é tão importante quanto o índice kappa, pois permite identificar a principal fonte de erros da classificação, se é proveniente do algoritmo e/ou do pesquisador, através dos erros de comissão e omissão.

A diagonal principal da matriz de confusão é ocupada pelo número de pixels corretamente classificada para cada classe da legenda. Por outro lado, os elementos fora da diagonal principal correspondem a erros de classificação. Os

elementos dentro da mesma linha pertencem a uma determinada classe, mas não foram classificados corretamente. Este é o chamado erro de omissão. Os elementos fora da diagonal principal pertencentes a uma mesma coluna representam os pixels da amostra que foram classificados dentro de uma determinada classe, mas na verdade pertencem a outra. Este é o chamado erro de comissão (Figura 5). Os erros de omissão e comissão enfocam o mesmo problema. A omissão se refere a uma definição imperfeita da categoria, superestimando-a, e a comissão se refere a uma delimitação excessiva da categoria, subestimando-a (Ferreira et al., 2007).

No caso da análise de diferentes métodos numa mesma área de estudo, os pontos devem ser diferentes, evitando um efeito conhecido como pontos treinados, onde a localização dos mesmos

pode superestimar os resultados. Além disso, Congalton (1991) destaca que um número representativo de amostras coletadas para uma avaliação seria de 50, número este coletado para este trabalho, o que segundo o autor garante a relevância estatística dos dados.

	Desm.	Recup.	Invariante	Total Amostras	Erro Omissão (%)
Desm.	30	5	15	50	40
Recup.	5	33	12	50	34
Invariante	1	1	48	50	4
Soma Colunas	36	39	75	Exatidão Global	
Erro Comissão (%)	17	15	36	74%	

Figura 5: Esquema demonstrativo de uma matriz de confusão com o cálculo dos erros de comissão e omissão, para um exemplo de 50 amostras coletadas (Fonte: Weckmüller, 2018).

Outro método de validação disponível na literatura e compatível com o dinamismo da análise de séries temporais é o TimeSync, desenvolvido por Cohen et al. (2010). Visto como um complemento do pacote de algoritmos LandTrendr, o mesmo consiste em um interpretador manual de trajetórias, que pode ser usado para validação das mesmas.

Conclusão

As geotecnologias continuam em evolução, bem acelerada, assim como o setor de informática e telecomunicações. Seus objetos de estudo seguem os mesmos, porém as metodologias estão em constante sofisticação. A perspectiva dos estudos de trajetórias evolutivas, em particular, está na análise das curvas espectrais temporais, condizente com o novo paradigma em ascensão que prioriza o tempo (*time-first*).

Numa temática tão dinâmica quanto as geotecnologias e os estudos de mudanças na paisagem, são importantes trabalhos que sistematizem correntes de pensamento, fundamentando teorias e metodologias. Acredita-se que essas iniciativas auxiliarão a consolidação epistemológica das geotecnologias.

Assim, fica a necessidade de estudos mais aprofundados com relação a essa temática, que possam, a partir das contribuições do presente trabalho desenvolver futuras pesquisas acompanhando, analisando e elaborando teorias e metodologias referentes aos estudos das trajetórias evolutivas da paisagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Geografia Física (LAGEF), da Universidade Federal Fluminense (UFF); e a Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio a esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Abreu, M.B., 2010. Análise Espaço-temporal da Cobertura e Uso da Terra no Estado do Rio de Janeiro de 1994 até 2007. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/16/teses/776007.pdf>. Acesso: 10 no 2017.
- Almeida, R.S., 2007. Determinismo Natural: origens e consequências na geografia. Disponível em: <http://robertoschmidt.ggf.br>. Acesso: 12 jan. 2018.
- Andrade, P.R.; Câmara, G.; Mareto, R.; Monteiro, A.M.; Carneiro, T.G.S.; Feitosa, F.F., 2015. Experiences with a Socio-Environmental Modeling Course. *Modelling in Science Education and Learning* 8(1), 71-92.
- Araújo, E.H.G., 2006. Análise Multi-Temporal de cenas do satélite Quickbird usando um novo paradigma de classificação de Imagens e inferências espaciais: estudo de caso em Belo Horizonte, MG. Disponível: <http://www.inpe.br/biblioteca>. Acesso: 02 dez. 2017.
- Banskota, A.; Kayastha, N.; Falkowski, M.J.; Wulder, M.A.; Froese, R.E.; White, J.C., 2014. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40 (5), 362-384.
- Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 2-16.
- Brasil, 1984. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Disponível em: concar.gobr/detalheDocumentos.aspx?cod=8. Acesso: 19 mar. 2018.
- Bruzzone L.; Smits, P.C.; Tilton, J.C., 2003. Foreword Special Issue on Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2419-2422.
- Buzai, G.D., 2001. Paradigma Geotecnológico, Geografía Global y CiberGeografía, la gran explosión de un universo digital en expansión. *GeoFocus, Artículos*. 1, p. 24-48.
- Câmara, G.; Maciel, A.; Maus, N.; VINHAS, L.; SANCHEZ, A., 2016. Using dynamic geospatial ontologies to support information extraction from big Earth

- observation data sets. GIScience 2016 Conference, Montreal, Canada.
- Câmara, G.; Monteiro, A.M.; Medeiros, J.S., 2004. Fundamentos Epistemológicos da Ciência da Geoinformação. In: Câmara, G.; Monteiro, A.M.; Medeiros, J.S. Introdução à Ciência da Geoinformação. INPE, São José dos Campos, SP.
- Câmara, G.; Monteiro, A.M.; Paiva, J.A.C; Souza, R.C.M., 2000. Action-Driven Ontologies of the Geographical Space. In: GIScience 2000, Proceedings. Savannah, GA, AAG.
- Canty, M.J; Nielsen, A.A; Schmidt, M., 2004. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 91, 441-451.
- Castiglione, L.H.G., 2009. Epistemologia da Geoinformação: uma Análise Histórico-Crítica. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=246413&view=detalhes>. Acesso: 02 nov. 2016.
- Castiglione, L.H.G., 2003. Uma Viagem Epistemológica ao Geoprocessamento. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=282396&view=detalhes>. Acesso: 10 out. 2016.
- Chen, G.; Hay, G.J.; Carvalho, L.M.T.; Wulder, M.A., 2012. Object based change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (14), 4434-4457.
- Chen, G.; Zhao, K.; Powers, R., 2014. Assessment of the image misregistration effects on object-based change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 19-27.
- Cohen, W.B.; Yang, Z.; Kennedy, R.E., 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync - Tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2911-2924.
- Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-76.
- Coppin, P.R.; Bauer, M.E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews*, 13, 207-234.
- Coppin, P.R.; Jonckheere, I.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Lambin, E., 2004. Digital Change Detection Methods In Ecosystem Monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (05), 1565-1596.
- Costa, F.R.; Rocha, M.M., 2010. Geografia: conceitos e paradigmas – apontamentos preliminares. *Revista GEOMAE*, 1 (2), 25-56.
- Costa, S.M.F., 2003. A antropogeografia de Ratzel. 5 p. Disponível em: <https://www1.univap.br/~sandra/ratzel.pdf>. Acesso: 19 jan. 2018.
- Costa, S.S.; Aguiar, A.P.; Câmara, G.; Carneiro, T.; Moreira, E., 2013. Agent placement for land change models in frontier regions. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu, PR. INPE*, 6363-6370.
- Cronemberger, F.M., 2014. Paisagens da Serra do Mar: uma análise geocológica da dinâmica da paisagem. Disponível em: <http://www.posgeo.uff.br/banco-de-teses-e-dissertacoes>. Acesso: 04 abr. 2016.
- Cruz, C.B.M.; Vicens, R.S.; Seabra, S.; Reis R.B.; Faber, O.A.; Arnaut, P.K.E.; Araújo, M., 2007. Classificação orientada a objetos no mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica, na escala 1:250.000. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, SC. INPE*, 5691-5698.
- Deer, P., 1995. Digital Change Detection Techniques In Remote Sensing. Technical Report Defensed Science and Technology Organization, Department of Defense United States of America 169, 01-53.
- Definiens, 2010. The Principles of Definiens Cognition Network Technology. Disponível em: <http://earth.definiens.com/learn/technology>. Acesso: 02 ago. 2014.
- DeFries, R., 2013. Why forest monitoring matters for people and the planet. In: *Global forest monitoring from earth observation*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, p. 1-14.
- DeFries, R.S.; Foley, J.A.; Asner, G.P., 2004. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2, 249-257.
- Dobson, J.E., 1993. The Geographic Revolution: A retrospective on the age of Automated Geography. *The Professional Geographer*, 45 (4), 431-439.
- Eckhardt, D.W.; Verdin, J.P.; Lyford, G.R., 1990. Automated update of an irrigated lands GIS using SPOT HRV imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (11), 1515-1522.

- Fernandes, P.J.F.; Vicens, R.S.; Furtado, L.F.A., 2017. Modelo automático de normalização radiométrica de série multitemporal Landsat-5 usando pontos pseudoinvariantes, PIF. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69 (02), 241-251.
- Ferreira, E.; Dantas, A.A.A.; Morais, A.R., 2007. Exatidão na classificação de fragmentos de matas em imagem do satélite Cbers-CCD, no município de Lavras, MG. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, SC. INPE, 887-894.
- Florenzano, T.G., 2002. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. Ed. Oficina de textos, São Paulo, SP. 140 p.
- Fragal, E.H.; Silva, T.S.F.; Novo, E.M.L.M., 2016. Reconstructing historical forest cover change in the Lower Amazon floodplains using the LandTrendr algorithm. *Acta Amazonica*, 46 (1), 13-24.
- Goodchild, M.F. 1992. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (1), 31–45.
- Goodchild, M.F. 2010. Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1, 3–20.
- Griffiths, P; Kuemmerle, T; Kennedy, R.E; Abrudan, I.V; Knorn, J; Hostert, P., 2012. Using annual time-series of Landsat images to assess the effects of forest restitution in post-socialist Romania. *Remote Sensing of Environment*, 118, 199-214.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J., 1991. Radiometric Rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35, 11-27.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2013. *Manual Técnico de Uso da Terra*. Rio de Janeiro, RJ, 3ª edição. 171 p.
- Jensen, J.R., 2005. *Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 525 p.
- Jensen, J.R., 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente. Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. Ed. Parentese, São José dos Campos, SP. 598 p.
- Jiayana, G.; Haigang, S.; Guorui, M.; Qiming, Z., 2008. A Review of Multi-Temporal Remote Sensing Data Change Detection Algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing, China.
- Kareiva, P.; Watts, S.; McDonald, R.; Boucher, T., 2007. *Domesticated nature: Shaping landscapes and ecosystems for human welfare*. Science, 316, 1866-1869.
- Kaufman, Y., 1989. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In: ASRAR, G. (org) *Theory and applications of optical remote sensing*. New York: John Wiley & Sons, 336-428.
- Kennedy, R.E.; Andréfouët, S.; Cohen, W.B.; Gómez, C.; Griffiths, P.; Hais, M.; Healey, S.P.; Helmer, E.H.; Hostert, P.; Lyons, M.B.; Meigs, G.W.; Pflugmacher, D.; Phin, S.R.; Powell, S.L.; Scarth, P.; Sen, S.; Schroeder, T.A.; Schneider, A.; Sonnenschein, R.; Vogelmann, J.E.; Wulder, M.A.; Zhu, Z., 2014. Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. *Frontiers in Ecology and Environment*, 12 (6), 339-346.
- Kennedy, R.E.; Cohen, W.B.; Schroeder, T.A., 2007. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 110, 370-386.
- Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B., 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2897-2910.
- Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B.; Pfaff, E.; Braaten, J.; Nelson, P., 2012. Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. *Remote Sensing of Environment*, 122, 117-133.
- Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Gorelick, N.; Braaten, J.; Cavalcante, L.; Cohen, W.B.; Healey, S., 2018. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10 (691), 1-10.
- Kiel, R., 2008. Detecção de mudanças no uso e na cobertura do solo em uma série temporal de imagens da região da Campanha do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.ufrgs.br/srm/ppgsr/publicacoes/Dissert_RobertoKiel.pdf. Acesso: 08 mar. 2016.
- Lambin, E.F.; Geist, H.J., 2006. *Land Use and Land Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Li, D., Sui, H.; Xiao, P., 2002. Automatic Change Detection of Geo-spatial Data from

- Imagery. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Xi'an, China, Vol. XXXIV, Part 2, 245-251.
- Lu, D.; Li, G.; Moran, E., 2014. Current situation and needs of change detection techniques. International Journal of Image and Data Fusion, 5 (1), 13-38.
- Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E.; Moran, E., 2004. Change detection techniques. International Journal of Remote Sensing, 25 (12), 2365-2407.
- Maktav, D.; Sunar, F., 2010. Remote sensing of urban land use change in developing countries: an example from Büyükçekmece, Istanbul, Turkey. In: Rashed, T.; Jürgens, C (org) Remote Sensing of Urban and Suburban Areas, Remote Sensing and Digital Image Processing 10. Springer Science+Business Media B. 355 p.
- Mark, D.M. 2003. Geographic information science: Defining the field. In: Foundations of Geographic Information Science, M. Duckham, M. F. Goodchild, and M. F. Worboys, Eds. Taylor and Francis, New York, 1-18.
- Marotta, G.S.; Vieira, C.A.O., 2005. Aplicação do padrão de exatidão cartográfica em imagens orbitais Aster para fins de atualização de mapeamentos. Anais XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, Macaé/RJ. SBC.
- Mas, J.F., 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. International Journal of Remote Sensing, 20 (01), 139-152.
- Maus, N.; Câmara, G.; Cartaxo, R.; Sanchez, A.; Ramos, M.; Queiroz, G.R., 2016. A Time-Weighted Dynamic Time Warping Method for Land-Use and Land-Cover Mapping. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9 (8), 3729-3739.
- Mena, C.F., 2008. Trajectories of Land-use and Landcover in the Northern Ecuadorian Amazon: Temporal Composition, Spatial Configuration, and Probability of Change. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 74, 737-751.
- Meneses, P.R.; Almeida, T., 2012. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. UnB, Brasília, DF. 276 p.
- Menezes, P.M.L.; Fernandes, M.C., 2013. Roteiro de Cartografia. Ed. Oficina de Textos, 1ª Edição. São Paulo-SP. 288 p.
- Mertens, B; Lambin, E.F., 2000. Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon. Association of American Geographers, 90, 467-494.
- Meyer, W.B. Turner, B.L., 1996. Land-Use/Land-Cover Change: Challenges for Geographers. Geojournal, 39 (3).
- Nagendra, H.; Reyers, B.; Lavorel, S., 2013. Impacts of land change on biodiversity: making the link to ecosystem services. Current Opinion in Environmental Sustainability, 5, 1-6.
- Nelson, R.F., 1983. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49, 1303-1314.
- Nielsen, A.A.; Conradsen, K.; Simpson, J.J., 1998. Multivariate Alteration Detection, MAD, and MAF Postprocessing in Multispectral, Bitemporal Image Data: New Approaches to Change Detection Studies. Remote Sensing of Environment, 64, 1-19.
- Novo, E.M.L.M., 2010. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. Ed. Blucher, São Paulo, SP, 4ª edição. 388 p.
- Olson, H., 1995. Reflectance calibration of Thematic Mapper data for forest change detection (International Journal of Remote Sensing, 16 (1), 81-96.
- Peiman, R., 2011. Pre-classification and post-classification change-detection techniques to monitor land-cover and land-use change using multi-temporal Landsat imagery: a case study on Pisa Province in Italy. International Journal of Remote Sensing, 32 (15), 4365-4381.
- Pimenta, M.L.F.; Coura, P.H.F.; Cruz, C.B.M.; Lacerda, E.R., 2013. Estudo das incertezas da definição de parâmetros no processo de correção atmosférica. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu, PR. Anais, p. 1915-1922.
- Popper, K., 1975. A Lógica da Pesquisa Científica. São Paulo, EDUSP, 567 p.
- Santos, M., 1986. Por uma geografia nova. Ed. Hucitec, São Paulo, SP. 288 p.
- Schott, J. R.; Salvaggio, C.; Volchok, W. J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. Remote Sensing of Environment, 26, 1-16, 1988.
- Schroeder T.A.; Cohen, W.B.; Song, C.; Canty, M.; Yiang, Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Orego (Remote Sensing of Environment, 103, 16-26, 2006.

- Seabra, S., 2012. Análise Geoecológica dos Remanescentes Florestais de Mata Atlântica do Rio de Janeiro - uma contribuição metodológica para as estratégias de conservação e recuperação. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/16/teses/777886.pdf>. Acesso: 18 jun. 2014.
- Singh, A., 1989. Digital Change Detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (06), 989-1003.
- Soares, P.; Hoffer, R.M., 1997. Detecção de mudanças em plantações de Eucalyptus SPP utilizando imagens Landsat-5. *Revista Ceres*, 44 (253), 346-357.
- Song, C.; Woodcock, C.E.; Seto, K.C.; Lenney, M.P.; Macomber, S.A., 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75, 230-244.
- Steffen, W.; Crutzen, P.J.; McNeill, J.R., 2007. . The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature. *Ambio*, 36, 614-621.
- Telles, R.C.M.; Antunes, R.M.; Teixeira, A.A.; Cruz, C.B.M.; Barros, R.S., 2013. Análise da exatidão geométrica e do potencial de interpretação de imagens orbitais: estudo do caso da vegetação na escala 1:100.000, Silva Jardim, RJ. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Foz do Iguaçu, PR. INPE, 2120-2125.
- Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B.L., 2011. . Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 20260-20264.
- Turner, B.L., Meyer, W.B., 1994. . Global Land-Use/Land-Cover Change: Towards an Integrated Study. *Ambio*, 23(1), 91-95.
- Weckmüller, R., 2018. Trajetórias evolutivas das coberturas florestais do estado do Rio de Janeiro utilizando os algoritmos LandTrendr. Disponível em: <https://goo.gl/9KuJnK>. Acesso: 30 mar. 2018.
- Weckmüller, R.; Slovinski, N.C.; Vicens, R.S., 2013. Análise multitemporal como subsídio à identificação da trajetória evolutiva do uso e cobertura da terra no Corredor Ecológico do Muriqui/RJ. *Revista Brasileira de Cartografia*, 65 (03), p. 467-477.
- Weckmüller, R.; Vicens, R.S., 2013. Análise temporal da cobertura da terra do município de Petrópolis/RJ numa abordagem pós-classificação de detecção de mudanças. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 06 (03), p. 456-469.
- Weckmüller, R.; Vicens, R.S., 2016. Método híbrido de detecção de mudanças: uma associação entre classificação baseada em objetos e baseada em pixels. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68 (05), p. 883-899.
- Weismiller, R. A., Kristof, S. J., Scholz, D. K., Anuta, P.E., Momin, S. A., 1977. Change detection in coastal zone environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43, 1533-1539.
- Wolter, J.A., 1975. Cartography: an Emerging Discipline. *The Canadian Cartographer*, 12 (2), 210-216.
- Zhou, W., Troy, A.; Grove, M., 2008. Object-based land cover classification and change analysis in the Baltimore metropolitan area using multitemporal high resolution remote sensing data. *Sensors*, 8, 1613-1636.
- Zullo, J., 1994. Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações. 1994. PPGEE, Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/260461>. Acesso: 12 mar. 2017.