

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS – UniEVANGÉLICA  
PROGRAMA DE MESTRADO EM SOCIEDADE TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE

NATASHA SOPHIE PEREIRA

**NOVOS FORMATOS DE DADOS E ALGORITMOS PARA SUPORTE À IMAGENS  
MULTI-DIMENSIONAIS**

Anápolis - GO

2014



NATASHA SOPHIE PEREIRA

**NOVOS FORMATOS DE DADOS E ALGORITMOS PARA SUPORTE À IMAGENS  
MULTI-DIMENSIONAIS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente (PPSTMA) do Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

**Prof. Orientador:** Dr. Nilton Correia da Silva

Anápolis - GO

2014



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS – UniEVANGÉLICA  
PROGRAMA DE MESTRADO EM SOCIEDADE TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE

**NOVOS FORMATOS DE DADOS E ALGORITMOS PARA SUPORTE À IMAGENS  
MULTI-DIMENSIONAIS**

Natasha Sophie Pereira

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente (PPSTMA) do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovado por:

---

Prof. Dr. Nilton Correia da Silva – Orientador

---

Prof. Dr. Clarimar José Coelho – Anápolis – PPSTMA/UniEVANGÉLICA

---

Prof. Dr. Osmar Abílio Carvalho Júnior – Brasília – LSIE/UnB

---

Prof. Dr. Fabricio Ataides Braz – Brasília – FGA/UnB

---

Prof. Dr. Ricardo Luiz Machado – Anápolis – PPSTMA/UniEVANGÉLICA  
(Suplente)

Anápolis  
2014



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos aqueles que me ajudaram no decorrer deste curso, direta ou indiretamente, em especial ao professor e orientador Nilton Correia da Silva, que tanto me apoiou na elaboração deste projeto, aos demais professores, a quem eu devo todo o vasto conhecimento adquirido durante o curso, e aos meus amigos Juan Paquier Sala e Omar Rodrigo Ribeiro e Silva, que sempre me apoiaram e me ajudaram neste período, independente da situação.

Aos demais docentes que diretamente me auxiliaram incentivando e apoiando das mais diversas formas, em especial professores Sandro Dutra e Silva, Giovana Galvão Tavares, Clarimar José Coelho, Francisco Itami Campos, Ricardo Luiz Machado do PPSTMA – UniEVANGÉLICA e professor Osmar Abílio Carvalho Júnior (LSIE – UnB).

Também a toda minha família, em especial minha avó Railda Santos Pereira, que foi quem mais me incentivou e apoiou nesta caminhada, a todos os demais familiares, sem os quais eu não conseguiria ter chegado ao patamar em que cheguei e aos meus amigos e colegas, que tanto me socorreram nos momentos mais difíceis.

A todas essas pessoas tenho a honra de entregar esta dissertação que marca a conclusão com êxito de mais uma fase em minha vida.





## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, único Senhor e Salvador da minha vida, que me deu força e ânimo para prosseguir com este curso mesmo nas horas mais difíceis.

Agradeço a todos aqueles que me deram suporte e incentivo ao longo destes dois anos de dificuldades e vitórias:

- Ao meu orientador, prof. Nilton Correia da Silva, por todas as horas de paciência dispendidas a mim, em intermináveis orientações, sempre preenchendo as lacunas em meu aprendizado com conceitos novos e concisos. Que sempre me apoiou e incentivou a traçar este caminho, sem seu apoio certamente não seria possível. Meu agradecimento especial por me fazer crescer como pessoa e profissional, me auxiliando a trilhar um caminho de sucesso. Hoje, posso chama-lo não apenas de professor, mas de amigo.

- Aos professores, que sempre souberam como me provar e cobrar de forma que pudesse sempre estar crescendo, não apenas em sua disciplina, mas no curso como um todo e principalmente na vida, pessoal e profissional. Que sempre estiveram abertos a sugestões e sempre sugeriram melhorias, levando-me a trilhar o caminho do aprendizado como opção e não como obrigação.

- Aos colegas de turma, com quem pude contar sempre, que me ensinaram com ações e palavras, aos quais aprendi a amar como se fossem minha família, cada um tem parte colaborativa neste projeto, e também em minha vida e na formação de meu caráter, dos quais sempre guardarei boas lembranças.

- À minha família, que sempre me apoiou, nos momentos de desespero por medo do desafio que estava à frente, sendo sempre aqueles com quem eu tinha certeza que poderia contar, que muitas vezes sem entender nada do que se passava em minha cabeça, ou computador, ainda me compreenderam nos momentos de crise, e continuaram me amando e acolhendo. Eles partilharam também dos momentos felizes que, nestes dois anos, não foram poucos, sempre alcançando os objetivos que tracei. Sem eles, eu não seria nada!

- Aos meus amigos “extracurriculares”, que aguentaram as negações aos seus convites para sair, dias enclausurada e isolada, momentos de raiva e estresse, e mesmo assim, insistiram na amizade. Sempre estavam ali quando eu ficava lamentando “a parte que não funcionou”, me ajudando, muitas vezes sem saber, a resolver o problema. Também estiveram comigo na hora de ver “uma parte simples que funcionou”, mas que eu queria exibir e

comentar incessantemente tal era minha euforia. Fazem parte da minha história, isso é imutável, e primo muito por essas amizades.

- Aos amigos Juan Sala Paquier e Omar Rodrigo Ribeiro e Silva, com eles aprendi que o altruísmo é o menor caminho para adquirir amizades sinceras. Seria impossível a realização deste curso e projeto por inteiro sem sua ajuda. Sou eternamente grata e sinceramente amiga de cada um.

- A meus alunos, pela paciência e compreensão em momentos de desespero e tempo escasso, que sempre me apoiaram e incentivaram. A cada um meu obrigada, sempre estarão dentro do meu coração.

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) por financiar minha bolsa (Chamada Pública Nº1/2012 - Bolsas de Formação de Mestrado e Doutorado), permitindo, assim, a realização de meu mestrado.

- Ao CNPq (PIBIT) e à FUNADESP (PBIC) por financiarem dois alunos em um projeto de iniciação Científica (2012/2013) o que possibilitou o desenvolvimento de artefatos de software auxiliares à minha pesquisa.

- Ao Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia (GEA) da Universidade de Brasília (UnB), na pessoa do prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior, que gentilmente cedeu as imagens necessárias para testes no protótipo desenvolvido.

- Ao Laboratório de Pesquisas Avançadas e Geoprocessamento (LaPAGEo) do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente (PPSTMA) do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA), na pessoa do prof. Dr. Sandro Dutra e Silva, que gentilmente cedeu o espaço físico e Hardware necessário para desenvolvimento de parte da pesquisa.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

Madre Teresa de Calcutá



## RESUMO

Os recursos naturais e o meio ambiente terrestre estão sempre sofrendo mudanças, hora pela evolução natural, hora pelas atividades humanas sobre eles. O complexo inter-relacionamento dos fenômenos causadores dessas mudanças deve ser compreendido através da observação de “uma grande gama de escalas temporais e espaciais”. A maneira mais efetiva e econômica de coletar os dados necessários para monitorar tais fenômenos é a observação da terra pelos satélites (SAUSEN, 2012).

O tempo é contínuo por natureza, porém, para ser representado computacionalmente, é necessário que seja feita uma abordagem discreta onde a variação temporal pode ser representada por uma linha de tempo especificada de acordo com a frequência desejada (DIAS; CÂMARA; DAVIS JR., 2005). Como apresenta Sausen (2012), para ser capaz de compreender as alterações que o meio ambiente terrestre e os recursos naturais sofrem, é necessário analisar não apenas um este ambiente em um tempo e espaço, mas sim, multiplicar essas grandezas.

É proposta uma abordagem onde seja possível analisar uma imagem com  $k$ -bandas, em  $n$ -tempos simultaneamente, de modo que a imagem digital comum, tridimensional (linhas, colunas e bandas), passe a ser analisada levando-se em consideração a dimensão tempo, passando essa, então, a ser quadridimensional (linhas, colunas, bandas e tempos).

A aplicação deste estudo é inúmera, partindo desde o simples reconhecimento de concentração de vegetação em uma determinada área, até a estimativa de alterações futuras, baseando-se no Gráfico padrão de mudanças sofridas anteriormente naquela região. Possibilita-se através do estudo multitemporal de uma região, o reconhecimento de padrões de alteração no uso do solo, e como este uso evoluiu com o passar do tempo.

**Palavras Chave:** Geoprocessamento; Imagem Digital; Cubo Quadridimensional; Imagem Multi-Temporal; Multi-Ponteiros.



## ABSTRACT

Natural resources and the earth's environment are always undergoing changes, hour by natural evolution, hour by human activities on them. The interrelationship of complex phenomena causing these changes must be understood by observing "a broad range of temporal and spatial scales". The most effective and economical way to collect the data needed to monitor such phenomena is the observation of the Earth by satellites (SAUSEN, 2012).

Time is continuous in nature, however, to be computationally represented, a discrete approach is necessary, through which the temporal variation can be represented by a timeline specified according to the desired frequency (DIAS; CÂMARA; DAVIS JR., 2005). As Sausen (2012) presents, in order to be able to understand the changes that the earth's environment and natural resources suffer, one must consider not only this one setting at a time and place, but multiplying these quantities.

This treatise proposes an approach where it is possible to analyze an image with  $k$ -bands in  $n$ -times simultaneously, so that the common digital image, three-dimensional (lines, samples and bands), would then be analyzed taking into consideration the time dimension, becoming, then, four-dimensional (lines, samples, bands and times).

The application of this study is innumerable, starting from the simple recognition of vegetation concentration on a given area, to estimation of future changes, based on the pattern chart of changes previously incurred in that region. Through the multi-temporal study of a region, it is hence possible to recognize patterns of change in land use, and how the latter has evolved over time.

**Keywords:** Geoprocessing; Digital Image; Four-Dimensional Cube; Multi-Temporal Image; Multi-Pointers.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sin-classificação e detecção de mudanças temporais. ....	30
Figura 2 – Evolução temporal do uso em 8 tempos. ....	31
Figura 3 – Classificação de Imagens de cobertura do solo em 3 tempos. ....	32
Figura 4 – Mapas de Uso e Cobertura do Solo em 2 tempos. ....	32
Figura 5 – Cubo Temporal NDVI entre 2000 e 2007. ....	33
Figura 6 – Obtenção de Imagens por sensoriamento remoto. ....	37
Figura 7 – Espectro Eletromagnético. ....	38
Figura 8 – Curva Espectral da vegetação, da água e do solo. ....	41
Figura 9 – Assinatura espectral de um alvo em uma imagem. ....	42
Figura 10 – Bandas Temáticas do satélite Landsat. ....	44
Figura 11 – Processos de Formação das Cores. ....	45
Figura 12 – Imagem colorida nos canais 3, 4 e 5 do sensor ETM <sup>+</sup> (Landsat-7). ....	47
Figura 13 – Esquema de obtenção de uma imagem colorida. ....	48
Figura 14 – Formato de Dados BSQ, BIL e BIP. ....	50
Figura 15 – Imagem matricial em níveis de cinza. ....	52
Figura 16 – Novos Formatos de Dados TBSQ, TBIL e TBIP. ....	60
Figura 17 – Protótipo: Montagem Cubo 4D. ....	61
Figura 18 – Protótipo: Selecionando Entrada para Montagem do Cubo 4D. ....	62
Figura 19 – Montagem do Cubo 4D a partir de uma Imagem Multi-Tempos. ....	62
Figura 20 – Montagem do Cubo 4D a partir de uma Imagem Multi-Bandas. ....	63
Figura 21 – Coleta de Espectro-Temporal utilizando Multi-Ponteiros. ....	65
Figura 22 – Cubo 4D Carregado. ....	66
Figura 23 – Gráfico do Espectro-Temporal. ....	67
Figura 24 – Performance de Criação do Cubo 4D Multi-Bandas ....	71
Figura 25 – Performance de Criação do Cubo 4D Multi-Tempos ....	71
Figura 26 – Performance de Carregamento do Cubo 4D. ....	76
Figura 27 – Performance de Coleta da Assinatura Espectro-Temporal. ....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das Bandas TM do satélite Landsat-5. ....	40
Tabela 2 – Resolução Espacial e Espectral do TM-Landsat-5. ....	41
Tabela 3 – Processos de Formação de Cores.....	46
Tabela 4 – Composições Coloridas mais Comuns. ....	54
Tabela 5 – Cortes de Imagens para Teste. ....	69
Tabela 6 – Ganho de Performance na Criação do Cubo 4D.....	73
Tabela 7 – Ganho de Performance no Carregamento do Cubo 4D. ....	78
Tabela 8 – Ganho de Performance na Coleta da Assinatura Espectro-Temporal. ....	82



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões; tridimensional
ABILIO	Software para processamento Digital de Imagens de Sensores Remotos em Desenvolvimento pelo Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia (GEA) da Universidade de Brasília (UnB), ainda não disponível para utilização do público.
ALI	Sigla em inglês de <i>Advanced Land Imaging</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
ASTER	Sigla em inglês de <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
AVHRR	Sigla em inglês de <i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
AVIRIS	Sigla em inglês para <i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
B	<i>Blue</i> – Azul. Cor que compõe o conjunto de cores RGB.
BIL	Sigla em inglês de <i>Band Interleaved by Lines</i> (Banda Intercalada por Linhas)
BIP	Sigla em inglês de <i>Band Interleaved by Pixel</i> (Banda Intercalada por Pixels)
BIS	Sigla em inglês de <i>Band Interleaved by Sample</i> (Banda Intercalada por Colunas)
BSQ	Sigla em inglês de <i>Band SeQuential</i> (Banda em SeQuência)
C	<i>Cyan</i> – Ciano. Cor que compõe o conjunto de cores CMY.
CIR	Cor <i>Infravermelho</i>
DN	Sigla em inglês de <i>Digital Number</i> (Valores Digitais)
ENVI	Sigla em inglês de <i>Environment for Visualizing Images</i> (Ambiente

para Visualização de Imagens).

eq.	Equação
ERDAS	Software projetado especificamente para extração de informações a partir de imagens digitais.
ETM+	Sigla em inglês de <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> (Mapeador Temático Aprimorado)
FAPEG	Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Goiás.
G	<i>Green</i> – Verde. Cor que compõe o conjunto de cores RGB.
GB	Gigabyte
GEA	Departamento de Geografia da Universidade de Brasília
GL	Sigla em inglês para <i>Grey Level</i> (Níveis de Cinza)
HD	Sigla em inglês de <i>Hard Drive</i> (Disco Rígido)
Hyperion	Sensor remoto para captação de imagens digitais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IR	Sigla em inglês para <i>Infrared</i> (Infravermelho)
IVM	Infravermelho Médio
IVP	Infravermelho Próximo
IVT	Infravermelho Termal
LSIE	Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais
LUT	Sigla em inglês de <i>Look-Up Tables</i> (Tabelas de Escalas de Cinza)
M	<i>Magenta</i> – Magenta. Cor que compõe o conjunto de cores CMY.
MODIS	Sigla em inglês de <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
MSS	Sigla em inglês de <i>mobile Satellite Services</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
NASA	Sigla em inglês de <i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço).

NDVI	Sigla em inglês de <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.
PDI	Processamento Digital de Imagens
PPSTMA	Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA
R	<i>Red</i> – Vermelho. Cor que compõe o conjunto de cores RGB.
RGB	Sigla em inglês de <i>Red-Green-Blue</i> (Vermelho-Verde-Azul)
SSD	Sigla em inglês de <i>Solid-State Drive</i> (Unidade de Disco Sólida)
TB	Terabyte
TBIL	Sigla em inglês de <i>Time and Band Interleaved by Lines</i> (Tempos e Bandas Intercalados por Linhas)
TBIP	Sigla em inglês de <i>Time and Band Interleaved by Pixel</i> (Tempos e Bandas Intercalados por Colunas)
TBSQ	Sigla em inglês de <i>Time and Band SeQuential</i> (Tempos e Bandas em SeQuência)
TM	Sigla em inglês de <i>Thematic Mapper</i> (Mapeador Temático)
UnB	Universidade de Brasília
UniEVANGÉLICA	Centro Universitário de Anápolis
SPOT	Sigla em francês de <i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i> , sensor remoto para captação de imagens digitais
Y	<i>Yellow</i> – Amarelo. Cor que compõe o conjunto de cores CMY.





## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_{IVP}$	Valor da reflectância no Infravermelho Próximo (800-1100 nm)
$\rho_V$	Valor da reflectância na faixa do vermelho (600-700 nm)
Hz	Hertz
$\lambda$	Comprimento de onda
m	Metros
$\mu\text{m}$	micrometro
nm	nanômetro
$\gamma$	Raios gama
km	Quilômetros
$f$	Amplitude de qualquer par de coordenadas $(x, y)$ que define uma imagem.
$x$	Coordenada espacial de uma imagem (linhas)
$y$	Coordenada espacial de uma imagem (colunas)
W	Watts
lm	Lumens
$f$	Função de mapeamento de endereço de um pixel em uma imagem do tipo BSQ
$Z$	Conjunto dos números naturais
$l$	Linha onde se encontra o pixel na imagem
$c$	Coluna onde se encontra o pixel na imagem
$b$	Banda onde se encontra o pixel na imagem
$QtL$	Quantidade de linhas da imagem
$QtC$	Quantidade de colunas da imagem
$TP$	Tamanho do pixel da imagem (em bits)
$g$	Função de mapeamento de endereço de um pixel em uma imagem do tipo BIL

$QtB$	Quantidade de bandas da imagem
$h$	Função de mapeamento de endereço de um pixel em uma imagem do tipo BIP ou BIS
$Q$	Quantidade finita de bits utilizada na conversão de dados contínuos para dados binários.
$N_{DN}$	Número de DNs (Valores Digitais) em uma imagem
$DN_{range}$	Intervalo de valores digitais
$GL$	Níveis de Cinza
$LUT_{DN}$	Valor encontrado em uma célula da Tabela de escala de cinza cujo índice é dado por DN.
$GL_{range}$	Intervalo de níveis de cinza
$RGB$	Vetor coluna tridimensional que representa os canais vermelho, verde e azul, respectivamente, em uma tela computacional.
$GL_R$	Nível de cinza a ser reproduzido pelo canal vermelho
$GL_G$	Nível de cinza a ser reproduzido pelo canal verde
$GL_B$	Nível de cinza a ser reproduzido pelo canal azul
$t$	Tempo onde se encontra o pixel na imagem

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DO ESTUDO E DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	29
1.2	PROBLEMA A SER ABORDADO .....	34
1.2.1	<i>Problema Central.....</i>	<i>34</i>
1.2.2	<i>Problemas Norteadores .....</i>	<i>34</i>
1.3	OBJETIVOS A SEREM ATINGIDOS .....	34
1.3.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>34</i>
1.3.2	<i>Objetivos Específicos .....</i>	<i>35</i>
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	35
<b>2.</b>	<b>IMAGENS DE SENSORES REMOTOS E SEU TRATAMENTO.....</b>	<b>37</b>
2.1	SENSORIAMENTO REMOTO .....	37
2.1.1	<i>Obtenção de Imagens.....</i>	<i>39</i>
2.1.2	<i>Bandas Espectrais.....</i>	<i>41</i>
2.2	IMAGEM DIGITAL .....	43
2.2.1	<i>Formato de Dados das Imagens de Sensoriamento Remoto.....</i>	<i>48</i>
2.2.2	<i>Visualização de Imagens Digitais.....</i>	<i>51</i>
2.3	ARMAZENAMENTO E MANIPULAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS .....	55
<b>3.</b>	<b>ARTIGO: MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS MULTI-DIMENSIONAIS.....</b>	<b>57</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	57
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
3.2.1	<i>Novos Formatos de Dados para Imagens de Sensoriamento Remoto .....</i>	<i>58</i>
3.2.2	<i>Espectro Temporal.....</i>	<i>64</i>
3.3	SEÇÃO DE EXPERIMENTOS .....	68
3.3.1	<i>Montagem dos Cubos Temporais quadridimensionais.....</i>	<i>69</i>
3.3.2	<i>Upload do Cubo para Visualização.....</i>	<i>75</i>
3.3.3	<i>Visualização do Spectro Temporal de um pixel.....</i>	<i>79</i>
3.4	CONCLUSÕES.....	83
<b>4.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E INDICAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE 01 – ARTICLE.....</b>	<b>95</b>



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Justificativa do estudo e delimitação do tema**

Os recursos naturais e o meio ambiente terrestre estão sempre sofrendo mudanças, hora pela evolução natural, hora pelas atividades humanas sobre eles. De acordo com Sausen (2012) o complexo inter-relacionamento dos fenômenos causadores dessas mudanças deve ser compreendido através da observação de “uma grande gama de escalas temporais e espaciais” (SAUSEN, 2012). Ela ainda afirma que a maneira mais efetiva e econômica de coletar os dados necessários para monitorar tais fenômenos é a observação da terra pelos satélites.

Os satélites para sensoriamento remoto, lançados em órbita a partir dos anos 1970 (SAUSEN, 2012), proveem imagens digitais da superfície terrestre. Segundo Gonzales e Woods (2010) “uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto.”. Eles afirmam ainda que métodos de processamento de imagens digitais são aplicados principalmente em duas áreas, a “melhora das informações visuais para a interpretação humana” e o processamento de dados de imagens visando a percepção automática através de máquinas.

O processamento de imagens pode ser dividido em 03 (três) etapas, conforme apresentam Gonzalez & Woods (2010):

Pré-processamento, ou processamento de nível baixo: trata da melhoria da imagem, tornando-a mais adequada para o processamento das informações que se pretende obter.

Processamento, ou processamento de nível médio (Segmentação, Representação e Descrição): Segmentar uma imagem é dividi-la em partes, ou objetos que a constituem. A partir deste processo são gerados dados em forma de pixels que podem representar tanto o contorno da imagem quanto os componentes internos deste contorno, em certos casos, podem representar ambos. Uma vez definida essa representação, busca-se descrever quais dados estão sendo representados, quantificando informações básicas, de forma a discriminar classes de objetos que formam a imagem.

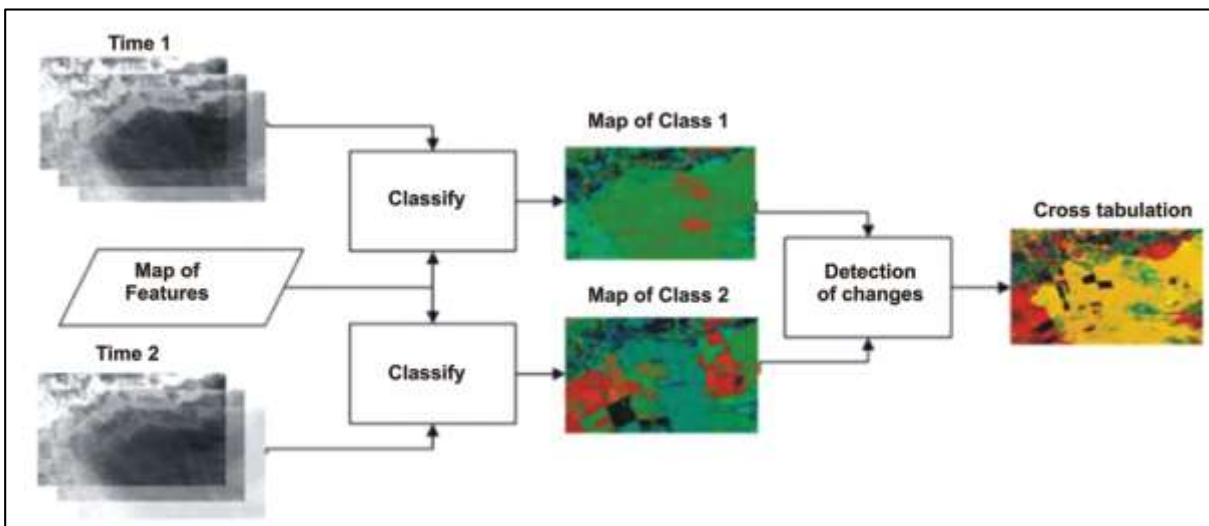
Reconhecimento e Interpretação, ou processamento de nível alto: reconhecimento é o processo de rotulação dos objetos a partir das informações fornecidas por seu descritor e a Interpretação, trata de atribuir significado a um conjunto de objetos reconhecido.

No caso do sensoriamento remoto da superfície terrestre, a aquisição das imagens é feita através de satélites, por empresas privadas (como o Google) ou governamentais (como o INPE). Durante a aquisição de uma imagem digital através do sensoriamento remoto da superfície terrestre, ela está sujeita a diversas condições distintas de atmosfera e iluminação (TEIXEIRA, 2008). O processo de correção de uma imagem é feito de forma computadorizada, por programas como o ENVI<sup>1</sup> (*Environment for Visualizing Images*), o ERDAS IMAGINE<sup>2</sup> e o ABILIO<sup>3</sup>.

O trabalho proposto tem o enfoque voltado para as segunda e terceira fases do processamento digital de imagem, ou seja, a fase de processamento (Segmentação, Representação e Descrição) e a fase de Reconhecimento e Interpretação das imagens.

O tempo é contínuo por natureza, porém, para ser representado computacionalmente, é necessário que seja feita uma abordagem discreta onde a variação temporal pode ser representada por uma linha de tempo especificada de acordo com a frequência desejada (DIAS; CÂMARA; DAVIS JR., 2005). Como apresenta Sausen (2012), para ser capaz de compreender as alterações que o meio ambiente terrestre e os recursos naturais sofrem, é necessário analisar não apenas este ambiente em um tempo e espaço, mas sim, multiplicar essas grandezas. Dessa forma, a literatura traz inúmeros artigos que buscam analisar os fenômenos ocorridos em um espaço monitorado por satélites artificiais em  $n$  tempos distintos.

**Figura 1** – Sin-classificação e detecção de mudanças temporais.



Fonte: SILVA et al., 2012

<sup>1</sup> [http://www.exelisvis.com/docs/using\\_envi\\_Home.html](http://www.exelisvis.com/docs/using_envi_Home.html)

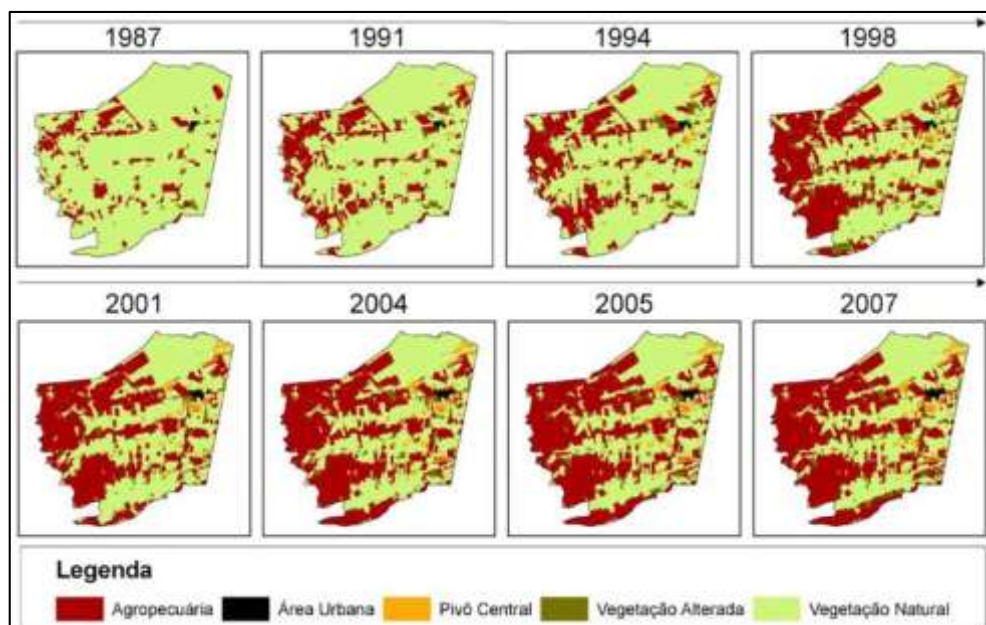
<sup>2</sup> <http://www.hexagongeospatial.com/products/remote-sensing/erdas-imagene/overview>

<sup>3</sup> Software para processamento Digital de Imagens de Sensores Remotos em Desenvolvimento pelo Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia (GEA) da Universidade de Brasília (UnB), ainda não disponível para utilização do público.

Alguns pesquisadores buscam inovar, trazendo em seus artigos novas tecnologias e técnicas para a análise das alterações ocorridas ao longo do tempo em uma área de estudo, como pode ser observado nos artigos “*A New Approach to Change Vector Analysis Using Distance and Similarity Measures*” (CARVALHO JÚNIOR et al., 2011), “*Detecção de Mudança Espectral uma nova metodologia para análise de séries temporais*” (CARVALHO JÚNIOR; SILVA, 2007) e “*Change Detection Software Using Self-Organizing Feature Maps*” (SILVA et al., 2012), que apresentam novas técnicas para analisar as mudanças ocorridas em uma determinada área observando uma imagem em um tempo inicial e uma segunda imagem, captada em um tempo posterior à primeira. Um exemplo de análise de mudanças *bi*-temporais encontrada no artigo de Silva (2012) é apresentado na Figura 1.

Também é possível encontrar autores que buscam analisar as alterações de uso do solo através da classificação de imagens em tempos distintos e posterior detecção de mudanças entre elas. Neste caso, podem ser aplicadas diversas técnicas de acordo com os objetivos levantados pelo pesquisador e também, de acordo com o objeto de estudo em questão. Alguns artigos trazem estudos que verificam a alteração de uso agrícola da terra comparando 8 (oito) tempos para chegar a um resultado satisfatório (MENKE et al., 2009). Para outros estudos, a avaliação multitemporal através da análise de 5 (cinco) tempos (CARVALHO JÚNIOR et al., 2005; GOMES et al., 2011) ou 4 (quatro) tempos (COUTO; SOUZA FILHO; HAYAKAWA, 2011; OLIVEIRA, 2013) é suficiente. A Figura 2 traz o exemplo de evolução temporal em 8 tempos apresentado por Menke (2009) em seu artigo.

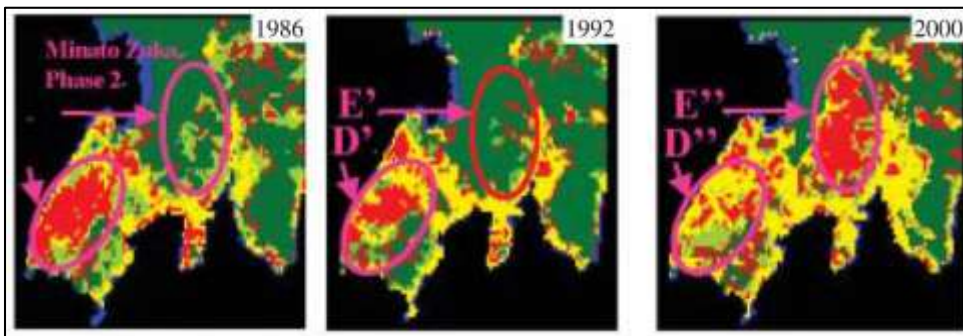
**Figura 2** – Evolução temporal do uso em 8 tempos.



Fonte: MENKE et al., 2009

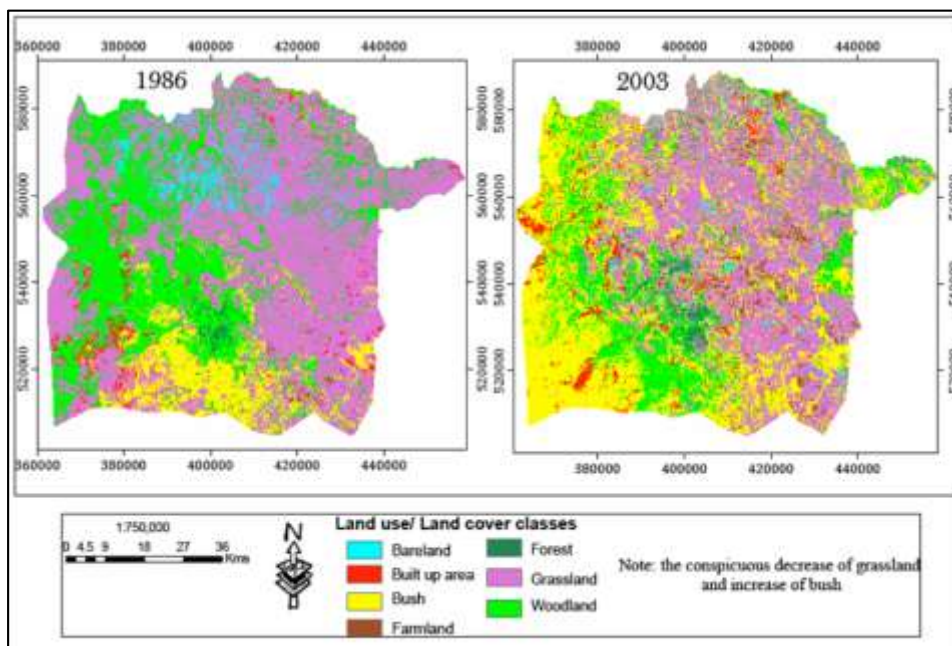
Porém, o mais comum, é o estudo através da análise de 3 (três) tempos (CARVALHO et al., 2002; IOANNIS; MILIADIS, 2011; KAMPEL; AMARAL; SOARES, 2005; LORENA; SANTOS; SHIMABUKURO, 2004; LORENA et al., 2001; SCHEER; ROCHA, 2006; SHAIKH; GOTOH; TACHIIRI, 2005) e, principalmente, 2 (dois) tempos (CARREIRA et al., 2012; DIEDRICH; NARVAES, 2013; GURMESSA; NEMOMISSA; TADESSE, 2013; MATA et al., 2007; MOREIRA; ADAMI; RUDORFF, 2004; VAN DE VOORDE; DEMARCHI; CANTERS, 2009; VIEIRA; BIONDI, 2008; ZHOU; TROY; GROVE, 2008). A Figura 3 apresenta um exemplo de classificação de imagens utilizando 3 tempos, enquanto a Figura 4 apresenta um exemplo de mapa de estudo da cobertura do solo em 2 tempos.

**Figura 3** – Classificação de Imagens de cobertura do solo em 3 tempos.



Fonte: SHAIKH; GOTOH; TACHIIRI, 2005

**Figura 4** – Mapas de Uso e Cobertura do Solo em 2 tempos.

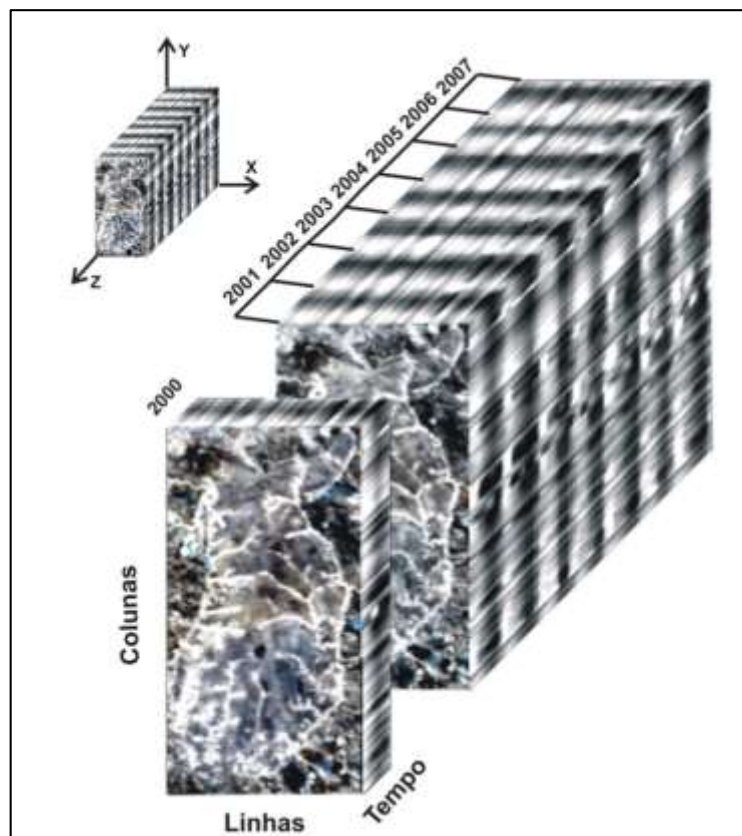


Fonte: GURMESSA; NEMOMISSA; TADESSE, 2013



Os estudos variam de acordo com a necessidade dos pesquisadores e do objeto a ser estudado, mas um ponto é constante, a quantidade de tempos estudada é sempre pequena. Foi percebida, então, a necessidade de se trabalhar com uma quantidade maior de tempos em uma série temporal, a fim de obter dados mais detalhados das mudanças do espaço no decorrer do tempo. Alguns estudos trazem um conceito de tratamento multitemporal inovador, que viabiliza trabalhar  $n$ -tempos de uma mesma região espacial. Porém, este método possui uma limitação, cada banda da imagem deve ser trabalhada de forma separada, com isso, é gerado um cubo de três dimensões (3D) para cada banda (CARVALHO JÚNIOR; HERMUCHE; GUIMARÃES, 2006; CARVALHO JÚNIOR et al., 2008, 2009; COUTO JÚNIOR et al., 2007; SANTANA et al., 2010). Na Figura 5, é apresentado um cubo temporal NDVI<sup>4</sup> entre os anos de 2000 e 2007, onde os eixos X e Y correspondem às coordenadas geográficas, e o Z é referente ao tempo.

**Figura 5** – Cubo Temporal NDVI entre 2000 e 2007.



Fonte: CARVALHO JÚNIOR et al., 2009

<sup>4</sup> NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada): É um dos produtos provenientes do sensor MODIS, que está a bordo do satélite TERRA. O NDVI é sensível à clorofila e é um dos índices de vegetação produzidos pelo MODIS, possuindo a seguinte formulação

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

onde  $\rho_{IVP}$  é o valor da reflectância no Infravermelho Próximo e  $\rho_V$  é a reflectância na faixa do vermelho (SANTANA et al., 2010).

A fim de ampliar a capacidade de análise, propõe-se uma abordagem onde não se faça necessária a separação de bandas, ou a escolha apenas do índice NDVI para estudo temporal em grande escala, mas seja possível analisar uma imagem com  $k$ -bandas, em  $n$ -tempos simultaneamente. Ou seja, ampliando-se o conceito de cubo temporal ao acrescentar a ele a dimensão Bandas.

A aplicabilidade deste estudo é ampla, partindo desde o simples reconhecimento de concentração de vegetação em uma determinada área, até a estimativa de alterações futuras, baseando-se no Gráfico padrão de mudanças sofridas anteriormente naquela região. Possibilita-se através do estudo multitemporal de uma região, o reconhecimento de padrões de alteração no uso do solo, e como este uso evoluiu com o passar do tempo.

O sucesso obtido nos estudos levantados com relação à análise de imagens multitemporais utilizando o cubo temporal 3D incentiva a continuação do estudo de forma a tornar a contribuição deste método ainda maior para a comunidade científica e para a sociedade.

## **1.2 Problema a ser abordado**

### ***1.2.1 Problema Central***

Como desenvolver uma estrutura de dados para tratamento de dados quadridimensionais (linhas, colunas, bandas e tempos) de sensores remotos?

### ***1.2.2 Problemas Norteadores***

- Como ampliar o formato digital clássico de estudo em sensoriamento remoto (tridimensional) acrescentando a ele a dimensão tempo?
- Como desenvolver uma lógica algorítmica para manipular dados quadridimensionais que seja eficiente e eficaz?
- Como visualizar dados quadridimensionais (linhas, colunas, bandas e tempos)?

## **1.3 Objetivos a serem atingidos**

### ***1.3.1 Objetivo Geral***

Contribuir com a área de geoprocessamento no que se refere ao melhoramento de métodos e técnicas que subsidiem as análises de mudanças de uso do solo ao longo do tempo.

### **1.3.2 *Objetivos Específicos***

- Propor um formato de dados digitais quadridimensional (linhas, colunas, bandas e tempos).
- Desenvolver algoritmos que sejam eficientes na leitura e gravação de formatos de dados digitais quadridimensionais.
- Desenvolver métodos eficazes para manipulação e tratamento de dados digitais quadridimensionais.
- Buscar formas de visualização de dados digitais quadridimensionais.
- Desenvolver um protótipo com o intuito de testar e comprovar os métodos propostos, utilizando o mesmo para processar imagens digitais quadridimensionais de sensores remotos.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

- Capítulo 01. Introdução

Este capítulo traz a delimitação do tema, juntamente com a justificativa para sua escolha; apresentando, em seguida o problema da pesquisa e objetivos a serem atingidos com a pesquisa.

- Capítulo 02. Referencial Teórico: Imagens de Sensores Remotos e seu Tratamento

Neste capítulo é feita uma breve revisão dos conceitos de sensoriamento remoto, métodos de aquisição de imagens e formação de imagens, apresentando o que são imagens digitais, e como devem ser trabalhadas. Este capítulo deve esclarecer, ainda, como se dá a visualização de imagens de sensores remotos, além de elucidar conceitos de armazenamento e manipulação de imagens digitais.

- Capítulo 03. Artigo: Modelagem de Dados Espaciais Multi-Dimensionais

O terceiro capítulo é apresentado em forma de artigo, que traz detalhes do protótipo desenvolvido durante o projeto, abordando suas particularidades. O artigo proposto ainda contemplará a etapa de análise e discussão dos resultados obtidos através do estudo de imagens de satélites trabalhadas no protótipo desenvolvido como apoio à esta dissertação. Neste capítulo serão apresentados os conceitos de imagens quadri-dimensionais (linhas, colunas, bandas e tempos), além de formas para tratamento, manipulação e visualização deste tipo de dados.

- Capítulo 04. Considerações Finais e Indicação de Trabalhos Futuros

O último capítulo fará um fechamento dos conceitos e metodologias apresentados no decorrer da dissertação, apresentando considerações feitas para cada particularidade do tema e protótipo. Ainda apresentará indicações de trabalhos para continuação dos estudos feitos até o momento sobre a manipulação e visualização de imagens multitemporais de sensores remotos.

## 2. IMAGENS DE SENSORES REMOTOS E SEU TRATAMENTO

Este trabalho baseia-se na necessidade constante de estudo das alterações ocorridas pelo uso do solo de forma eficaz, precisa e contínua. A coleta de imagens digitais do solo por sensores remotos é um conceito muito presente no tema “monitoramento de uso do solo”, porém, para que esse monitoramento seja feito de forma contínua, é necessário que a análise feita exceda os limites de apenas uma imagem, trazendo à tona a necessidade de análise de várias imagens em conjunto. Essa necessidade motivou o estudo que se segue, cujo objetivo é desenvolver mecanismos suficientes para possibilitar a análise das alterações de uso do solo ao longo do tempo.

### 2.1 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento Remoto é uma tecnologia pela qual é possível a aquisição de imagens da superfície terrestre pela captação da energia refletida, ou emitida, por seus objetos. A energia é captada por sensores, que podem estar acoplados em plataformas terrestres, aéreas ou orbitais, ou seja, à distância. Como apresentado na Figura 6, a energia solar incide sobre a superfície da terra e é captada por sensores eletrônicos acoplados em satélites artificiais, onde é convertida em sinais elétricos, que são registrados e transmitidos para estações de recepção na terra, onde são transformados em dados na forma de Gráficos, Tabelas ou imagens (FLORENZANO, 2011).

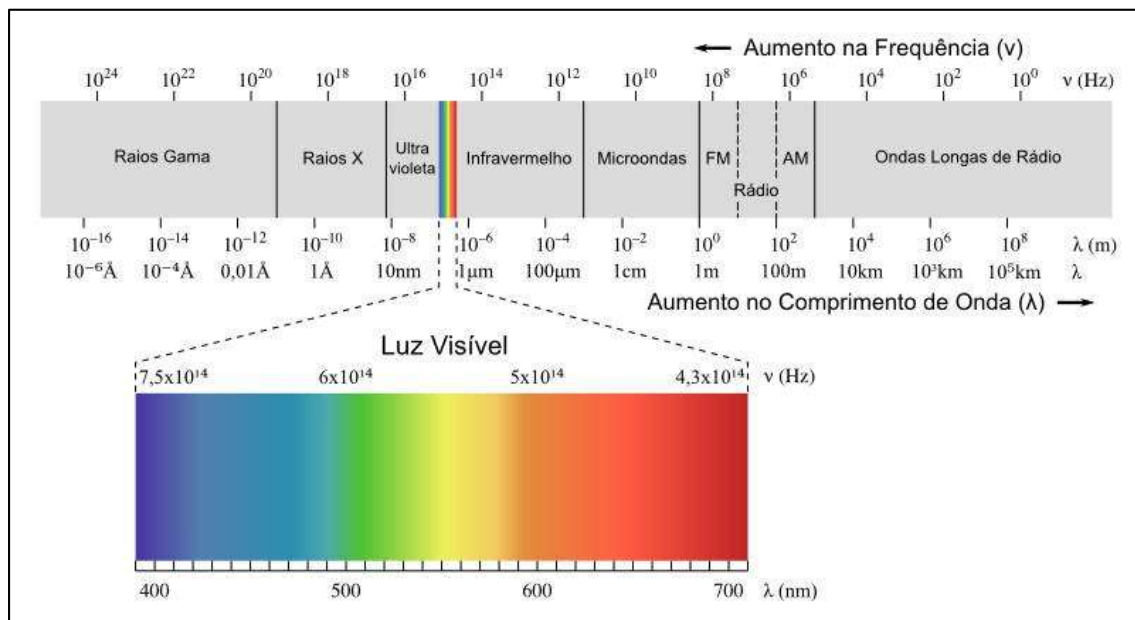
**Figura 6** – Obtenção de Imagens por sensoriamento remoto.



Fonte: Adaptado de FLORENZANO, 2002, p. 9

A radiação eletromagnética é a energia utilizada em sensoriamento remoto. Essa radiação se propaga em forma de ondas eletromagnéticas, sua frequência, ou seja, a quantidade de vezes que a onda se repete por unidade de tempo, é medida em unidades de hertz (Hz), e seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) é medido em metros (m) e seus submúltiplos, como o micrometro ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ ) e o nanômetro ( $1 \text{nm} = 10^{-9}$ ) (FLORENZANO, 2011; GONZALEZ; WOODS, 2010). É possível perceber, na Figura 7, que à medida que a frequência de uma onda aumenta, seu comprimento, ou seja, a distância entre dois picos, diminui. De acordo com Florenzano (2011), a frequência de uma onda é diretamente proporcional à sua velocidade de propagação e inversamente proporcional ao seu comprimento, sendo assim, altas frequências indicam maior intensidade de energia.

**Figura 7** – Espectro Eletromagnético.



Fonte: DAN SCIENTIA, 2010

O espectro eletromagnético, ilustrado pela Figura 7, representa a forma como a radiação eletromagnética é distribuída por regiões de acordo com seu comprimento de onda e sua frequência. Conforme cita Florenzano (2011) e Gonzalez & Woods (2010), o espectro eletromagnético abrange desde comprimentos de ondas curtos, raios gama ( $\gamma$ ), até aqueles com longo comprimento de onda, como o caso das ondas de rádio e TV. A região do visível, descrita na Figura 7 como “Luz Visível”, é àquela onde o olho humano consegue enxergar luz eletromagnética, distinguindo cores desde o violeta até o vermelho. A radiação do infravermelho é subdividida em 3 (três) regiões, o infravermelho próximo (0,7 - 1,3  $\mu\text{m}$ ), o médio (1,3 - 6,0  $\mu\text{m}$ ) e o termal (6,0 - 1000  $\mu\text{m}$ ).

Segundo Florenzano (2011) existem sensores que captam energia referente à diferentes regiões do espectro eletromagnético, e alguns deles podem captar até mesmo dados de mais de uma região, estes são chamados sensores multiespectrais. O sensor multiespectral *Thematic Mapper* (TM), do satélite Landsat-5, capta dados em 7 (sete) faixas do espectro, três na região do visível e quatro na região do infravermelho. De acordo com Gonzalez & Woods (2010), quando um sensor é capaz de captar a energia irradiada por uma banda do espectro, ele cria imagens de eventos nesta banda, para isso, o comprimento da onda que este sensor capta deve ser do mesmo tamanho ou menor que o objeto de estudo, para que este objeto possa ser percebido.

### **2.1.1 Obtenção de Imagens**

O olho humano, que é um sensor natural, enxerga apenas ondas refletidas na faixa do visível, porém, os sensores artificiais permitem a captação de ondas além dessa faixa, que são invisíveis aos olhos humanos (FLORENZANO, 2002). A autora explica que os satélites obtêm imagens em diferentes faixas espectrais, denominadas canais ou bandas, cada faixa espectral capta a um dado comprimento de onda.

Cada sensor pode ser especificado por um conjunto de quatro resoluções que definem o tipo de imagem que ele é capaz de captar. Resolução Espacial é a capacidade do sensor de discriminar objetos em função de seus respectivos tamanhos, sendo assim, cada pixel na imagem, corresponde à um quadrante na terra. Resolução Espectral é a capacidade do sensor de discriminar objetos de acordo com sua sensibilidade espectral, por isso, quanto mais faixas espectrais um sensor é capaz de captar, maior sua resolução espectral. Resolução Radiométrica é a capacidade do sensor discriminar a intensidade da energia refletida/emitida por cada objeto, esta resolução define a quantidade de valores de cinza que o sensor utiliza para representar uma imagem. Resolução Temporal é aquela que determina a frequência de imageamento sobre uma mesma área, ou seja, de quanto em quanto tempo o sensor obtém imagens de uma mesma área na terra (FLORENZANO, 2011).

A fim de exemplificar os conceitos de resolução, Florenzano (2011) traz as dimensões do sensor TM-Landsat-5. Sua Resolução Espacial é de 30m (exceto para a faixa do infravermelho termal, que é de 120m), isso significa que cada pixel da imagem obtida através deste sensor cobre uma região de 30m×30m, e cada imagem cobre uma área de 185km×185km da superfície terrestre em um intervalo de 16 dias (Resolução Temporal). A Resolução Espectral deste sensor é de 7 canais espectrais (três na faixa do visível, um no

infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e um no infravermelho termal). Sua resolução radiométrica é de 256 valores digitais (*Digital Number – DN*), ou seja, pode representar objetos em uma escala de preto, branco e mais 254 tons de cinza entre eles (FLORENZANO, 2011). Para melhor visualização, estas características do sensor TM-Landsat-5 são apresentadas nas Tabela 1 e Tabela 2.

**Tabela 1** – Características das Bandas TM do satélite Landsat-5.

<b>Bandas</b>	<b>Principais características e aplicações da banda</b>
1	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

**Fonte:** Adaptado de INPE, 2013.



**Tabela 2** – Resolução Espacial e Espectral do TM-Landsat-5.

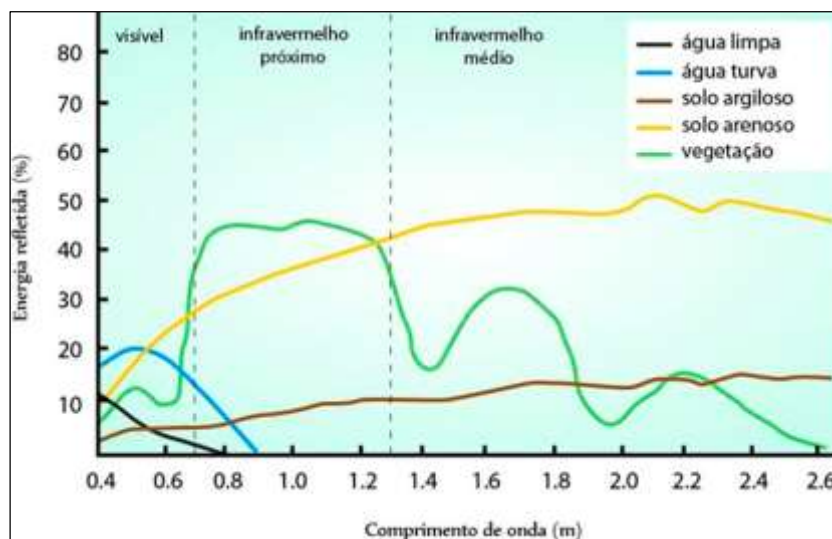
Resolução Espectral		Resolução Espacial
Canais / Bandas	Faixa Espectral	
1	0,45 – 0,52 $\mu\text{m}$ (azul)	30m
2	0,52 – 0,60 $\mu\text{m}$ (verde)	30m
3	0,63 – 0,69 $\mu\text{m}$ (vermelho)	30m
4	0,76 – 0,90 $\mu\text{m}$ (IVP)	30m
5	1,55 – 1,75 $\mu\text{m}$ (IVM)	30m
6	10,42 – 12,50 $\mu\text{m}$ (IVT)	120m
7	2,08 – 2,35 $\mu\text{m}$ (IVM)	30m

IVP - Infravermelho Próximo; IVM - Infravermelho Médio; IVT - Infravermelho Termal

Fonte: Adaptado de FLORENZANO, 2011, p. 57.

### 2.1.2 Bandas Espectrais

Cada objeto presente na superfície terrestre reflete, absorve e transmite a radiação eletromagnética (Figura 7) proporcionalmente em cada comprimento de onda, de acordo com suas propriedades biofísicas e químicas (FLORENZANO, 2011). Essas variações são representadas por curvas, como pode ser observado na Figura 8.

**Figura 8** – Curva Espectral da vegetação, da água e do solo.

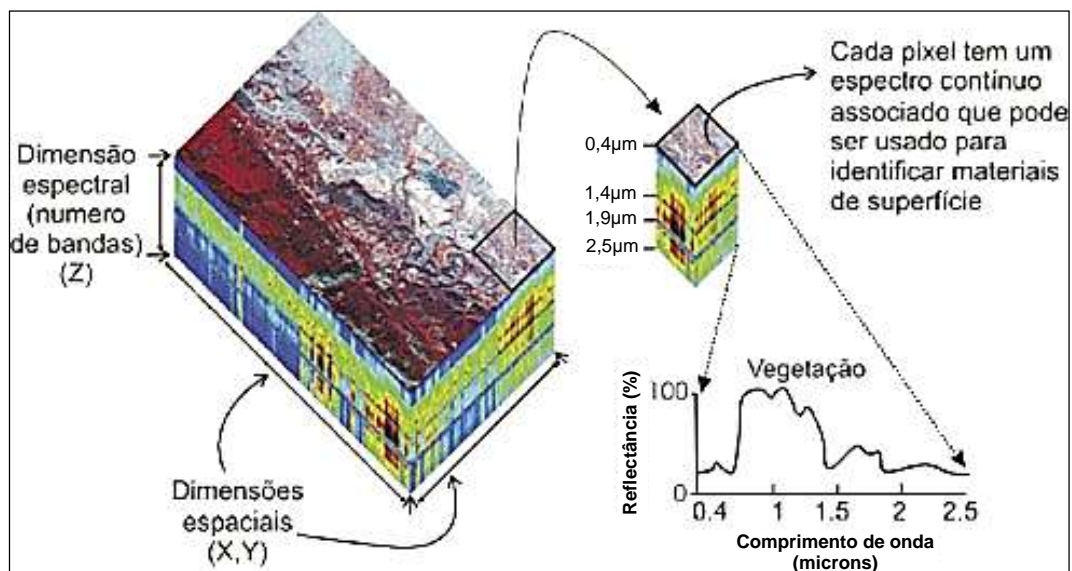
Fonte: Adaptado de FLORENZANO, 2011, p. 14

Alguns fatores interferem na radiação captada pelos sensores, e devem ser levados em consideração ao se analisar uma imagem, como por exemplo, o nível de aquisição de dados, que influi na dimensão da área imageada; o método de aquisição de dados, ou seja, a forma como a radiação é captada e como esta é transformada e processada pelo sensor; as condições intrínsecas ao alvo, suas propriedades biofísicas e químicas; as condições

ambientais no momento da captura da energia; a localização do alvo em relação à fonte e ao sensor, ou seja, a geometria de aquisição dos dados (ângulo de visada, de azimute, etc); e a atmosfera, que pode espalhar a energia a ser captada pelo sensor, influenciando a intensidade da radiação que o sensor registra. Estes fatores influenciam diretamente a captação da energia emitida ou refletida pelo alvo, afetando sua curva espectral (FLORENZANO, 2011).

Em se considerando um satélite, que possui diversas bandas cada qual responsável por captar uma faixa do espectro, é possível obter a assinatura espectral de um alvo através da observação da refletância do alvo naquele canal. Na Figura 9 é possível verificar a formação da assinatura espectral de um alvo com relação às bandas de um satélite.

**Figura 9** – Assinatura espectral de um alvo em uma imagem.



Fonte: Adaptado de MUNDOGEO, 2004

A Figura 9 traz uma imagem coletada por um satélite, onde os eixos X e Y dessa imagem são as dimensões espaciais enquanto o eixo Z representa sua dimensão espectral, ou seja, os níveis de refletância eletromagnética captados por cada banda do satélite. Do lado direito da Figura 9, um pixel da imagem coletada é separado apresentando de forma detalhada os níveis de refletância captados, e logo abaixo do detalhamento do pixel, é apresentada a curva espectral deste pixel, ou seja, uma representação gráfica dos níveis de refletância captados por cada banda do satélite naquele pixel.

É interessante perceber que cada pixel de uma imagem possui uma assinatura espectral particular, é possível encontrar pixels com assinaturas semelhantes ou extremamente distintas.

## 2.2 Imagem Digital

“Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional,

$$f(x, y) \quad (1)$$

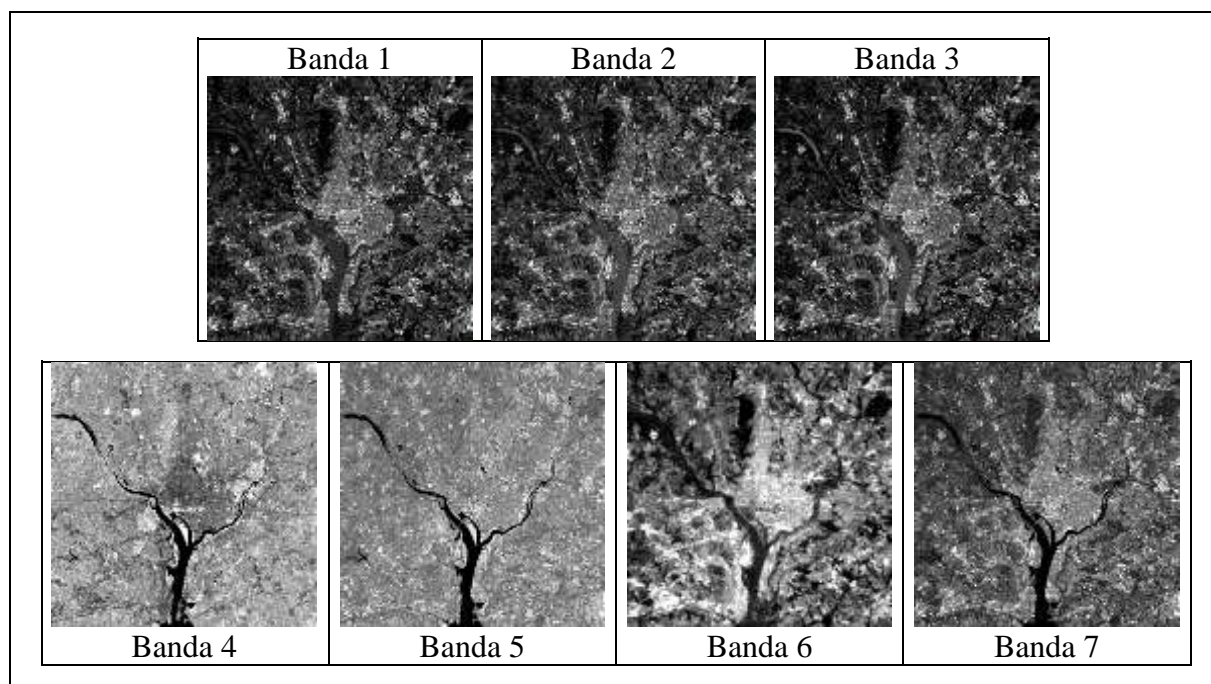
em que  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais (plano) e a amplitude de  $f$  em qualquer par de coordenadas  $(x, y)$  é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem neste ponto.” (GONZALEZ; WOODS, 2010). Ainda segundo os autores, quando valores finitos e discretos são definidos para a intensidade de  $f$  e para os valores de  $x$  e  $y$ , tem-se o que chamam de imagem digital. As imagens são formadas por elementos finitos, que possuem localização  $(x, y)$  e valor específico (nível de cinza), estes elementos são chamados de Pixel. O processamento digital de imagens (PDI) é tido como aquele cujo processamento das imagens digitais é feito por um computador digital (GONZALEZ; WOODS, 2010; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004; MONTABONE, 2010; PETROU; PETROU, 2010).

De acordo com Gonzalez & Woods (2010), “[...] processamento digital de imagens envolve processos cujas entradas e saídas são imagens e, além disso, envolve processos de extração de atributos de imagens até – e inclusive – o reconhecimento de objetos individuais.” (GONZALEZ; WOODS, 2010). Segundo os autores, os processos computacionais voltados para o processamento digital de imagens podem ser divididos em três tipos. Os processos de nível baixo, estão relacionados ao pré-processamento de imagens, que visam reduzir os ruídos, realçar o contraste e melhorar as imagens; sua principal característica é que, tanto a entrada quanto a saída de dados são imagens. Processos de nível médio, são aqueles que trabalham a segmentação das imagens (divisão da imagem em regiões ou objetos), a descrição dos objetos segmentados na imagem, preparando-os para o processamento computacional, e a classificação, ou reconhecimento, dos objetos individualmente; sendo caracterizados pelo fato de que, a entrada de dados é em forma de imagem, porém, a saída são informações extraídas dessas imagens. Já os processos de nível alto são aqueles que envolvem a interpretação de um conjunto de objetos reconhecidos (GONZALEZ; WOODS, 2010; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004; PETROU; PETROU, 2010; SCHOWENGERDT, 2007).

Estas características do PDI permitem que suas ferramentas sejam utilizadas em uma grande variedade de aplicações. Atualmente são utilizadas principalmente para realçar o contraste ou codificar níveis de intensidade em cores, de forma a facilitar a interpretação de imagens utilizadas na indústria, medicina, ciências biológicas, entre outras. Outra aplicação muito utilizada é a resolução de problemas pertinentes à percepção por máquinas, ou seja,

procedimentos para extrair informações de imagens adequadamente para o processamento computacional, sendo que, essas informações geralmente têm pouca semelhança com as características visuais utilizadas por seres humanos na interpretação das imagens. Com a redução de preços e o aumento do desempenho de computadores, e a propagação da internet, o processamento digital de imagens tende a se desenvolver continuamente (GONZALEZ; WOODS, 2010).

**Figura 10** – Bandas Temáticas do satélite Landsat.



Fonte: GONZALEZ; WOODS, 2010, p. 9

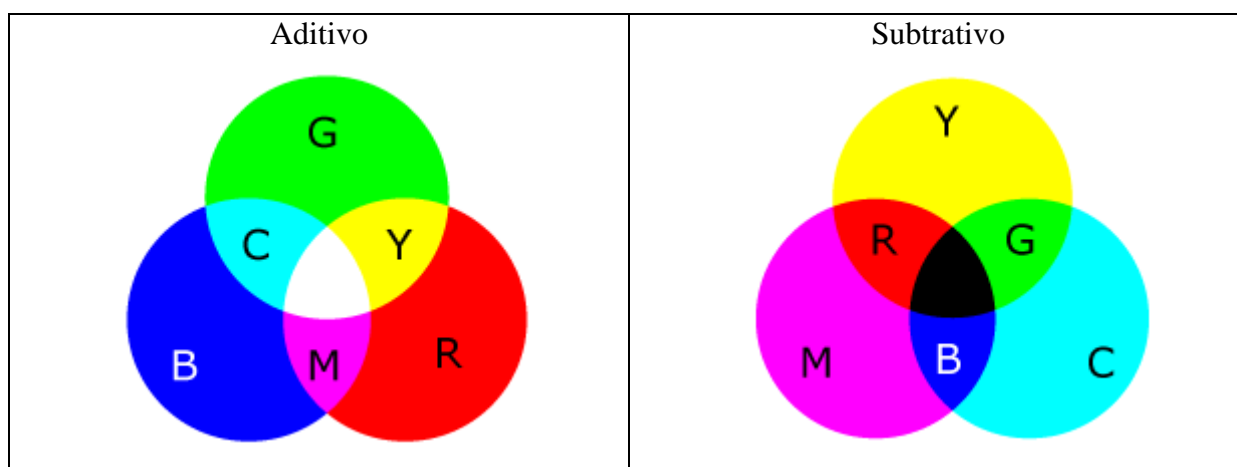
De acordo com Gonzalez & Woods (2010), e como apresentado nas seções anteriores, a faixa do infravermelho costuma ser utilizada em conjunto com a faixa do visível na formação de imagens, e ambas são, geralmente, empregadas em aplicações na microscopia ótica, astronomia, sensoriamento remoto, indústria e policiamento. Segundo os autores, o sensoriamento remoto, área de estudo desta pesquisa, inclui várias bandas nas regiões do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, são as chamadas bandas temáticas. A Figura 10 traz as bandas temáticas do satélite Landsat as características de representação de cada banda podem ser verificadas na Tabela 1.

Gonzalez & Woods (2010) apresentam alguns passos fundamentais em PDI, levando em consideração sua apresentação dos níveis de processamento, eles afirmam que nem todo o processo se aplica a uma imagem. Os principais passos são a aquisição das imagens, que pode envolver seu pré-processamento; o realce de imagens, ou seja, a manipulação de uma imagem

tornando-a mais adequada que a original para uma aplicação específica; o processamento de imagens coloridas; os procedimentos de segmentação que dividem uma imagem em partes, ou objetos, que a constituem; a representação e descrição, que tratam de representação dos elementos contidos em uma imagem e sua descrição, extraindo atributos que resultam em informações de interesse; e o último passo, é o reconhecimento, ou seja, atribuir rótulos aos objetos contidos na imagem, com base em seus descritores.

A variedade de cores que o olho humano percebe na faixa do visível representa uma pequena parcela do espectro eletromagnético. O espectro de cores pode ser dividido em seis grandes regiões: violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho; sendo que cada faixa de cor se mistura gradativamente. A cor que o olho humano percebe em um objeto é determinada pela natureza da luz refletida por este objeto, sendo assim, se um corpo refletir luz de forma equilibrada em todos os comprimentos de onda visíveis, o observador irá identifica-lo como branco, quando o objeto favorece a refletância em uma certa faixa do espectro visível, ele irá exibir alguns tons de cor (FLORENZANO, 2011; GONZALEZ; WOODS, 2010).

**Figura 11** – Processos de Formação das Cores.



Fonte: Adaptado de FLORENZANO, 2011, pp. 29–30

Um tipo especial de luz é a chamada monocromática, ou acromática, tendo como único atributo sua intensidade, que é percebida como variações de preto a tons de cinza até chegar ao branco. Para denotar a intensidade da luz acromática, utiliza-se o termo nível de cinza, e a variedade destes valores em uma imagem, é chamada de escala de cinza. A luz cromática, ou colorida, pode ser descrita por três características, a radiância, normalmente medida em watts (W), refere-se à quantidade de energia emitida pela fonte de luz; a luminância, medida em lumens (lm), refere-se à quantidade de energia que o observador

percebe de uma fonte de luz; e o brilho, que é um descritor subjetivo da percepção da luz, e descreve a sensação das cores (FLORENZANO, 2011; GONZALEZ; WOODS, 2010; MONTABONE, 2010; PETROU; PETROU, 2010).

O de formação de cores processo pode ser aditivo ou subtrativo, a diferença entre eles pode ser percebida na Figura 11 e Tabela 3. “O princípio da fotografia colorida consiste na possibilidade de se reproduzir qualquer cor a partir de uma mistura de apenas três cores primárias: azul [*Blue* – B], verde [*Green* – G] e vermelho [*Red* – R]” (FLORENZANO, 2011).

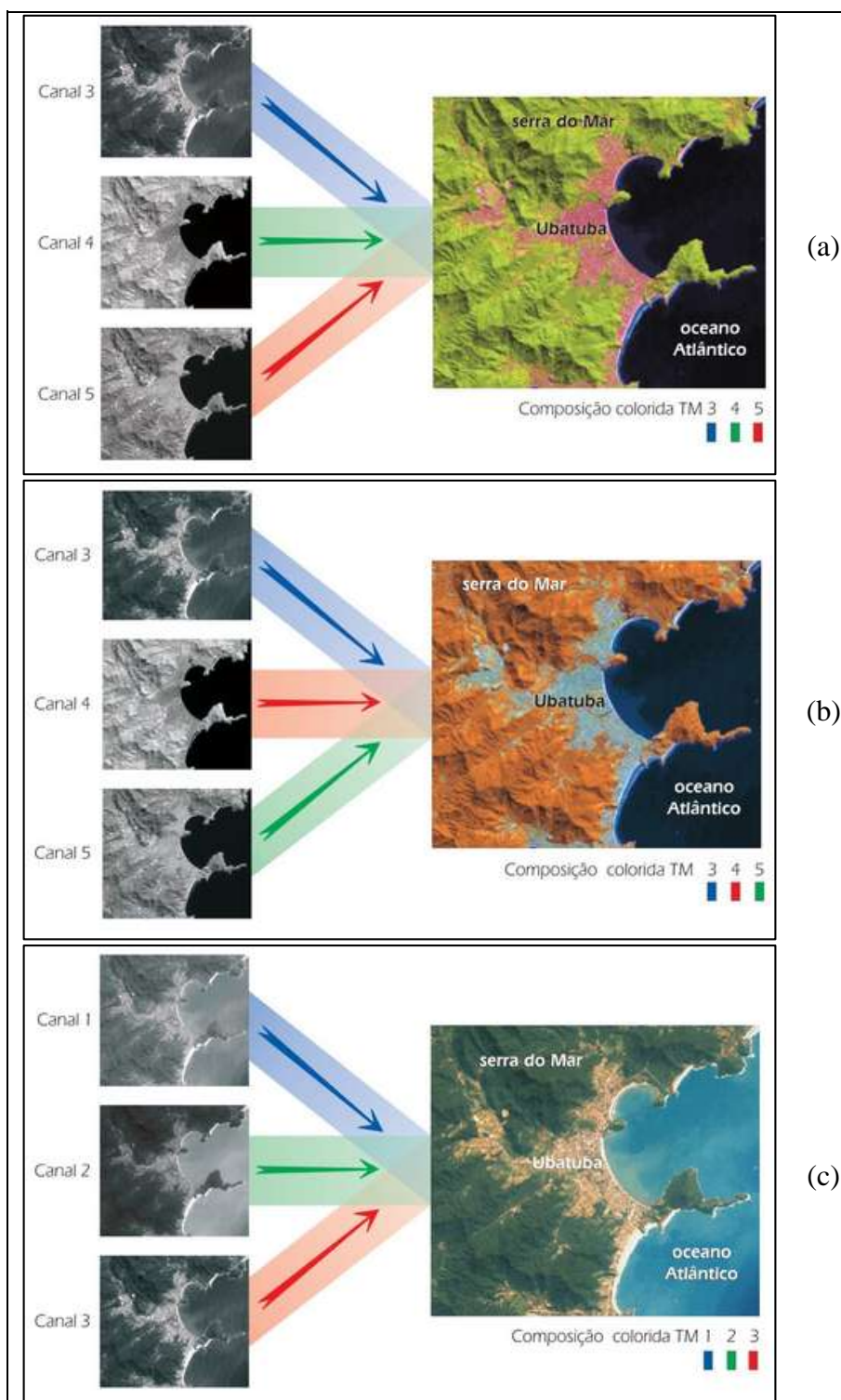
**Tabela 3** – Processos de Formação de Cores.

<b>Processo</b>	<b>Vermelho <i>Red</i> (R)</b>	<b>Verde <i>Green</i> (G)</b>	<b>Azul <i>Blue</i> (B)</b>	<b>Cor Gerada</b>
<b>Aditivo</b>	50%	50%	0%	Amarelo ( <i>Yellow</i> – Y)
	50%	0%	50%	Magenta (M)
	0%	50%	50%	Ciano (C)
	33,3%	33,3%	33,3%	Luz Branca
<b>Processo</b>	<b>Ciano (C)</b>	<b>Magenta (M)</b>	<b>Amarelo <i>Yellow</i> (Y)</b>	<b>Cor Gerada</b>
<b>Subtrativo</b>	50%	50%	0%	Azul ( <i>Blue</i> – B)
	50%	0%	50%	Verde ( <i>Green</i> - G)
	0%	50%	50%	Vermelho ( <i>Red</i> – R)
	33,3%	33,3%	33,3%	Preto

**Fonte:** Adaptado de FLORENZANO, 2011, pp. 29–30

As imagens obtidas através de sensores eletrônicos em diferentes canais, como é o caso dos sensores remotos, são obtidas de forma individual em preto-e-branco, de forma que a quantidade de energia refletida pelos objetos determina sua representação na imagem em diferentes tons de cinza, ao sobrepor estas imagens através de filtros coloridos das cores primárias, obtém-se as imagens coloridas. Em uma imagem colorida, a cor do objeto depende da quantidade de energia refletida por ele em cada faixa do espectro (FLORENZANO, 2011; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004; QIAN, 2013). Ao associarmos uma cor primária a cada faixa do espectro a ser analisada, produz-se uma imagem colorida a partir de 3 (três) bandas espectrais, como exemplificado na Figura 12.

**Figura 12** – Imagem colorida nos canais 3, 4 e 5 do sensor ETM<sup>+</sup> (Landsat-7).

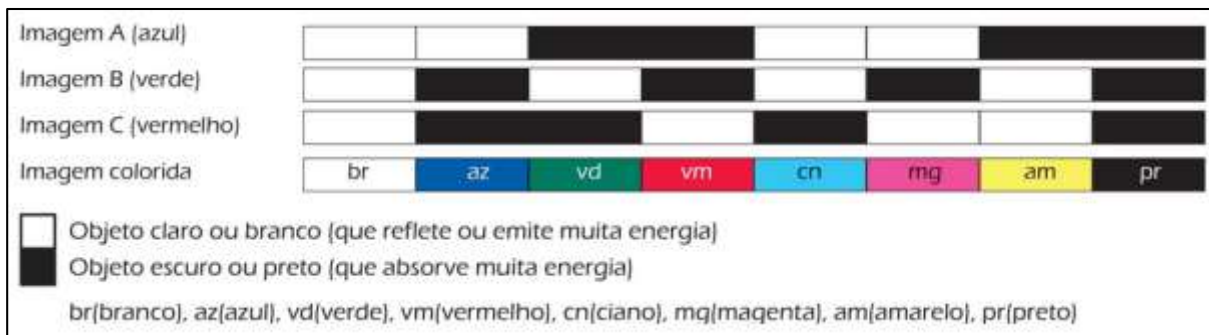


**Fonte:** Adaptado de FLORENZANO, 2011, pp. 38–39

Na Figura 12(a), tem-se os canais 3, 4 e 5 do satélite representados nas cores azul, verde e vermelho, respectivamente; na Figura 12(b), os mesmos canais são representados nas cores azul, vermelho e verde; e na Figura 12(c), os canais 1, 2 e 3 estão nas cores azul, verde e

vermelho. De modo que, a cada nova combinação, uma imagem colorida diferente será gerada (FLORENZANO, 2011). A fim de estudo da imagem, deve-se observar a Tabela 1, que demonstra as propriedades que são melhor enfatizadas por cada faixa espectral, de modo a combinar as bandas espectrais do satélite coerentemente. A partir do processo aditivo das cores, é possível prever qual a cor, na composição colorida, que um determinado objeto poderá assumir, como mostrado na Figura 13 (FLORENZANO, 2011).

**Figura 13** – Esquema de obtenção de uma imagem colorida.



Fonte: Adaptado de FLORENZANO, 2011, p. 43

“Uma imagem digital obtida por sensoriamento remoto é uma representação matricial dos valores que correspondem à intensidade de energia refletida ou emitida pelos objetos da superfície terrestre.” (FLORENZANO, 2011). Sendo assim, cada célula dessa matriz imagem, chamada de pixel, representa uma intensidade de energia e um nível de cinza, e quanto maior o valor do pixel, maior a energia captada, conseqüentemente, mais alto o nível de cinza que ele representa. Ao analisar a escala de cinza, valores altos, com maior energia, tendem ao branco, enquanto valores baixos, menor energia, tendem ao preto. A escala de cinza de uma imagem é definida através da resolução radiométrica do sensor (FLORENZANO, 2011; GONZALEZ; WOODS, 2010; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004; MONTABONE, 2010; PETROU; PETROU, 2010).

### 2.2.1 *Formato de Dados das Imagens de Sensoriamento Remoto*

Imagens com várias bandas são armazenadas em disco ou fita e são representadas por uma combinação entre a dimensão espacial (linhas e colunas) e as bandas. Esse armazenamento pode ser feito em um de três formatos BSQ, BIL ou BIP (JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING, [s.d.]; QIN; CHAO; KIM, 2010; SCHOWENGERDT, 2007).



BSQ (*Band SeQuential* – Banda em SeQuência): Neste tipo de organização os dados espaciais de cada banda completa da imagem são dispostos separadamente em sequência.

BIL (*Band Interleaved by Lines* – Banda Intercalada por Linhas): Os dados das linhas de cada banda são dispostos em ordem, de acordo com a quantidade de bandas, de modo que este processo se repete pela quantidade de linhas da imagem.

BIP (*Band Interleaved by Pixel* – Banda Intercalada por Pixels): Também conhecido como *Band Interleaved by Sample* (BIS – Bandas Intercaladas por Colunas) é um tipo de organização onde um conjunto de dados multi-bandas relativo a cada pixel é disposto de acordo com a quantidade de colunas e linhas da imagem.

Diferentes formatos têm diferentes vantagens em termos de operações de processamento de imagens e análises interativas. Por exemplo, os formatos BIP e BSQ permitem uma performance excelente para acesso espectral e espacial, respectivamente, em dados hiperespectrais, de forma que o formato BSQ é mais rápido para acesso de dados. E o formato BIL dá um equilíbrio de desempenho entre a análise espacial e espectral. Porém, os três tipos de dados são passíveis de conversão entre si (QIN; CHAO; KIM, 2010; SCHOWENGERDT, 2007).

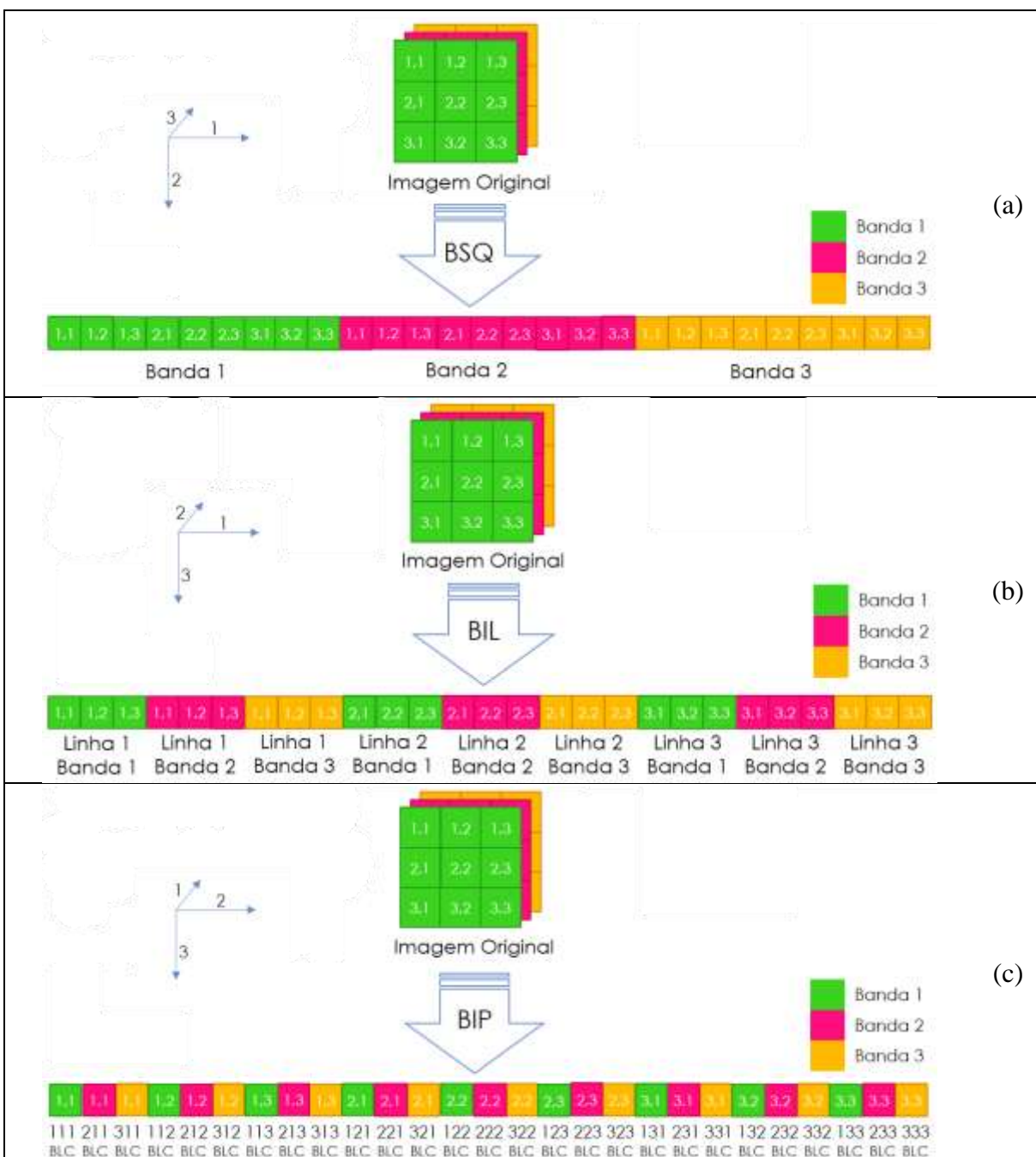
Por exemplo, em um processo de composição colorida, o formato de imagem que teria melhor performance seria o BSQ, pois três bandas inteiras seriam facilmente designadas para R, G e B. Já em um processo de classificação por Máxima Verossimilhança, onde os pixels são solicitados um-a-um pelo classificador, o formato mais indicado de imagem seria o BIP (JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING, [s.d.]).

A Figura 14 exemplifica visualmente como uma imagem com resolução espacial de 3 linhas por 3 colunas e resolução espectral de 3 bandas é armazenada em disco em cada um dos três formatos mais comuns de armazenamento digital BSQ (a), BIL (b) e BIP (c). É possível perceber a sequência de armazenamento dos pixels ao analisar o fluxo disposto nas setas presentes em cada tipo de dado.

Dados armazenados no formato BSQ, Figura 14a, tem todos os pixels de uma linha, em uma banda, armazenados em sequência, em seguida, todos os pixels da próxima linha, e o processo se repete até a finalização da banda em questão, iniciando-se então, na próxima banda, até que toda a imagem seja armazenada. Já dados armazenados no formato BIL, Figura 14b, tem os pixels dispostos de modo que todos os pixels de uma linha, em uma banda, são armazenados em sequência, em seguida, todos os pixels da mesma linha na próxima banda, e

o processo se repete até a última banda da imagem, quando, então todos os pixels da próxima linha da primeira banda serão armazenados, e o processo se repetirá até o final da imagem. Em imagens armazenadas no formato BIP, Figura 14c, o primeiro pixel da primeira linha da primeira banda é armazenado, em seguida, o primeiro pixel da primeira linha da próxima banda, o processo se repete até a última banda, e então o segundo pixel da primeira linha da primeira banda será armazenado e o processo se repete até o final da primeira linha, passando para a segunda linha e assim sucessivamente até o final da imagem.

**Figura 14** – Formato de Dados BSQ, BIL e BIP.



Fonte: O Autor

Conforme verificado na Figura 14, a posição de um pixel localizado neste espaço tridimensional (linha, coluna e banda) varia conforme seu formato de armazenamento. A equação  $f: Z^3 \rightarrow Z$  mapeia o endereço de memória de um pixel qualquer em uma imagem do tipo BSQ armazenada em disco:

$$f(l, c, b) = ((b \cdot QtL \cdot QtC) + (l \cdot QtC) + c) \cdot TP \quad (2)$$

onde:  $l$  = linha do pixel,  $c$  = coluna do pixel,  $b$  = banda do pixel,  $QtL$  = quantidade de linhas da imagem,  $QtC$  = quantidade de colunas da imagem e  $TP$  = Tamanho do pixel em bits.

A equação  $g: Z^3 \rightarrow Z$  mapeia o endereço de memória de um pixel qualquer em uma imagem do tipo BIL armazenada em disco:

$$g(l, c, b) = ((b \cdot QtC) + (c \cdot b \cdot QtC) + c) \cdot TP \quad (3)$$

onde:  $l$  = linha do pixel,  $c$  = coluna do pixel,  $b$  = banda do pixel,  $QtC$  = quantidade de colunas da imagem,  $QtB$  = quantidade de bandas da imagem e  $TP$  = Tamanho do pixel em bits.

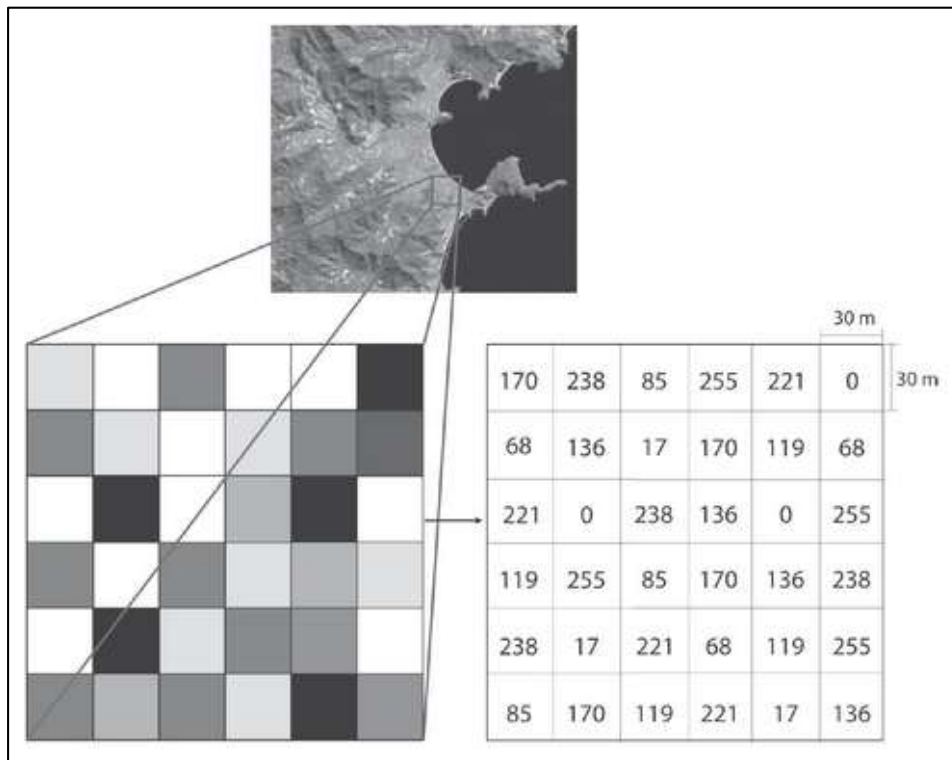
A equação  $h: Z^3 \rightarrow Z$  mapeia o endereço de memória de um pixel qualquer em uma imagem do tipo BIP armazenada em disco:

$$h(l, c, b) = ((l \cdot QtB \cdot QtC) + (c \cdot QtB) + b) \cdot TP \quad (4)$$

onde:  $l$  = linha do pixel,  $c$  = coluna do pixel,  $b$  = banda do pixel,  $QtC$  = quantidade de colunas da imagem,  $QtB$  = quantidade de bandas da imagem e  $TP$  = Tamanho do pixel em bits.

## 2.2.2 Visualização de Imagens Digitais

O pré-processamento de imagens de sensores remotos, é o tratamento preliminar dos dados brutos, ele tem a função de calibrar a radiometria da imagem, atenuar os efeitos da atmosfera, remover ruídos e corrigir as distorções geométricas (através do georreferenciamento) que podem acontecer durante o processo de aquisição das imagens. O georreferenciamento é o processo que combina as coordenadas da imagem (linhas e colunas) com as coordenadas geográficas (latitude e longitude) de um mapa, ajustando a imagem adquirida à sua localização no terreno. Durante este processo, cada pixel da imagem passa a corresponder a um ponto da superfície representativa da terra, chamado de elipsoide de revolução (FLORENZANO, 2011). A Figura 15 mostra um exemplo de imagem matricial em 256 níveis de cinza.

**Figura 15** – Imagem matricial em níveis de cinza.

Fonte: FLORENZANO, 2011, p. 127

Analisando a Figura 15 é possível perceber que cada pixel possui um valor, que é chamado de valor digital (DN) e representa o nível de energia captada pelo sensor naquele ponto da imagem, no caso do sensor TM-Landsat-5, cada pixel corresponde à uma área terrestre de 30m×30m; sendo assim, o pixel, neste sensor, mostra a energia captada em 900m<sup>2</sup> de superfície terrestre. É possível perceber, ainda que, os pixels mais escuros são aqueles cujo valor de DN são mais baixos, ou seja, existe pouca refletância neste local, já os pixels mais claros, possuem valores altos de DN, conseqüentemente, refletem muita energia na faixa espectral escolhida (FLORENZANO, 2011; GONZALEZ; WOODS, 2010; LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004; MONTABONE, 2010; PETROU; PETROU, 2010; SCHOWENGERDT, 2007).

De acordo com Schowengerdt (2007), um sensor que margeia a terra capta parte da radiação eletromagnética (radiância) que é propagada para cima da terra, e com isso forma uma imagem da superfície da terra em seu “plano focal”. Cada detector realiza a integração da energia que atinge a superfície (irradiância) para formar os valores medidos em cada pixel. A irradiância integrada em cada pixel é, então, convertida em um sinal elétrico e quantificada em valores inteiros, chamados de valores digitais (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2004;

PETROU; PETROU, 2010; QIAN, 2013; SCHOWENGERDT, 2007). Da mesma forma que em outros dados digitais, uma quantidade finita de bits,  $Q$ , é utilizada na conversão dos dados medidos continuamente para números binários. Segundo com Schowengerdt (2007), o número de DNs discretos é dado por

$$N_{DN} = 2^Q \quad (5)$$

e o valor do DN pode ser qualquer inteiro no intervalo,

$$DN_{range} = [0, 2^Q - 1]. \quad (6)$$

Quanto maior o valor de  $Q$ , maior é a resolução radiométrica do sensor, e mais os valores de DN se aproximam dos dados originais contínuos gerados pelos detectores. Por exemplo, tanto o SPOT quanto o TM têm 8bits por pixel, enquanto o AVHRR tem 10bits por pixel. O EOS MODIS, assim como a maioria dos sensores hiperespectrais, possui 12 bits por pixel, com isso alcança uma alta precisão radiométrica. Todavia, nem todos os bits são significativos para medições científicas, principalmente em bandas com baixos níveis de sinal ou altos níveis de ruído (SCHOWENGERDT, 2007).

Visualizadores computacionais de imagem convertem dados digitais de imagem para uma imagem contínua, analógica, o que possibilita a visualização. Eles normalmente são predefinidos para apresentar 8 bits/pixel em escala de cinza ou 24 bits/pixel no sistema de cor aditivo. Três bandas de uma imagem multiespectral são processadas por três Tabelas de escalas de cinza (*Look-Up Tables* - LUTs) para converter os DNs inteiros da imagem digital para Níveis de Cinza (*Grey Levels* - GLs) inteiros em cada banda,

$$GL = LUT_{DN}. \quad (7)$$

O DN é tido como um índice inteiro na LUT, e o GL é um índice inteiro na memória de vídeo do visualizador computacional. O intervalo dos níveis de cinza comumente é dado por,

$$GL_{range} = [0, 255] \quad (8)$$

em cada cor. A LUT pode ser utilizada para aplicar espalhamento (*stretch*) dos DNs da imagem, a fim de melhorar o contraste da imagem a ser visualizada, ou quando o intervalo de DN da imagem original é maior que o intervalo de GL, a LUT pode ser usada para reduzir este intervalo, permitindo a visualização (SCHOWENGERDT, 2007).

De acordo com Schowengerdt (2007), as imagens coloridas são formadas a partir da composição de três GLs correspondentes a quaisquer três bandas de uma imagem multiespectral. Cada banda é atribuída a um dos 8 bits correspondentes às cores vermelho, verde e azul do écran do vídeo, formado por 24 bits. Segundo o autor, cada pixel apresentado em uma tela computacional tem a cor definida por um trio de GLs, que pode ser considerado um vetor coluna tridimensional RGB,

$$RGB = [GL_R, GL_G, GL_B]. \quad (9)$$

Os computadores criam as cores utilizando o método aditivo. Deve-se ressaltar que apesar de algumas combinações de cores serem mais utilizadas para representação de imagens multiespectrais (Tabela 4), como muitas bandas captam informações fora do espectro visível, a atribuição de cores é arbitrária, e as melhores cores a serem utilizadas são aquelas que ressaltam os dados de interesse. As cores naturais, apresentadas na Tabela 4, apesar de serem tidas como uma composição real, não o é, pois não existe cor real em sensoriamento remoto (SCHOWENGERDT, 2007).

**Tabela 4** – Composições Coloridas mais Comuns.

Sensor	Tipo de Composição	
	Cor Natural	Cor IR ( <i>CIR</i> )
genérico	vermelho:verde:azul	IVP:vermelho:verde
ALI	4:3:2	5:4:2
ASTER	-	3:2:1
AVIRIS	30:20:9	45:30:20
Hyperion	30:21:10	43:30:21
MODIS	13:12:9	16:13:12
MSS	-	4:2:1
SPOT	-	3:2:1
TM, ETM+	3:2:1	4:3:2

IVP - Infravermelho Próximo

**Fonte:** Adaptado de SCHOWENGERDT, 2007, p. 39

De forma individual, a banda de uma imagem multiespectral pode ser exibida como uma imagem em tons de cinza, onde cada DN, ou intervalo de DNs, é convertido em uma diferente cor com o auxílio das LUTs da tela. Colorir uma imagem, torna mais fácil a detecção de pequenas diferenças entre os DNs da imagem (SCHOWENGERDT, 2007).

### 2.3 Armazenamento e Manipulação de Imagens Digitais

Ao observar as equações eq.(2), eq.(3) e eq.(4), que representam os três formatos básicos de dados, é possível perceber a interação das dimensões espacial, espectral e radiométrica para o armazenamento da imagem em disco. O tamanho do arquivo final armazenado é diretamente proporcional ao tamanho das dimensões da imagem, sendo que “imagens de sensores remotos comumente compõem grandes arquivos” (LIEW, 2011).

Os computadores têm evoluído, e isso se caracteriza pelo aumento da velocidade dos processadores, redução no tamanho dos componentes e pelo aumento da capacidade da memória e da velocidade de entrada e saída de informações (STALLINGS, 2002, p. 18).

A contínua revolução tecnológica possibilita o desenvolvimento de aplicações que demandam um grande volume de processamento, como é o caso do Processamento de Imagem (STALLINGS, 2002, p. 42). De acordo com Stallings (2002, pp. 43–44) apesar do aumento na velocidade do processador, outros componentes não acompanharam esta evolução, o que ocasiona um desbalanceamento do desempenho do computador. Segundo ele, o principal problema ocorre na interface entre o processador e a memória principal, pois enquanto a velocidade do processador e a capacidade da memória cresceram rapidamente, a evolução da taxa de transferência de dados entre eles não acompanhou esta evolução.

Devido ao problema relatado por Stallings (2002, pp. 43–44), o tamanho das imagens de sensores remotos torna sua manipulação demorada, sendo necessário a utilização de sistemas otimizados para essa finalidade. O desempenho de um Software é uma qualidade fundamental, porém complexa visto que é afetado por todos os detalhes do projeto, do código, e também do ambiente de execução.(WOODSIDE; FRANKS; PETRIU, 2007)

De acordo com Sharma (2004, p. 32) após a implementação de um sistema, deve-se ponderar entre os objetivos deste software e suas limitações. Segundo ele, com esta avaliação do software é possível identificar possíveis problemas que podem se tornar riscos para o projeto. Ao encontrar essa possível área de risco, é necessário buscar uma estratégia de baixo custo para saná-la, o que pode incluir o “desenvolvimento de protótipos, simulações, benchmarkings entre outras técnicas de resolução de risco” (SHARMA, 2004, p. 32).

Benchmarking é uma teoria de gestão da qualidade e melhoria, que visa melhorar a qualidade de algo, verificando sua sustentabilidade, sendo, esta melhoria, conseguida através da comparação entre organismos de um mesmo nicho (ANDERSEN; PETTERSEN, 1995; KOZAK, 2004). De acordo com Andersen e Pettersen (1995, p. 4), o propósito de um estudo

do tipo benchmarking não é apenas comparar para avaliar algo, mas visa também o aprendizado sempre em busca de melhorias.

No caso de softwares específicos para tratamento de imagens de satélites, a principal área de risco, como citado por Stallings (2002, pp. 43–44), é a limitação do hardware durante a manipulação das imagens que podem compor grandes arquivos (LIEW, 2011). Sendo assim, é necessário que sistemas sejam sempre aprimorados de forma a manipular os grandes arquivos sem que as limitações de hardware sejam fatores impactantes no resultado final da execução do sistema.



### **3. ARTIGO: MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS MULTI-DIMENSIONAIS**

#### **3.1 Introdução**

Os recursos naturais e o meio ambiente terrestre estão sempre sofrendo mudanças, hora pela evolução natural, hora pelas atividades humanas sobre eles. O complexo inter-relacionamento dos fenômenos causadores dessas mudanças deve ser compreendido através da observação de “uma grande gama de escalas temporais e espaciais”. A maneira mais efetiva e econômica de coletar os dados necessários para monitorar tais fenômenos é a observação da terra pelos satélites (SAUSEN, 2012).

Os satélites para sensoriamento remoto, lançados em órbita a partir dos anos 1970 (SAUSEN, 2012), proveem imagens digitais da superfície terrestre. “Uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto.” (GONZALEZ; WOODS, 2010).

O tempo é contínuo por natureza, porém, para ser representado computacionalmente, é necessário que seja feita uma abordagem discreta onde a variação temporal pode ser representada por uma linha de tempo especificada de acordo com a frequência desejada (DIAS; CÂMARA; DAVIS JR., 2005). Como apresenta Sausen (2012), para ser capaz de compreender as alterações que o meio ambiente terrestre e os recursos naturais sofrem, é necessário analisar não apenas este ambiente em um tempo e espaço, mas sim, multiplicar essas grandezas.

É proposta uma abordagem onde seja possível analisar uma imagem com  $k$ -bandas, em  $n$ -tempos simultaneamente, de modo que a imagem digital comum, tridimensional (linhas, colunas e bandas), passe a ser analisada levando-se em consideração a dimensão tempo, passando essa, então, a ser quadridimensional (linhas, colunas, bandas e tempos). Para tanto, os formatos convencionais de armazenamento de dados (BSQ, BIL e BIP) foram remodelados, acrescentando à estes a dimensão tempo.

A fim de testar os novos formatos de armazenamento de dados propostos, foi desenvolvido um protótipo em duas etapas. Na primeira versão do protótipo, os testes foram executados em um tempo considerável, o que levou a necessidade de aprimoramento da eficiência dos algoritmos implementados. Para a segunda versão do protótipo, então, foram implementadas técnicas de multi-ponteiros, o que trouxe ganhos significativos de performance ao protótipo inicial.

A aplicabilidade deste estudo é ampla, partindo desde o simples reconhecimento de concentração de vegetação em uma determinada área, até a estimativa de alterações futuras, baseando-se no Gráfico padrão de mudanças sofridas anteriormente naquela região. Possibilita-se através do estudo multi-temporal de uma região, o reconhecimento de padrões de alteração no uso do solo, e como este uso evoluiu com o passar do tempo.

## **3.2 Resultados e Discussão**

### **3.2.1 Novos Formatos de Dados para Imagens de Sensoriamento Remoto**

Imagens multi-bandas são armazenadas em disco ou fita e são representadas por uma combinação entre a dimensão espacial (linhas e colunas) e as bandas. Esse armazenamento pode ser feito em um de três formatos BSQ, BIL e BIP (JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING, [s.d.]; QIN; CHAO; KIM, 2010; SCHOWENGERDT, 2007). Este trabalho propõe-se a apresentar um novo formato para se trabalhar as imagens digitais de sensores remotos, acrescentando a dimensão temporal (Tempos) aos formatos comuns, criando os novos formatos TBSQ, TBIL e TBIP.

No tipo de dados TBSQ (*Time and Band SeQuential* – Tempos e Bandas em SeQuência), os dados espaciais de cada banda completa da imagem são dispostos separadamente em sequência, e o processo se repete para cada tempo da imagem. No formato TBIL (*Time and Band Interleaved by Line* – Tempos e Bandas Intercalados por Linhas) os dados das linhas de cada banda em um tempo da imagem são dispostos em ordem, de acordo com a quantidade de bandas e tempos, de modo que este processo se repita pela quantidade de linhas da imagem. Já o formato TBIP (*Time and Band Interleaved by Pixel* – Tempos e Bandas Intercalados por Colunas), é um tipo de organização onde um conjunto de dados multi-bandas e multi-tempos relativo a cada pixel é disposto de acordo com a quantidade de pixels e linhas da imagem.

A Figura 16 exemplifica visualmente como uma imagem com dimensão espacial de 2 linhas por 2 colunas, dimensão espectral de 3 bandas e dimensão temporal de 2 tempos é armazenada em disco em cada um dos três novos formatos de armazenamento digital propostos: TBSQ (a), TBIL (b) e TBIP (c). O fluxo disposto nas setas presentes na lateral esquerda de cada tipo de dado possibilita perceber a sequência de armazenamento dos pixels.

Dados armazenados no formato TBSQ, Figura 16a, tem todos os pixels de uma linha, em uma banda, armazenados em sequência, em seguida, todos os pixels da próxima linha, e o processo se repete até a finalização da banda em questão, iniciando-se então, na próxima

banda, até que todo o tempo seja armazenado, repetindo o processo para os próximos tempos até que toda a imagem seja armazenada. Já dados armazenados no formato TBIL, Figura 16b, tem os pixels dispostos de modo que todos os pixels de uma linha, em uma banda, são armazenados em sequência, em seguida, todos os pixels da mesma linha na próxima banda, e o processo se repete até a última banda da imagem, quando, então todos os pixels da próxima linha da primeira banda serão armazenados, e o processo se repetirá até que todo o tempo seja armazenado, iniciando um novo ciclo para cada próximo tempo até que toda a imagem seja armazenada.. Em imagens armazenadas no formato TBIP, Figura 16c, o primeiro pixel da primeira linha da primeira banda é armazenado, em seguida, o primeiro pixel da primeira linha da próxima banda, o processo se repete até a última banda, e então o segundo pixel da primeira linha da primeira banda será armazenado e o processo se repete até o final da primeira linha, passando para a segunda linha e assim sucessivamente até que todo o tempo seja armazenado, repetindo o processo para os próximos tempos até o final da imagem.

Conforme verificado na Figura 16, a posição de um pixel localizado neste espaço quadridimensional (linha, coluna, banda e tempo) varia conforme seu formato de armazenamento. A equação  $f: Z^4 \rightarrow Z$  mapeia o endereço de memória de um pixel qualquer em uma imagem do tipo TBSQ armazenada em disco:

$$f(l, c, b, t) = ((t \cdot QtB \cdot QtL \cdot QtC) + (b \cdot QtL \cdot QtC) + (l \cdot QtC) + c) \cdot TP \quad (10)$$

onde:  $l$  = linha do pixel,  $c$  = coluna do pixel,  $b$  = banda do pixel,  $t$  = tempo do pixel,  $QtB$  = quantidade de bandas da imagem,  $QtL$  = quantidade de linhas da imagem,  $QtC$  = quantidade de colunas da imagem e  $TP$  = Tamanho do pixel em bits.

A equação  $g: Z^4 \rightarrow Z$  mapeia o endereço de memória de um pixel qualquer em uma imagem do tipo TBIL armazenada em disco:

$$g(l, c, b, t) = ((t \cdot QtB \cdot QtL \cdot QtC) + (b \cdot QtC) + (c \cdot b \cdot QtC) + c) \cdot TP \quad (11)$$

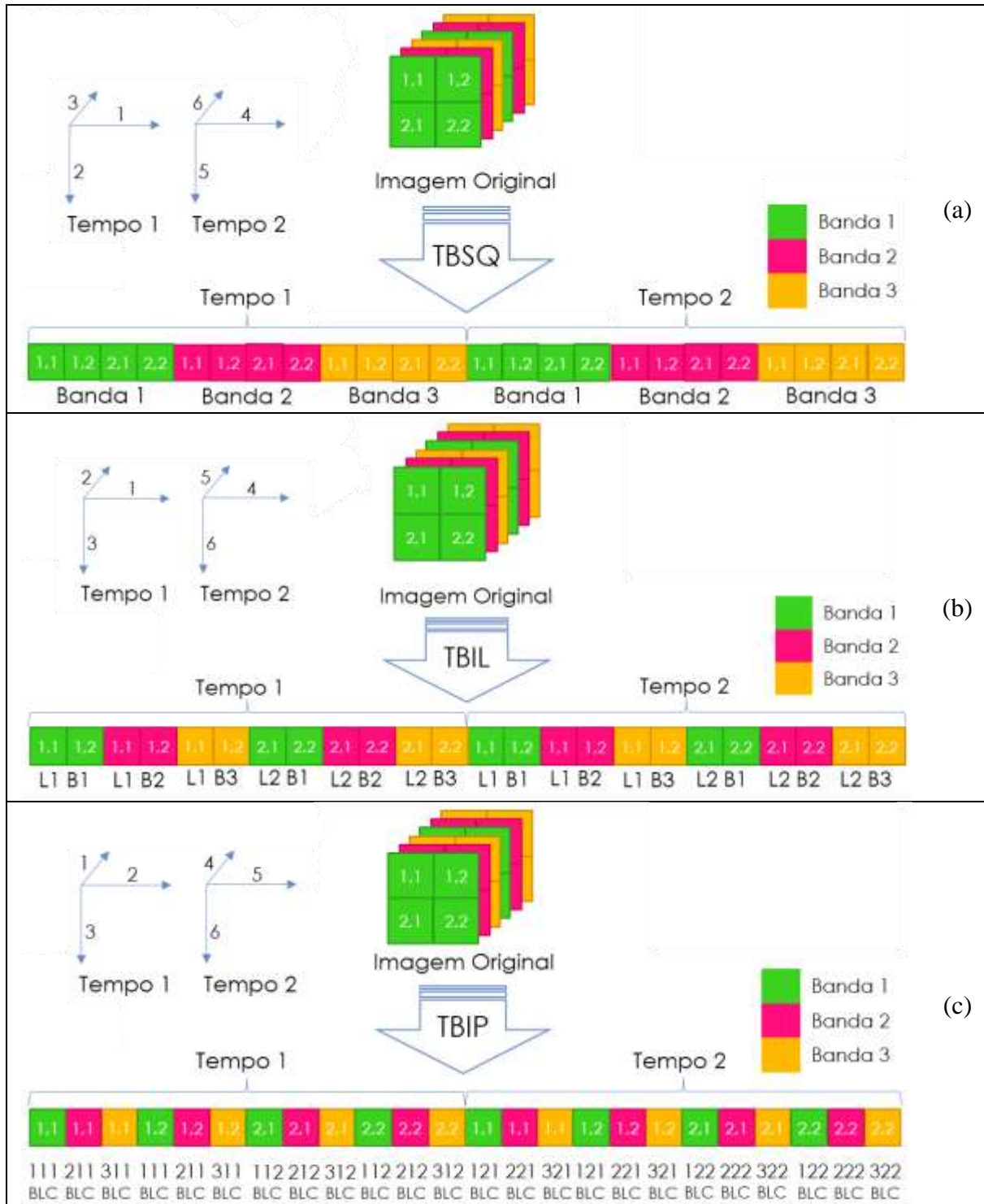
onde:  $l$  = linha do pixel,  $c$  = coluna do pixel,  $b$  = banda do pixel,  $t$  = tempo do pixel,  $QtB$  = quantidade de bandas da imagem,  $QtL$  = quantidade de linhas da imagem,  $QtC$  = quantidade de colunas da imagem e  $TP$  = Tamanho do pixel em bits.

A equação  $h: Z^4 \rightarrow Z$  mapeia o endereço de memória de um pixel qualquer em uma imagem do tipo TBIP armazenada em disco:

$$h(l, c, b, t) = ((t \cdot QtB \cdot QtL \cdot QtC) + (l \cdot QtB \cdot QtC) + (c \cdot QtB) + b) \cdot TP \quad (12)$$

onde:  $l$  = linha do pixel,  $c$  = coluna do pixel,  $b$  = banda do pixel,  $t$  = tempo do pixel,  $QtB$  = quantidade de bandas da imagem,  $QtL$  = quantidade de linhas da imagem,  $QtC$  = quantidade de colunas da imagem e  $TP$  = Tamanho do pixel em bits.

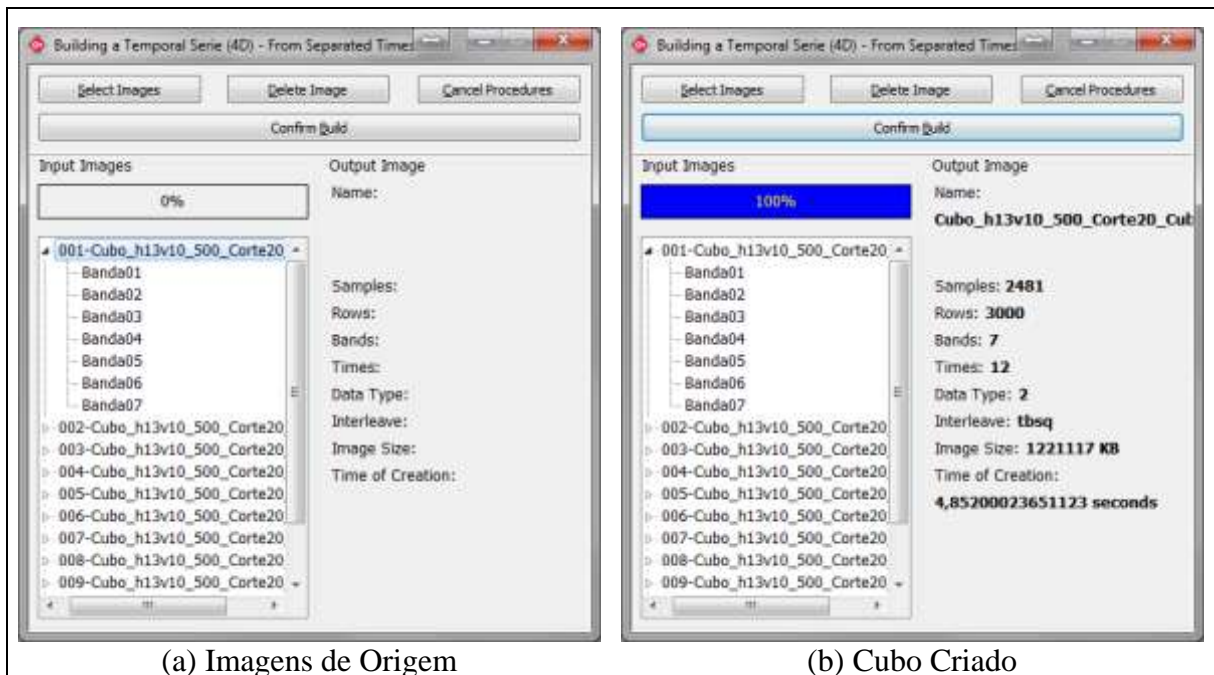
**Figura 16** – Novos Formatos de Dados TBSQ, TBIL e TBIP.



Fonte: O Autor

### 3.2.1.1 Montagem do cubo 4D

**Figura 17** – Protótipo: Montagem Cubo 4D.



Fonte: O Autor

A Figura 17 apresenta as interfaces para montagem do cubo temporal no protótipo. A primeira imagem (17a) traz a fase inicial da montagem, quando apenas as imagens de origem foram selecionadas através do botão “*Select Images*” (Selecionar Imagens). Já a segunda imagem (17b) mostra o momento seguinte, que se dá logo após a montagem da série temporal através do botão “*Confirm Build*” (Confirmar Montagem), quando as informações relativas ao cubo temporal são apresentadas na interface. No momento apresentado na Figura 17b tanto o cubo temporal montado quanto seu cabeçalho já encontram-se armazenados em disco.

O protótipo em questão monta séries temporais no formato TBSQ a partir de imagens “multi-tempos” ou “multi-bandas”, ou seja, as imagens originais podem estar armazenadas de modo que um tempo possua  $k$ -bandas (“multi-tempos”) ou de modo que uma banda possua  $n$ -tempos (“multi-bandas”).

As interfaces para seleção das imagens de origem para montagem do cubo quadridimensional (Figura 17) são semelhantes tanto no processo de montagem a partir de imagens multi-bandas quanto a partir de imagens multi-tempos. É possível selecionar o tipo de imagem de entrada (Figura 18), a partir do qual a série temporal final, no formato TBSQ, será montada.

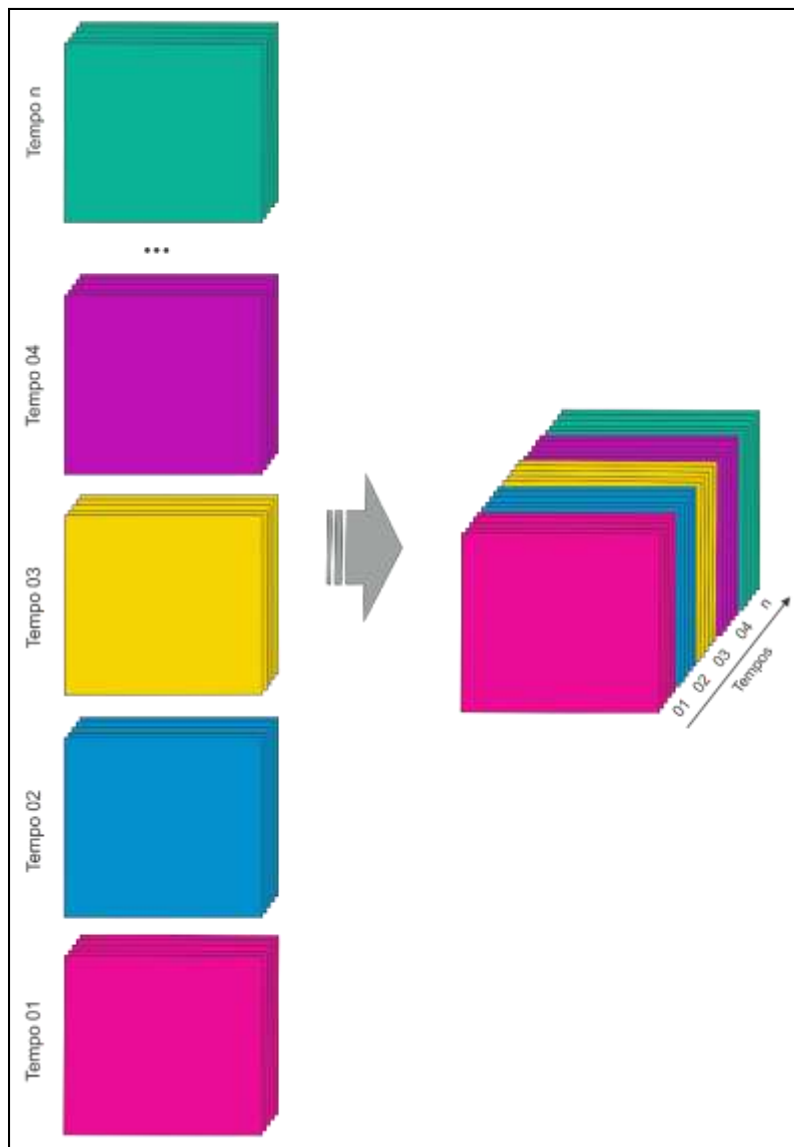
**Figura 18** – Protótipo: Selecionando Entrada para Montagem do Cubo 4D.



Fonte: O Autor

- Imagens multi-tempos:

**Figura 19** – Montagem do Cubo 4D a partir de uma Imagem Multi-Tempos.



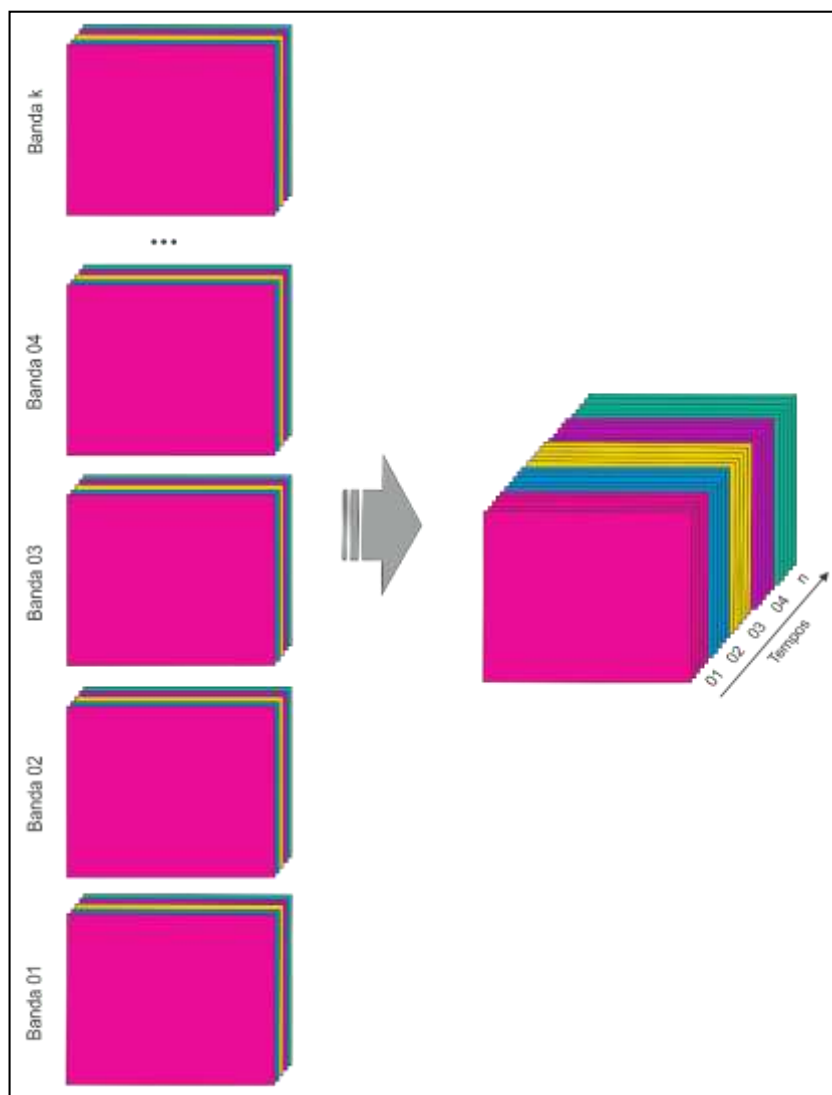
Fonte: O Autor

A Figura 19 apresenta um diagrama que representa a forma de montagem de uma série temporal TBSQ a partir de uma imagem multi-tempos, na qual as imagens iniciais são os tempos de uma imagem de sensor remoto e cada tempo contém  $k$ -bandas.

O processo dá-se de forma que um tempo é inteiramente copiado (linhas, colunas e bandas) para o arquivo final (cubo 4D), e o processo se repete para os demais tempos da imagem, na ordem informada pelo usuário ao seleccioná-los. Na Figura 19, cada cor representa um tempo distinto que contém  $k$ -bandas.

- Imagens multi-bandas:

**Figura 20** – Montagem do Cubo 4D a partir de uma Imagem Multi-Bandas.



**Fonte:** O Autor

A Figura 20 mostra um diagrama que representa a forma de montagem da série temporal TBSQ a partir de uma imagem multi-bandas, na qual as imagens iniciais são as bandas de uma imagem de sensor remoto e cada banda contém  $n$ -tempos.

O processo dá-se de forma que um tempo (linhas e colunas) de cada uma das bandas é copiado para o arquivo final (cubo 4D), intercalando o mesmo tempo de bandas distintas. Este processo repete-se pela quantidade de tempos que a imagem possui. Na Figura 20, cada cor representa um tempo distinto dentro de uma das  $k$ -bandas que formarão a imagem final. Cores iguais indicam tempos iguais em bandas distintas.

Tanto na Figura 19 quanto na Figura 20 o cubo final formado possui 4 dimensões, sendo elas duas dimensões espaciais (linhas e colunas), uma dimensão espectral (bandas) e uma dimensão temporal (tempos). Em ambos os casos, o cubo quadridimensional formado como resultado do processamento das imagens iniciais é do formato TBSQ, sendo assim, imagens iniciais com mesmas dimensões espaciais, espectrais e temporais resultarão em uma mesma imagem 4D de saída, apesar de o processo de formação do Cubo 4D ser distinto.

### 3.2.2 *Espectro Temporal*

Cada objeto presente na superfície terrestre reflete, absorve e transmite a radiação eletromagnética proporcionalmente em cada comprimento de onda, de acordo com suas propriedades biofísicas e químicas. Em se considerando um satélite, que possui diversas bandas cada qual responsável por captar uma faixa do espectro, é possível obter a assinatura espectral de um alvo através da observação da refletância do alvo naquele canal (FLORENZANO, 2011).

Cada pixel de uma imagem possui uma assinatura espectral particular, é possível encontrar pixels com assinaturas semelhantes ou extremamente distintas. Como cada tempo da imagem possui o mesmo conjunto de bandas, a assinatura espectral de um mesmo pixel pode variar ao longo do tempo o que traz a necessidade de estudo dessa variação.

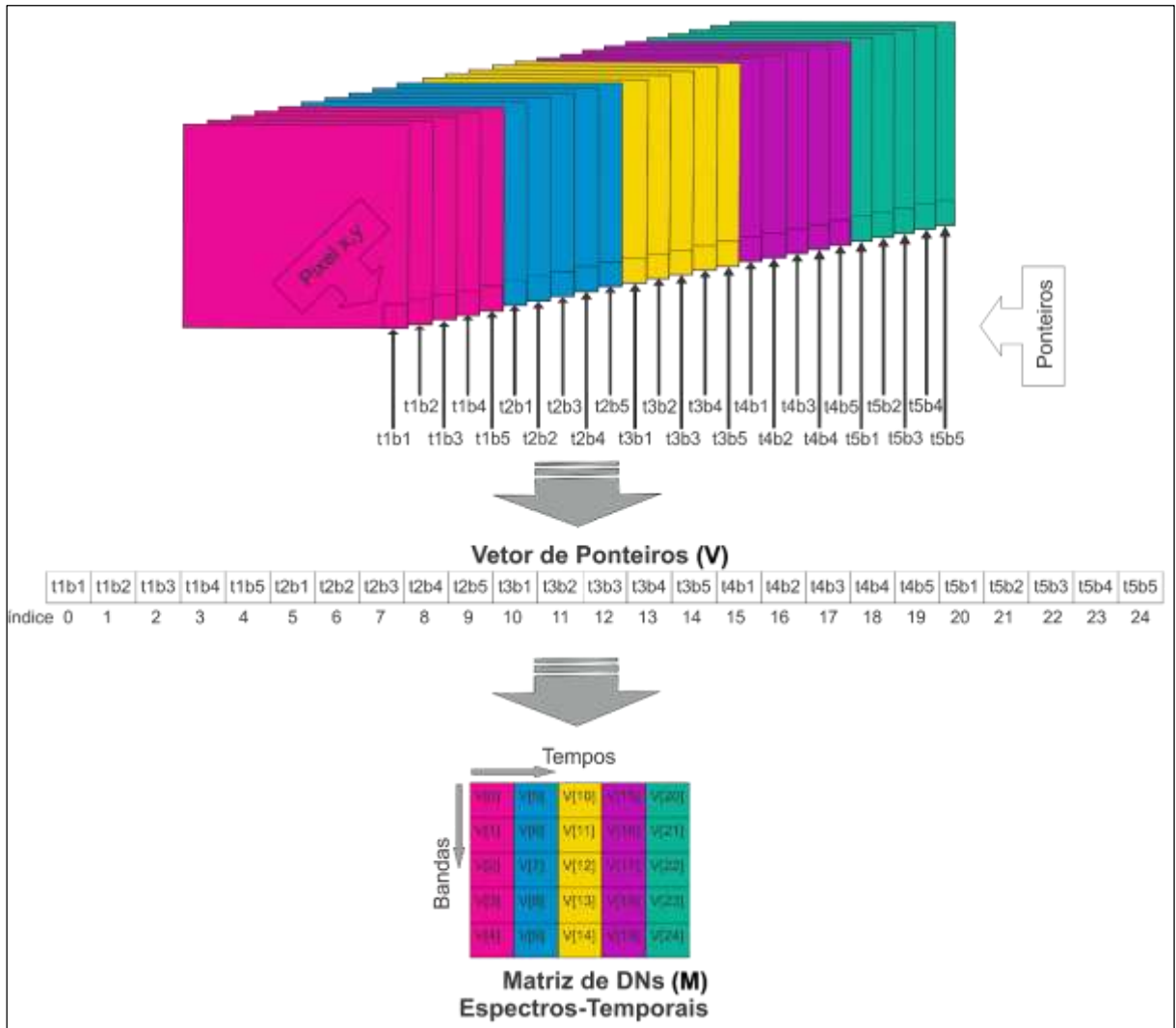
Foi proposto então um método de captação dos espectros de um pixel ao longo do tempo, montando uma matriz de espectros temporais do pixel em questão. A Figura 21 apresenta um diagrama de funcionamento deste método para um pixel aleatório.

O método apresentado na Figura 21 utiliza uma técnica computacional de multi-ponteiros. A partir das posições espaciais (linha e coluna) de um pixel selecionado, um ponteiro é posicionado em cada banda de cada tempo da imagem nesta mesma posição espacial, e o endereço deste ponteiro é armazenado em um vetor de ponteiros. Os ponteiros



são então utilizados para coletar os valores de DN no ponto em que estão posicionados, preenchendo, assim, a matriz de valores de DN. O preenchimento da matriz de DNs dá-se sempre nos índices referentes à banda e tempo onde o ponteiro está posicionado.

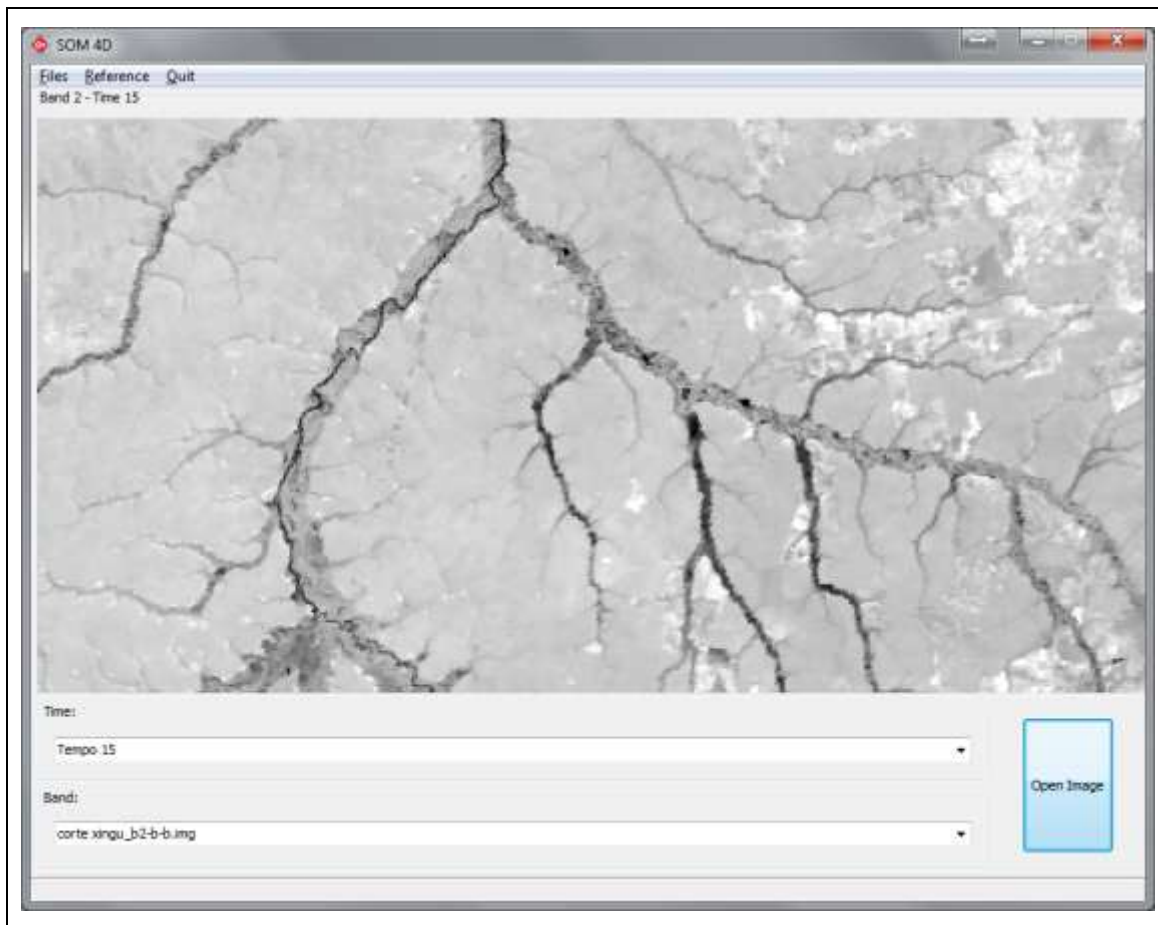
**Figura 21** – Coleta de Espectro-Temporal utilizando Multi-Ponteiros.



Fonte: O Autor

Este método possibilita a coleta dos valores de DN consecutivamente em todas as bandas e tempos da imagem sem a necessidade de deslocar o coletor por toda a dimensão espacial (linhas e colunas) de cada banda a cada nova coleta de DN, tornando o processo mais eficiente.

A técnica proposta foi utilizada em duas etapas do protótipo, na fase de upload do cubo temporal para visualização e estudo e na fase de visualização das características espectro-temporais de um pixel em específico selecionado na imagem carregada.

**Figura 22** – Cubo 4D Carregado.

Fonte: O Autor

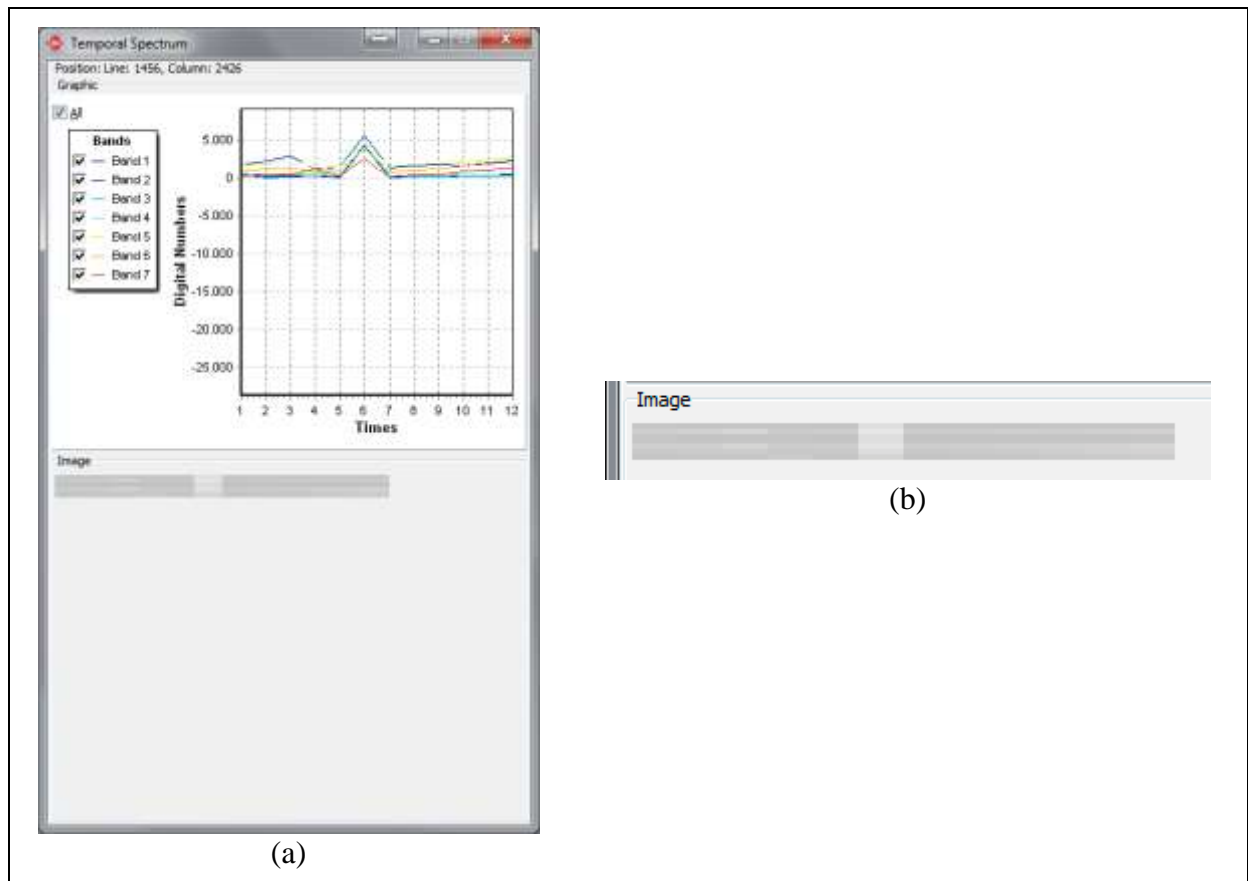
Na fase de upload do cubo temporal para estudo faz-se necessário verificar os valores de menor e maior DN, que serão utilizados na montagem do gráfico de espectros-temporais. Essa verificação é feita utilizando o método de coleta do espectro-temporal de 20% dos pixels da imagem, estes são coletados individualmente e comparados aos pares. Ao final de todas as comparações tem-se definidos o maior e o menor valores de DN.

A Figura 22 mostra a interface do protótipo onde é apresentada a imagem de uma banda e um tempo escolhidos de um cubo temporal já carregado. O protótipo possibilita a interação do usuário com a face carregada do cubo, de forma que, a cada pixel selecionado, um gráfico do espectro-temporal (Figura 23) deste pixel é gerado instantaneamente, proporcionando uma visualização das alterações daquele pixel no decorrer do tempo em todas as bandas da imagem.

Na etapa de apresentação do gráfico do espectro-temporal de um pixel selecionado na imagem o método é utilizado para coletar os valores de DN referentes ao espectro do pixel

no tempo. A Figura 23 apresenta a interface do protótipo que proporciona a visualização do espectro no tempo de um pixel selecionado. A visualização é feita em bandas separadas, permitindo a visualização das alterações de valores assumidos pelo pixel no decorrer do tempo em cada uma das bandas espectrais de forma independente.

**Figura 23** – Gráfico do Espectro-Temporal.



**Fonte:** O Autor

O eixo y do gráfico do espectro temporal é composto por um intervalo de valores entre o valor de menor e maior DN's, coletados na fase de upload do cubo 4D. O eixo x do mesmo gráfico traz a dimensão temporal da imagem, no caso do exemplo citado na Figura 23, uma imagem com 12 tempos. A dimensão espectral é representada pelas cores, onde cada cor representa uma banda da imagem, e podem ser distinguidas na legenda apresentada ao lado do gráfico, onde é possível selecionar quais bandas devem ser apresentadas no gráfico, a fim de facilitar a análise. O formulário de visualização do espectro temporal ainda traz uma figura em escala de cinza, detalhada na Figura 23b, onde é possível verificar visualmente as alterações de valores dos DN's de cada banda, de modo que, tonalidades iguais representam mesmo valor de DN.

### 3.3 Seção de Experimentos

Para fins de testes foi utilizado um computador com sistema operacional Windows® 7 Ultimate 64 Bits, processador Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz 3.90GHz, memória RAM de 8GB. O teste de performance, ou seja, o teste para verificação do tempo de processamento gasto, do protótipo foi feito em um HD (*Hard Disk* – Disco Rígido) da *Western Digital Corporation*® modelo WD10EARS-00Y5B1 (930261 cilindros, 16 cabeças, 63 setores por trilha, 512 bytes por setor), SATA-II com capacidade de armazenamento de 1TB, e também em um SSD (*Solid-State Drive* – Unidade de Disco Sólida) da marca *Kingston*® modelo SV300s37A480G (1938021 cilindros, 16 cabeças, 63 setores por trilha, 512 bytes por setor), SATA-II com capacidade de 470GB. O armazenamento dos produtos gerados, assim como das imagens e cortes originais foi feito em HDs externos auxiliares.

A imagem original foi cedida pelo Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia (GEA) da Universidade de Brasília (UnB). Inicialmente armazenada no formato multi-bandas e totalizando 242,58GB de tamanho em disco, possui dimensão espacial de 5000 linhas por 6296 colunas, dimensão espectral de 7 bandas e dimensão temporal de 591 tempos, e pixels com tamanho de 16 bits. Foi utilizado o software ENVI (*Environment for Visualizing Images* - Ambiente para Visualização de Imagens) para corte espacial e temporal da imagem original, proporcionando imagens no formato multi-bandas. O software também foi utilizado para separação das dimensões temporal e espectral da imagem original, a fim de obter material propício à montagem de imagens no formato multi-tempos.

Para demonstrar a eficiência e eficácia dos métodos propostos, foram feitos testes com imagens em dois formatos, multi-tempos e multi-bandas. A dimensão espectral das imagens foi fixada em 7 bandas para todos os testes. Como dimensão espacial (linha×coluna) da imagem foram definidos os tamanhos 3000×2481 e 5000×6296. A dimensão temporal foi variada em 8 tempos distintos. O tamanho do pixel foi o mesmo (16 bits) para todos os testes.

Nas imagens originais foram feitos cortes temporais a fim de determinar os 8 tempos distintos variando de 2 (dois) a 400 (quatrocentos). A Tabela 5(a) apresenta a descrição dos cortes feitos na imagem original para testes de desempenho do protótipo com imagens no formato multi-bandas. A Tabela 5(b) mostra os cortes da imagem original preparados para os testes no formato multi-tempos, onde, devido a limitações de Hardware, não foi possível trabalhar com uma dimensão temporal superior 350 tempos.

**Tabela 5 – Cortes de Imagens para Teste.**

<b>Formato multi-bandas (a)</b>						
<b>Corte</b>	<b>Dimensão Espacial</b>		<b>Dimensão Espectral</b>	<b>Dimensão Temporal</b>	<b>Tamanho do Pixel (bits)</b>	<b>Tamanho do Corte (GB)</b>
	<b>Linhas</b>	<b>Colunas</b>				
Corte 01a	3000	2481	7	400	16	38,82
Corte 02a	3000	2481	7	350	16	33,97
Corte 03a	3000	2481	7	300	16	29,11
Corte 04a	3000	2481	7	250	16	24,26
Corte 05a	3000	2481	7	100	16	9,70
Corte 06a	3000	2481	7	50	16	4,85
Corte 07a	3000	2481	7	12	16	1,16
Corte 08a	3000	2481	7	2	16	0,19
Corte 09a	5000	6296	7	400	16	164,18
Corte 10a	5000	6296	7	350	16	143,66
Corte 11a	5000	6296	7	300	16	123,14
Corte 12a	5000	6296	7	250	16	102,61
Corte 13a	5000	6296	7	100	16	41,05
Corte 14a	5000	6296	7	50	16	20,52
Corte 15a	5000	6296	7	12	16	4,93
Corte 16a	5000	6296	7	2	16	0,82
<b>Formato multi-tempos (b)</b>						
<b>Corte</b>	<b>Dimensão Espacial</b>		<b>Dimensão Espectral</b>	<b>Dimensão Temporal</b>	<b>Tamanho do Pixel (bits)</b>	<b>Tamanho do Corte (GB)</b>
	<b>Linhas</b>	<b>Colunas</b>				
Corte 01b	3000	2481	7	350	16	33,97
Corte 02b	3000	2481	7	300	16	29,11
Corte 03b	3000	2481	7	250	16	24,26
Corte 04b	3000	2481	7	100	16	9,70
Corte 05b	3000	2481	7	50	16	4,85
Corte 06b	3000	2481	7	12	16	1,16
Corte 07b	3000	2481	7	2	16	0,19
Corte 08b	5000	6296	7	350	16	143,66
Corte 09b	5000	6296	7	300	16	123,14
Corte 10b	5000	6296	7	250	16	102,61
Corte 11b	5000	6296	7	100	16	41,05
Corte 12b	5000	6296	7	50	16	20,52
Corte 13b	5000	6296	7	12	16	4,93
Corte 14b	5000	6296	7	2	16	0,82

Fonte: O Autor.

### 3.3.1 Montagem dos Cubos Temporais quadridimensionais

Os cubos temporais quadridimensionais (cubo 4D) foram montados a partir dos cortes especificados na Tabela 5. Foi feito um *benchmarking* a fim de comparar a

performance na criação do cubo 4D tanto nos testes feitos no HD quanto nos testes feitos no SSD.

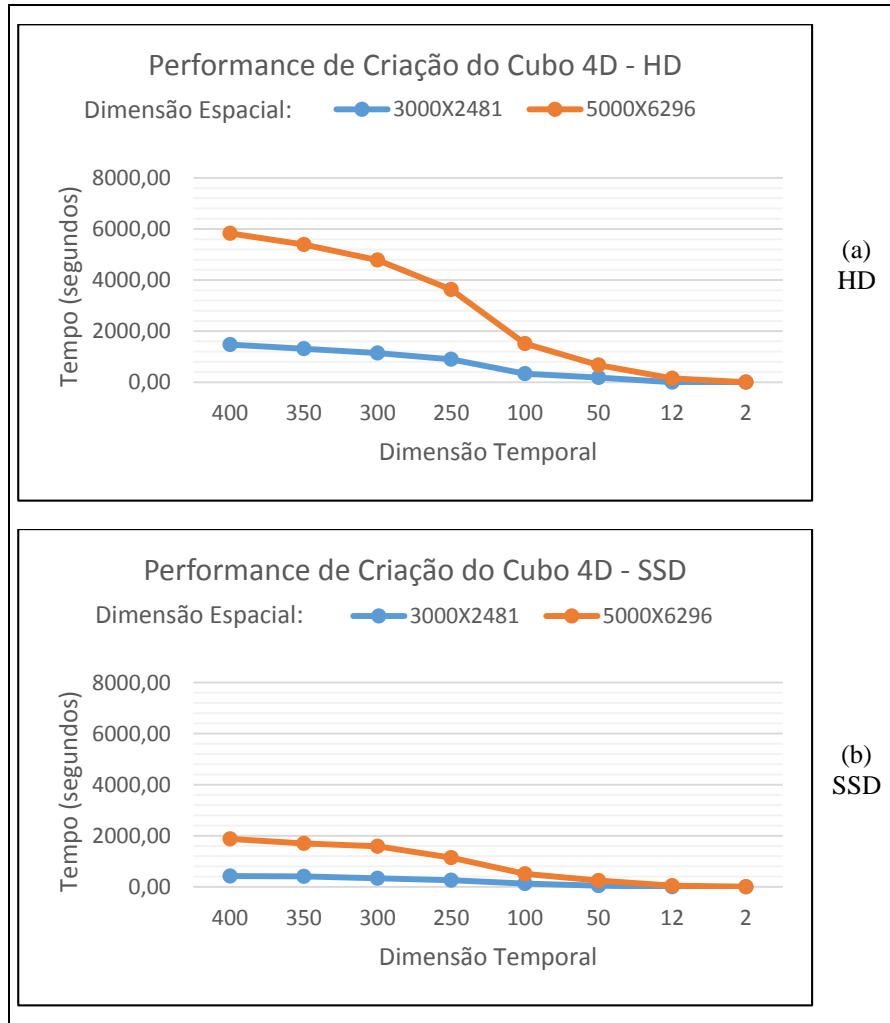
As Figuras 24 e 25 apresentam os gráficos de performance do protótipo durante a montagem do cubo 4D a partir de imagens multi-bandas (Figura 24) e a partir de imagens multi-tempos (Figura 25), além disso, apresenta este desempenho testado no HD (Figuras 24(a) e 25(a)) e no SSD (Figuras 24(b) e 25(b)). As imagens utilizadas para testes possuíam dimensão espacial de  $3000 \times 2481$  e de  $5000 \times 6296$ .

Uma simples observação dos gráficos presentes nas Figuras 24 e 25 possibilita a percepção de que o desempenho do protótipo é superior quando executado no SSD, devido às características de otimização deste hardware. Também é possível perceber que o tempo de processamento gasto pelo protótipo é diretamente proporcional ao tamanho da imagem. Ao cruzar os gráficos com a Tabela 5 percebe-se que quanto maiores as dimensões temporal e espacial da imagem, maior o tamanho da imagem armazenada e, conseqüentemente, maior o tempo para a montagem do cubo 4D.

O corte 01a e o corte 09a possuem 400 tempos, o que somente foi passível de teste para imagens originalmente multi-bandas, pois possuem 7 arquivos originais (bandas) e cada um deles é composto por 400 camadas (tempos). Essa limitação nos testes deu-se devido ao hardware estabelecido para teste não suportar a abertura de 400 arquivos (tempos) distintos simultaneamente, cada um composto por 7 camadas (bandas), padrão de imagens multi-tempos.

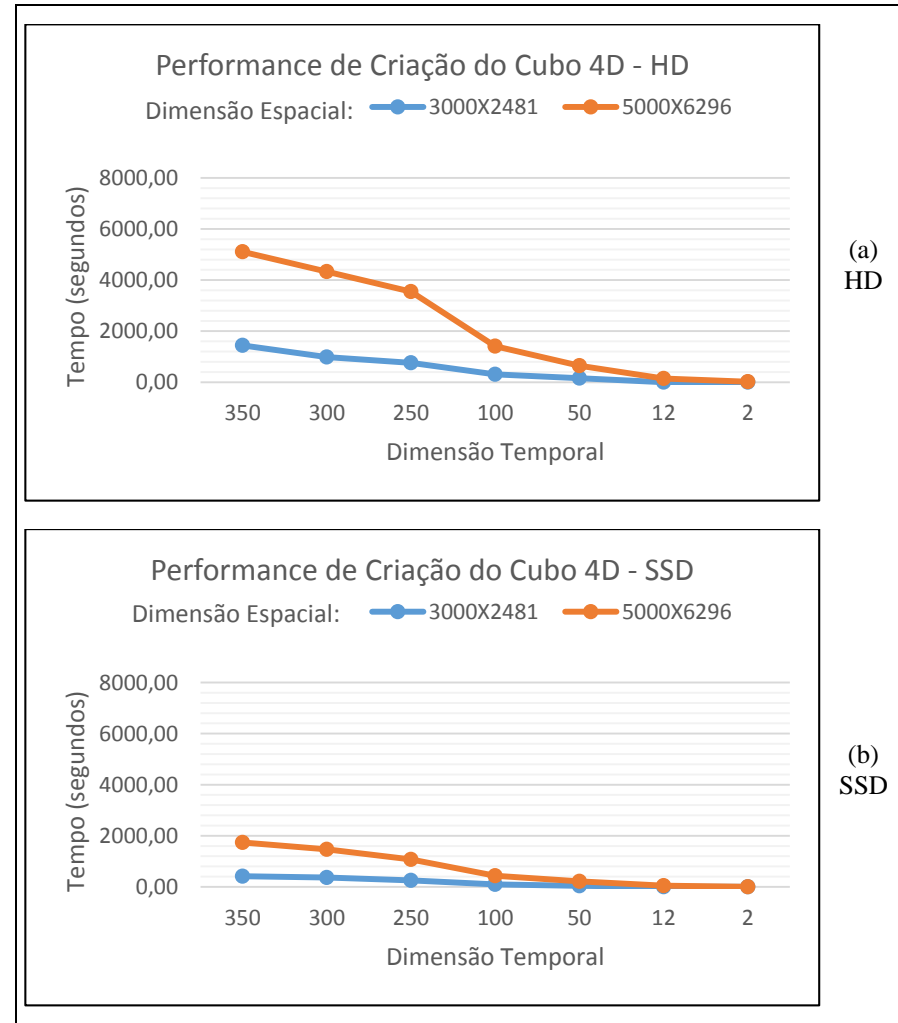
Ao comparar o desempenho do protótipo para montagem dos cubos 4D multi-bandas (Figura 24) e multi-tempos (Figura 25) percebe-se a semelhança de performance em imagens de mesmo tamanho testadas em configurações de hardware semelhantes. É importante observar que o produto (Cubo 4D) gerado em ambos os casos é o mesmo (Figuras 19 e 20), ou seja, um cubo TBSQ.

**Figura 24** – Performance de Criação do Cubo 4D Multi-Bandas



Fonte: O Autor

**Figura 25** – Performance de Criação do Cubo 4D Multi-Tempos



Fonte: O Autor

A Figura 24 traz a performance do software durante a montagem de cubos quadridimensionais a partir de imagens multi-bandas. Foi possível o teste de imagens com até 400 tempos, neste caso, o software gastou 1472,48 segundos para realizar a montagem de um cubo de dimensões espaciais  $3000 \times 2481$  em um HD e 425,40 segundos para montar o mesmo cubo em um SSD. Já a montagem de um cubo de 400 tempos com dimensão espacial  $5000 \times 6296$  foi de 5829,24 segundos em um HD e 1877,43 segundos em um SSD. A dimensão temporal apresentada nos cortes 01a e 09a foi a maior quantidade de tempos testada no protótipo, devido às limitações de hardware, porém, é possível a utilização do protótipo com imagens de maior dimensão temporal em condições adequadas de hardware.

Tanto a Figura 24 quanto a Figura 25 trazem testes em cortes com dimensão temporal de 350 tempos ou menos. Uma imagem com essa dimensão temporal e dimensão espacial de  $3000 \times 2481$  foi processada pelo protótipo em um HD em 1313,06 segundos no caso de imagens originais multi-bandas e em 1441,18 segundos no caso de imagens originais multi-tempos. A diferença de aproximadamente 128 segundos se dá devido à técnica de montagem do cubo utilizada em cada tipo original. Se a montagem ocorrer em um SSD o tempo de montagem do mesmo cubo com imagens originais multi-bandas é de 410,60 segundos e multi-tempos é de 415,51 segundos, ou seja, uma diferença de aproximadamente 5 segundos. No caso da montagem de imagens com dimensão espacial de  $5000 \times 6296$ , em mesmas condições, o tempo de montagem é 5829,24 segundos e 1699,76 segundos para imagens multi-bandas e 5109,95 e 1739,10 segundos para imagens multi-tempos, montadas respectivamente em HD e SSD.

A diferença de performance na montagem de cubos quadridimensionais a partir de imagens multi-bandas e multi-tempos, com mesmas dimensões espacial e temporal em circunstâncias semelhantes é muito pequena não trazendo prejuízo para o desempenho total do protótipo.

No caso de imagens com dimensão temporal baixa a diferença na performance é ainda mais insignificante. No caso de imagens com 2 tempos, dimensão espacial  $3000 \times 2481$  com cubo montado em HD, o tempo de processamento foi de 0,51 segundos (multi-bandas) e 0,50 segundos (multi-tempos), com o cubo temporal montado em SSD o tempo de processamento foi de 0,50 (multi-bandas) e 0,47 (multi-tempos) segundos. Com dimensão espacial de  $5000 \times 6296$ , a performance do protótipo foi de 2,21 (multi-bandas) e 2,00 (multi-tempos) segundos no caso da utilização de HD e de 2,17 (multi-bandas) e 1,97 (multi-tempos) segundos no caso da utilização de SSD.



Em cortes com dimensão temporal 12, a performance do software foi de 4,46 (multi-bandas) e 3,68 (multi-tempos) segundos utilizando HD e de 3,23 (multi-bandas) e 2,81 (multi-tempos) segundos utilizando SSD para imagens com dimensão espacial 3000×2481. E para imagens com dimensão espacial 5000×6296 o software teve um tempo de processamento de 154,85 (multi-bandas) e 147,90 (multi-tempos) segundos utilizando HD enquanto 49,50 segundos (multi-bandas) e 48,27 segundos (multi-tempos) utilizando SSD.

A performance de montagem dos cubos temporais dos cortes 07a, 06b, 08a e 07b, respectivamente com dimensão temporal 2 e 12, demonstram que imagens de baixa dimensão espacial e temporal tem um tempo de processamento similar tanto na utilização de HD quanto na utilização de SSD. Isso acontece devido ao tamanho do buffer de memória (8192 bytes) definido para a fase de montagem do cubo quadridimensional, o que permite que essas imagens sejam processadas por completo na memória do computador, não necessitando realizar *swapping*<sup>5</sup>, conseqüentemente, poupando tempo de processamento.

A Tabela 6 mostra o levantamento do ganho de performance, ou seja, redução de tempo de processamento, ao se utilizar SSD para fazer a montagem do cubo 4D.

**Tabela 6** – Ganho de Performance na Criação do Cubo 4D.

(Continua)

<b>Imagens iniciais no formato multi-bandas</b>			
<b>Corte</b>	<b>Tempo de Criação do Cubo 4D (segundos)</b>		<b>Ganho (%)</b>
	<b>Utilizando HD</b>	<b>Utilizando SSD</b>	
Corte 01a	1472,48	425,40	71,11
Corte 02a	1313,06	410,60	68,73
Corte 03a	1141,38	336,67	70,50
Corte 04a	900,14	262,71	70,82
Corte 05a	334,25	126,27	62,22
Corte 06a	182,83	50,22	72,53
Corte 07a	4,46	3,23	27,62
Corte 08a	0,51	0,50	2,92
Corte 09a	5829,24	1877,43	67,79
Corte 10a	5391,16	1699,76	68,47
Corte 11a	4780,31	1589,85	66,74
Corte 12a	3630,28	1143,68	68,50
Corte 13a	1511,12	512,01	66,12
Corte 14a	672,60	250,76	62,72
Corte 15a	154,85	49,50	68,03
Corte 16a	2,21	2,17	2,08

<sup>5</sup> Intercâmbio de dados entre uma memória secundária e a memória principal.

<b>Imagens iniciais no formato multi-bandas</b>			
<b>Corte</b>	<b>Tempo de Criação do Cubo 4D (segundos)</b>		<b>Ganho (%)</b>
	<b>Utilizando HD</b>	<b>Utilizando SSD</b>	
Corte 01b	1441,18	415,51	71,17
Corte 02b	982,82	364,23	62,94
Corte 03b	756,85	251,35	66,79
Corte 04b	309,58	99,98	67,70
Corte 05b	156,08	42,90	72,51
Corte 06b	3,68	2,81	23,74
Corte 07b	0,50	0,47	5,81
Corte 08b	5109,95	1739,10	65,97
Corte 09b	4333,19	1471,79	66,03
Corte 10b	3545,37	1072,13	69,76
Corte 11b	1411,09	434,54	69,21
Corte 12b	648,03	213,94	66,99
Corte 13b	147,90	48,27	67,37
Corte 14b	2,00	1,97	1,35

**Fonte:** O Autor.

Na Tabela 6 é possível perceber a dimensão do ganho de performance da utilização do protótipo em um SSD com relação à utilização do mesmo em um HD. Nas imagens testadas com maior dimensão temporal, ou seja, os cortes 01a e 09a, o ganho de performance chega a 71,11% e 67,69%, respectivamente. Imagens com 350 tempos, como é o caso dos cortes 02a, 01b, 10a e 08b, o ganho de performance é semelhante nos dois primeiros casos 68,73% e 71,17% respectivamente e também nos dois últimos casos 68,47% e 65,97% respectivamente.

Imagens médias, com 250 tempos, a redução do tempo chega a 70,82% (corte 04a), 66,79% (corte 03b), 68,50% (corte 12a) e 69,76% (corte 10b). É possível perceber, ao analisar a Tabela 6, que em cortes com mais de 50 tempos e dimensão espacial de 3000×2481 (cortes de 01a a 06a e cortes de 01b a 05b) a média de ganho de performance é de 68,77%. No caso de imagens com dimensão espacial de 5000×6296, o ganho de performance é superior à 60% em imagens com mais de 12 tempos (cortes de 09a a 15a e cortes de 08b a 15b), sendo que a média de redução de tempo neste caso é de 67,23%. Sendo que, em ambos os casos, o ganho é sempre similar em cortes com características semelhantes, apesar de distintos os tipos das imagens originais (multi-bandas ou multi-tempos).

Imagens com apenas dois tempos tem um ganho de performance baixo (2,92% - corte 08a; 5,81% - corte 07b; 2,08% - corte 16a; 1,35% - corte 14b), este fato é justificado

pois devido ao tamanho pequeno da imagem, o hardware consegue trabalhar com grande parte desta na memória principal, reduzindo a necessidade de busca constante de partes da imagem na memória secundária (*swapping*). O mesmo acontece com um corte de dimensão espacial  $3000 \times 2481$  e dimensão temporal de 12 tempos (27,62% - corte 07a; 23,74% - corte 06b).

De forma geral, para imagens com dimensão espacial de  $3000 \times 2481$ , a média de ganho de performance é de 54,38% enquanto a redução de tempo em imagens com dimensão espacial de  $5000 \times 6296$  é, em média, de 58,45%. Isso demonstra que para imagens com maior tamanho total, o ganho de performance também é maior. Essa característica também pode ser percebida ao analisar os ganhos de performance individualmente apresentados na Tabela 6.

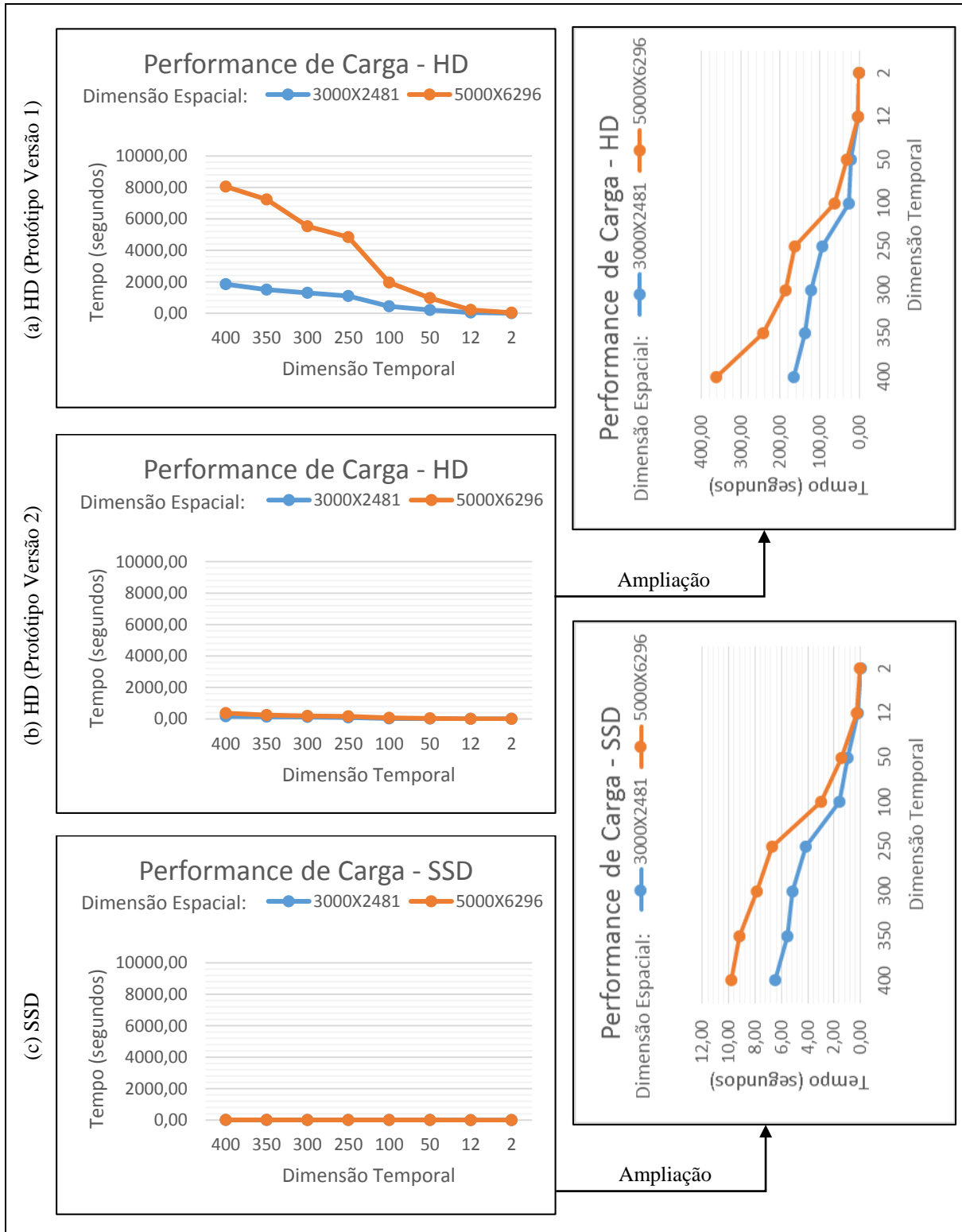
### 3.3.2 Upload do Cubo para Visualização

Após a montagem dos cubos quadridimensionais, existe a necessidade de carregá-lo no protótipo com a finalidade de visualização de uma face da imagem e/ou do espectro temporal de um pixel. Ao realizar o carregamento do cubo temporal no protótipo este realiza uma varredura em todo o cubo a fim de buscar quais são o menor e o maior valores de pixels presentes em todo o cubo 4D.

Para verificar a performance do protótipo nesta etapa, foram carregados os cubos quadridimensionais montados referentes a cada corte, este carregamento foi feito em uma versão inicial do protótipo utilizando HD (Figura 26(a)), onde a tecnologia multi-ponteiros ainda não era utilizada. Também, os testes de carregamento foram realizados na segunda versão do protótipo, cujas técnicas de multi-ponteiros já encontravam-se implementadas, em HD (Figura 26(b)) e SSD (Figura 26(c)). Para melhor visualização, os gráficos presentes na Figura 26 são inicialmente apresentados adotando-se como marcos do eixo y a escala de valores temporais (em segundos) assumida pelo protótipo durante o carregamento do cubo na primeira versão do software. Em um segundo momento, são apresentados novamente os gráficos dos testes realizados na nova versão do protótipo, em suas próprias escalas de tempo (em segundos) de processamento do carregamento de cada cubo 4D.

Na Figura 26 são apresentados os gráficos de performance com relação ao carregamento do cubo quadridimensional, previamente montado, no protótipo. Os gráficos apresentados são referentes aos cubos gerados a partir de imagens multi-bandas, pois a partir deste tipo de imagens foi possível gerar cubos de dimensão temporal 2 até dimensão temporal 400, enquanto a partir de imagens multi-tempos a maior dimensão temporal possível de ser trabalhada foi de 350 tempos.

**Figura 26** – Performance de Carregamento do Cubo 4D.



Fonte: O Autor

Para o carregamento do corte 01a na versão antiga do protótipo, utilizando HD, foi dispendido 1851,92 segundos, para carregar o mesmo corte utilizando a segunda versão do

software (com multi-ponteiros) e HD o tempo de processamento foi 164,60 segundos. É possível perceber que o ganho de performance foi circunstancial (aproximadamente 1687 segundos). O carregamento do corte 09a na versão antiga do protótipo teve 8051,32 segundos de tempo de processamento, enquanto 362,80 segundos para o carregamento na versão recente do protótipo, ou seja, mais de 7688 segundos de tempo economizado. Ao fazer os mesmos testes utilizando SSD, a redução de tempo é ainda maior 6,52 e 9,83 segundos respectivamente para os cortes 01a e 09a.

Cubos de tamanho intermediário, como é o caso daqueles montados a partir dos cortes 04a e 12a, foram carregados em 1097,89 segundos e 4841,63 segundos, respectivamente, na primeira versão do protótipo. Na versão atual do protótipo, utilizando HD, o carregamento se deu em 93,27 (corte 04a) e 164,32 (corte 12a) segundos, e utilizando SSD o tempo foi de 4,12 segundos para o corte 04a e 6,72 segundos para o corte 12a.

Cubos temporais montados a partir de imagens pequenas, com 12 tempos (corte 07a e corte 15a), necessitam, na primeira versão do protótipo, de aproximadamente 47,17 (07a) e 211,62 (15a) segundos para serem carregados. Utilizando HD e a versão do protótipo que possui a implementação de multi-ponteiros, este tempo cai para 3,10 (07a) e 3,42 (15a) segundos. Utilizando multi-ponteiros e SSD, o tempo de processamento do carregamento dos cubos é de 0,17 (07a) e 0,27 (15a) segundos.

No caso de dimensão temporal 2 (corte 08a e 16a), menor dimensão temporal testada, o protótipo precisou, respectivamente e sem utilizar multi-ponteiros, de 5,97 (08a) e 33,17 (16a) segundos para carregar os cubos. Com multi-ponteiros, e processamento realizado com HD 0,02 (08a) e 0,50 (16a) segundos foram os tempos de carregamento dos cubos quadridimensionais. Já com tecnologia SSD, o protótipo necessitou de 0,0 e 0,01 segundos para carregar, respectivamente, os cubos 08a e 16a.

Houve uma melhora significativa ao implementar multi-ponteiros na fase de carregamento da imagem, que pode ser percebida através da visualização dos gráficos apresentados na Figura 26. Melhora esta que é ainda aprimorada ao unir a técnica de multi-ponteiros com as funcionalidades nativas da tecnologia SSD.

A performance de carregamento, utilizando a versão multi-ponteiros do protótipo, dos cubos temporais dos cortes 08a e 16a, demonstra que imagens de baixa dimensão espacial e temporal tem um tempo de processamento similar tanto na utilização de HD quanto na

utilização de SSD. Assim como na montagem dos cubos quadridimensionais, este fato dá-se devido ao tamanho do buffer de memória definido para a fase de carregamento do cubo 4D.

A Tabela 7 mostra o levantamento do ganho de performance no carregamento de um cubo 4D já montado, primeiro no aprimoramento do protótipo ao se implementar multi-ponteiros, ou seja, da versão 1 para a versão 2 do protótipo, ambas testadas em HD. Em seguida, é apresentado o ganho de performance referente apenas à versão 2 do software ao se utilizar HD ou SSD. Todas as demonstrações são apresentadas para todos os cortes.

**Tabela 7 – Ganho de Performance no Carregamento do Cubo 4D.**

Corte	Tempo de Carregamento do Cubo 4D (segundos)		Ganho (%)	Tempo de Carregamento do Cubo 4D (segundos)		Ganho (%)	Ganho Final (%)
	Versão 1 Utilizando HD	Versão 2 Utilizando HD		Versão 2 Utilizando HD	Versão 2 Utilizando SSD		
Corte 01a	1851,92	164,60	91,11	164,60	6,52	96,04	99,65
Corte 02a	1497,66	137,16	90,84	137,16	5,57	95,94	99,63
Corte 03a	1295,40	122,31	90,56	122,31	5,20	95,75	99,60
Corte 04a	1097,89	93,27	91,50	93,27	4,12	95,59	99,62
Corte 05a	439,60	26,00	94,08	26,00	1,62	93,76	99,63
Corte 06a	207,33	20,58	90,08	20,58	0,97	95,30	99,53
Corte 07a	47,17	3,10	93,42	3,10	0,17	94,46	99,64
Corte 08a	5,97	0,02	99,75	0,02	0,00	0,00	100,00
Corte 09a	8051,32	362,80	95,49	362,80	9,83	97,29	99,88
Corte 10a	7232,05	242,94	96,64	242,94	9,20	96,21	99,87
Corte 11a	5528,04	186,16	96,63	186,16	7,91	95,75	99,86
Corte 12a	4841,63	164,32	96,61	164,32	6,72	95,91	99,86
Corte 13a	1956,18	63,06	96,78	63,06	3,01	95,22	99,85
Corte 14a	965,51	32,18	96,67	32,18	1,42	95,59	99,85
Corte 15a	211,62	3,42	98,39	3,42	0,27	92,21	99,87
Corte 16a	33,17	0,50	98,50	0,50	0,01	96,99	99,95

Fonte: O Autor.

A Tabela 7 apresenta a dimensão do ganho de performance da utilização, em HD, do protótipo na versão 2 com relação à versão 1; e, na versão 2, do uso de um SSD com relação à utilização de um HD. Nas imagens testadas com maior dimensão temporal, ou seja, os cortes 01a e 09a, o ganho de performance chega a 91,11% e 95,49%, respectivamente, quando comparadas as versões 01 e 02 do protótipo, e de 96,04% e 97,29%, respectivamente, quando comparada a versão 2 em HD e SSD. A redução final de tempo, se comparando a versão 1 do

protótipo executada em HD e a versão 2 do protótipo em SSD chega a 99,65% (corte 01a) e 99,88% (corte 09a).

Em imagens médias, com 250 tempos, a redução de tempo chega a 91,50% (corte 04a) e 96,61% (corte 12a), na comparação entre a versão 1 e a versão 2 do protótipo. Na comparação da versão 2 em HD e SSD, a redução de tempo é de 95,59% (corte 04a) e 95,91% (corte 12a), ficando estes cortes com uma redução final de 99,62% (corte 04a) e 99,86% (corte 12a).

É possível perceber, ao analisar a Tabela 7, que em todos os cortes a média de ganho de performance é de 94,82% ao se comparar a versão 1 com a versão 2 do protótipo, ambas testadas em HD. Ao se verificar o ganho de performance da versão 2, comparando o desempenho de carregamento do cubo 4D em HD e SSD, a média de ganho é de 89,50%. A redução de ganho de performance se dá visto que na versão 2 do software, o corte 08a foi carregado em tempos muito similares nas duas tecnologias, não havendo, neste caso, ganho de performance. A média geral de ganho de performance no carregamento de cubos 4D é de 99,77%.

A Tabela 7 mostra que, de fato, a melhoria obtida através da implementação de multi-ponteiros é real, chegando a mais de 99% de melhoria de performance no carregamento dos cubos quadridimensionais.

### ***3.3.3 Visualização do Spectro Temporal de um pixel***

Com um cubo quadridimensional carregado no protótipo, é possível realizar a visualização dos espectros-temporais de pixels selecionados. Essa visualização é feita em forma de gráfico, onde os limitantes do eixo  $y$  são o menor e o maior valores de DN coletados do cubo 4D, o eixo  $x$  possui como marcos a dimensão temporal do cubo e a dimensão espectral é representada individualmente (a cada banda) pelas linhas apresentadas no gráfico.

Para verificar a performance do protótipo nesta etapa, foram carregados os cubos quadridimensionais montados referentes a cada corte, este carregamento foi feito em uma versão inicial do protótipo utilizando HD (Figura 27(a)) onde a tecnologia multi-ponteiros ainda não era utilizada. Também, os testes de carregamento foram realizados na segunda versão do protótipo, cujas técnicas de multi-ponteiros já encontravam-se implementadas, em HD (Figura 27(b)) e SSD (Figura 27(c)). Foram coletados cinco pixels aleatórios, do início ao final do cubo, e os valores apresentados são a média aritmética dos valores coletados.

Para melhor visualização, os gráficos presentes na Figura 27 são inicialmente apresentados adotando-se como marcos do eixo  $y$  a escala de valores temporais (em segundos) assumida pelo protótipo durante a coleta no cubo utilizando a primeira versão do software. Em um segundo momento, são apresentados novamente os gráficos dos testes realizados na nova versão do protótipo, em suas próprias escalas de tempo (segundos) de processamento de coleta dos espectros-temporais dos pixels para cada cubo 4D montado.

Assim como relativamente à análise do carregamento de um cubo quadridimensional no protótipo, também é possível perceber na fase de coleta e visualização de um espectro-temporal a melhora de performance obtida com a implementação de multi-ponteiros. A técnica trouxe ao protótipo consideráveis ganhos de performance, que ainda são melhores aproveitados quando da utilização em conjunto com a tecnologia SSD.

Para coletar o espectro-temporal em um cubo de dimensão temporal 400 (cortes 01a e 09a) o protótipo chega a gastar 674,25 (01a) e 2827,24 (09a) segundos quando utilizado na primeira versão do protótipo em HD. A diferença de performance da coleta do espectro-temporal é enorme se comparada à nova versão do protótipo, que gasta aproximadamente 18,99 (01a) e 21,21 (09a) segundos quando utilizada em HD, ou apenas 0,81 (01a) e 0,83 (09a) segundos quando utilizado SSD.

Para a coleta feita em cubos de tamanho médio, 250 tempos, ou seja, cortes 04a e 12a, o protótipo necessita de 362,14 e 1525,38 segundos respectivamente ao se utilizar a primeira versão, sem multi-ponteiros. Realizando a mesma operação na nova versão do protótipo, o tempo gasto é 11,72 (04a) e 12,65 (12a) segundos quando executado em HD, ou de 0,52 (04a) e 0,61 (12a) segundos se utilizar SSD.

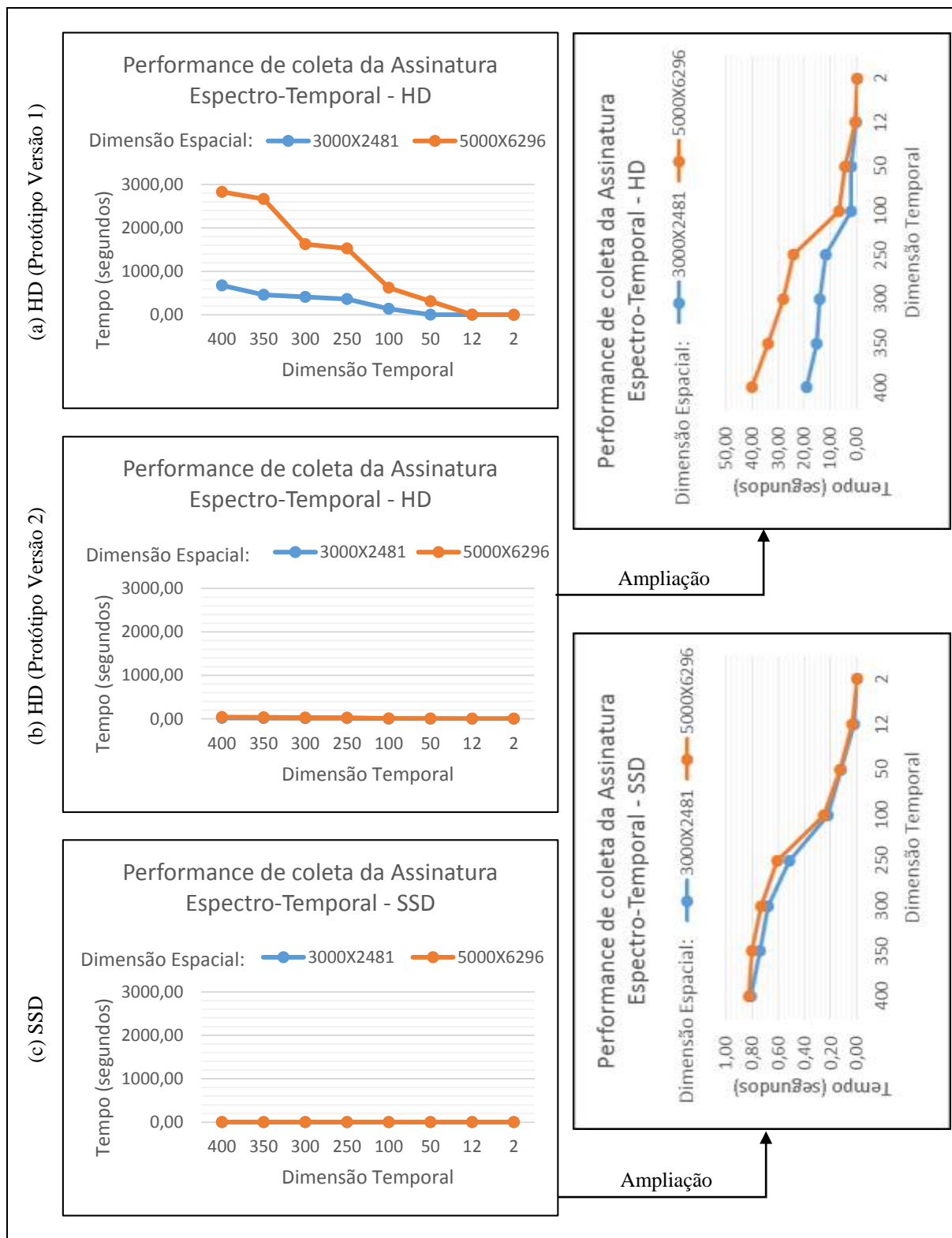
Analisando o tempo de processamento da primeira versão do protótipo na coleta de espectros-temporais em imagens de tamanho pequeno (cortes 07a e 15a), percebe-se que o tempo de coleta reduz sensivelmente, sendo de 0,38 (07a) e 1,41 (15a) segundos, sendo de certa forma, um tempo aceitável. Porém, ao comparar com o tempo de processamento da versão com multi-ponteiros, que é 0,32 (07a) e 0,33 (15a) segundos ao se utilizar HD, ou de 0,03 segundos para ambos os cortes utilizando SSD, percebe-se que ainda existe um grande ganho de performance ao se implementar multi-ponteiros.

Para coletar espectro temporal de cubos gerados a partir dos cortes 08a e 16a, o protótipo dispendeu 0,01 (08a) e 0,25 (16a) segundos quando utilizando a primeira versão do



protótipo em HD e 0,0 segundos quando utilizando a versão multi-ponteiros do software, tanto em HD quanto em SSD.

**Figura 27** – Performance de Coleta da Assinatura Espectro-Temporal.



Fonte: O Autor

É possível perceber que o ganho de performance é proporcional ao tamanho da imagem. Quanto maior a imagem, maior é o ganho de performance na utilização da nova versão do protótipo (com multi-ponteiros), com relação à versão anterior. Ou seja, para cubos com pequenas dimensões temporal e espacial, o ganho de performance existe mas não é tão significativo quanto para a coleta em cubos com grandes dimensões.

A Tabela 8 mostra o levantamento do ganho de performance no carregamento de um cubo 4D já montado, primeiro no aprimoramento do protótipo ao se implementar multi-ponteiros, ou seja, da versão 1 para a versão 2, ambas testadas em HD. Em seguida, é apresentado o ganho de performance referente apenas à versão 2 do software ao se utilizar SSD com relação à utilização de HD. Todas as demonstrações são feitas para todos os cortes.

**Tabela 8** – Ganho de Performance na Coleta da Assinatura Espectro-Temporal.

Corte	Tempo de Coleta da Assinatura (segundos)		Ganho (%)	Tempo de Coleta da Assinatura (segundos)		Ganho (%)	Ganho Final (%)
	Versão 1 Utilizando HD	Versão 2 Utilizando HD		Versão 2 Utilizando HD	Versão 2 Utilizando SSD		
Corte 01a	674,25	18,99	97,18	18,99	0,81	95,75	99,88
Corte 02a	461,21	15,34	96,67	15,34	0,74	95,16	99,84
Corte 03a	410,46	14,00	96,59	14,00	0,68	95,12	99,83
Corte 04a	362,14	11,72	96,76	11,72	0,52	95,58	99,86
Corte 05a	139,29	2,30	98,35	2,30	0,22	90,37	99,84
Corte 06a	2,25	1,67	26,04	1,67	0,12	92,89	94,74
Corte 07a	0,38	0,32	15,55	0,32	0,03	92,10	93,33
Corte 08a	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Corte 09a	2827,24	21,21	99,25	21,21	0,83	96,10	99,97
Corte 10a	2666,40	18,52	99,31	18,52	0,80	95,67	99,97
Corte 11a	1624,48	14,26	99,12	14,26	0,73	94,86	99,95
Corte 12a	1525,38	12,65	99,17	12,65	0,61	95,19	99,96
Corte 13a	624,32	4,81	99,23	4,81	0,25	94,75	99,96
Corte 14a	311,70	2,41	99,23	2,41	0,13	94,68	99,96
Corte 15a	1,41	0,33	76,33	0,33	0,03	89,75	97,57
Corte 16a	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: O Autor.

A Tabela 8 apresenta a dimensão do ganho de performance na coleta da Assinatura Espectro-Temporal quando da utilização, em HD, do protótipo na versão 2 com relação à versão 1; e de sua utilização, na versão 2, em um SSD com relação ao uso em um HD. Nas imagens testadas com maior dimensão temporal, ou seja, os cortes 01a e 09a, o ganho de performance chega a 97,18% e 99,25%, respectivamente, quando comparadas as versões 01 e

02 do protótipo; e de 95,75% e 99,97%, respectivamente, quando comparada a versão 2 em HD e SSD. A redução final, se comparando a versão 1 do protótipo executada em HD e a versão 2 do protótipo em SSD chega a 99,88% (corte 01a) e 99,97% (corte 09a).

Imagens médias, com 250 tempos, a redução de tempo chega a 96,76% (corte 04a) e 99,17% (corte 12a), na comparação entre a versão 1 e a versão 2 do protótipo. Na comparação da versão 2 em HD e SSD é de 95,58% (corte 04a) e 95,19% (corte 12a), ficando estes cortes com uma redução final de tempo de 99,86% (corte 04a) e 99,96% (corte 12a).

Em imagens com 2 tempos, o ganho de performance é de 0,00% (cortes 08a e 16a) em todos os testes, não tendo redução de tempo nem da versão 1 para a versão 2, nem da utilização de SSD com relação à utilização de HD. Isso se dá, em parte devido à ausência de *swapping* e, principalmente, devido à implementação de multi-ponteiros, que tornou o processo de coleta da assinatura espectro-temporal um processo muito rápido, se comparado à versão 1 do protótipo.

É possível perceber, ao analisar a Tabela 8, que em todos os cortes a média de ganho de performance é de 74,92% ao se comparar a versão 1 com a versão 2 do protótipo, ambas testadas em HD. Ao se verificar o ganho de performance da versão 2, comparando o desempenho de carregamento do cubo 4D em HD e SSD, a média de ganho é de 82,37%. A média geral de ganho de performance no carregamento de cubos 4D é de 86,54%.

### 3.4 Conclusões

É constante a necessidade de se analisar as alterações de uso do solo ao longo do tempo. Estudiosos e pesquisadores buscam analisar essas alterações, porém devido às limitações de software para auxiliar neste estudo, a dimensão temporal estudada é limitada. O presente artigo trouxe novos conceitos para a utilização do tempo nesta análise, contribuindo com uma sensível melhoria nos processos que envolvem análises do uso do solo ao longo do tempo.

Foram apresentados dois conceitos chave para a melhor utilização da dimensão temporal na análise de alterações de comportamento espectral. Um deles é a inclusão da dimensão temporal nos conhecidos formatos de dados digitais (BSQ, BIL e BIP), trazendo, então uma nova abordagem para o armazenamento de imagens digitais em disco: formatos TBSQ, TBIL e TBIP, viabilizando o tratamento de dados quadridimensionais (linhas, colunas, bandas e tempos) em arquivos digitais de dados. Estes novos formatos digitais permitem a manipulação temporal dos dados de forma eficiente e eficaz.

Outro conceito apresentado foi a utilização de multi-ponteiros no processamento espectro-temporal das imagens  $n$ -temporais. Este trouxe um ganho significativo de performance para o protótipo, tanto na fase de carregamento do cubo quadridimensional quanto na fase de coleta da assinatura espectro-temporal de um pixel selecionado em uma face do cubo.

Foram realizados testes de performance em três fases do processamento das imagens  $n$ -temporais: na fase de montagem do cubo quadridimensional, na fase de carregamento de um cubo 4D já montado e na fase de coleta da assinatura espectro-temporal de um pixel selecionado. Como esperado, em termos gerais, o tempo de processamento das imagens é diretamente proporcional aos tamanhos das mesmas. Os testes foram realizados em HD e SSD, demonstrando, assim, o aumento da eficiência do protótipo versão 2 quando executado juntamente com a tecnologia SSD. Em imagens pequenas, a diferença de tempo de processamento entre a utilização de HD e SSD é imperceptível ao usuário, uma vez que não acontece *swapping* de disco – a memória principal dos hardwares utilizados foram suficientes para carregar toda a imagem em processamento.

Testes realizados comparando o tempo de processamento da versão inicial (versão 1) do protótipo e o tempo gasto pela versão atual do protótipo (versão 2), onde os conceitos de multi-ponteiros já encontram-se implementados, demonstram a eficiência deste método, apresentando reduções de tempo significativas da primeira versão executada em HD para a nova versão em HD e SSD.

Sendo assim, os experimentos realizados, comprovaram a eficiência dos conceitos propostos, demonstrando na prática as vantagens que sua utilização traz para a análise do espectro ao longo do tempo.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E INDICAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A necessidade de verificação e análise das mudanças de uso do solo ao longo do tempo está presente em diversas pesquisas e, até a conclusão deste trabalho, nenhuma das técnicas aplicadas abordava de forma totalmente eficaz e eficiente o estudo de uma quantidade grande de tempos.

O principal objetivo do estudo era contribuir com a área de geoprocessamento no que se refere ao melhoramento de métodos e técnicas que subsidiem as análises de mudanças de uso do solo ao longo do tempo. Este foi alcançado, como pode ser percebido nas análises e conclusões apresentadas no artigo final (capítulo 3).

Para facilitar o estudo da dimensão tempo, no que diz respeito à imagens digitais de satélites, foi proposto um novo formato de dado quadridimensional (linhas, colunas, bandas e tempos), assim como novos formatos de armazenamento para esses dados (TBSQ, TBIL e TBIP), que, baseados nos principais formatos conhecidos (BSQ, BIL e BIP), acrescentam a dimensão tempo à estes, possibilitando a manipulação de arquivos quadridimensionais.

Foi desenvolvido um protótipo para testar os métodos propostos. Em um primeiro momento, o desempenho do protótipo deixou a desejar, então foi implementada uma técnica de multi-ponteiros, que tornou o protótipo mais rápido, conforme apresentado nas análises feitas no capítulo 03. A versão final do protótipo é eficaz, visto que possibilita a montagem do cubo quadridimensional e seu armazenamento em disco; possibilita o carregamento de imagens tridimensionais e cubos quadridimensionais a fim de visualizá-los e coletar assinaturas espectro-temporais de pixels selecionados. Além disso, é uma versão eficiente, visto que demonstrou performance satisfatória em todas as fases de teste.

Todos os métodos propostos foram testados no protótipo desenvolvido para esta finalidade. Os testes foram realizados com diversas imagens com dimensões espacial e temporal diferentes, ficando, ao final dos testes, comprovado que os métodos são eficazes e o protótipo é eficiente naquilo que se propõe.

A fim de visualizar as assinaturas espectro-temporais de um cubo quadridimensional, foi desenvolvida uma interface contendo um gráfico que apresenta as alterações de valores digitais de cada banda ao longo do tempo de um pixel selecionado, e também mostra as alterações de valores digitais em uma figura apresentada em tons de cinza.

O protótipo desenvolvido como meio para teste dos métodos propostos será parte integrante do software ABÍLIO, ficando também disponível para utilização no Laboratório de

Pesquisas Avançadas e Geoprocessamento (LaPAGeo) do Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente (PPSTMA) do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA).

Como trabalhos futuros, as técnicas de tratamento de dados quadridimensionais aqui apresentadas poderão ser utilizadas na implementação de classificadores multi-dimensionais de imagens de sensores remotos. A forma de visualização pode ser ainda melhorada através da aplicação de técnicas de computação gráfica, a fim de se ter uma visualização tridimensional (superfície) utilizando bibliotecas gráficas como OpenGL (*Open Graphics Library*) e DirectX<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Tecnologia que ajuda a criar os efeitos especiais visuais e de áudio de programas Gráficos. Pode ajudar a melhorar o desempenho de programas de multimídia que consumam muitos recursos.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, B.; PETTERSEN, P.-G. **Benchmarking Handbook**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 1995. p. 192
- CARREIRA, J. C. et al. Técnicas de Sensoriamento remoto aplicadas à análise da cobertura vegetal no município de JI-Paraná/RO. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, v. 1, n. 1, p. 38–43, 2012.
- CARVALHO, A. P. F. et al. Análise Multitemporal de Imagens NDVI em Ações de Reforma Agrária. **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 139–152, 2002.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. Processamento e análise de imagens multitemporais para o perímetro de irrigação de Gorutuba (MG). **Anais Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. XII, p. 473–480, 2005.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. Classificação de Padrões de Savana Usando Assinatura Temporais NDVI do Sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 505–517, 2008.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. Avaliação dos Classificadores Espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Espectral Correlation Mapper em Séries Temporais NDVI-MODIS no Campo de Instrução Militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 4, p. 399–412, 2009.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. A New Approach to Change Vector Analysis Using Distance and Similarity Measures. **Remote Sensing**, v. 3, n. 12, p. 2473–2493, 18 nov. 2011.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; HERMUCHE, P. M.; GUIMARÃES, R. F. Identificação Regional da Floresta Estacional Decidual na Bacia do Rio Paranã a Partir da Análise Multitemporal de Imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 319–332, 2006.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SILVA, N. C. Detecção de Mudança Espectral uma nova metodologia para análise de séries temporais. **Anais Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. XIII, p. 5635–5641, 2007.
- COUTO, E. V.; SOUZA FILHO, E. E.; HAYAKAWA, E. H. Análise das modificações da cobertura vegetal da planície fluvial do alto rio Paraná no período entre 1976 e 2007. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 2, p. 205–213, 2011.
- COUTO JÚNIOR, A. F. et al. Identificação das Assinaturas Temporais NDVI das Principais Fisionomias da Região do Ecomuseu do Cerrado. **Espaço & Geografia**, v. 10, n. 1, p. 173–189, 2007.
- DAN SCIENTIA. **Espectro**, 2010. Disponível em:  
<[http://2.bp.blogspot.com/\\_JDeDgbdDHa0/S6u0wkYWu1I/AAAAAAAAARw/oCoXyp8qRus/s1600/espectro.jpg](http://2.bp.blogspot.com/_JDeDgbdDHa0/S6u0wkYWu1I/AAAAAAAAARw/oCoXyp8qRus/s1600/espectro.jpg)>

- DIAS, T. DE L.; CÂMARA, G.; DAVIS JR., C. A. Modelos espaço-temporais. In: CASANOVA, M. A. et al. (Eds.). . **Bancos de Dados Geográficos**. 1. ed. Curitiba: Editora Mundogeo, 2005. p. 147–179.
- DIEDRICH, T. J.; NARVAES, I. DA S. Técnicas de Detecção de Mudanças em Áreas Urbanas de Brasília. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 3, p. 493–509, 2013.
- FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. [s.l.] Oficina de Textos, 2002. p. 97
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. p. 128
- GOMES, D. D. M. et al. Análise multitemporal do processo de degradação da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Jaibas no Estado do Ceará. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 15, n. 2, p. 41–62, 2011.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento Digital De Imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Pretience Hall, 2010. p. 624
- GURMESSA, D.; NEMOMISSA, S.; TADESSE, G. Borana Rangeland change from 1986-2003: the application of Remote Sensing and GIS. **Proceedings of Global Geoespatial Conference**, v. 4, n. 8, 2013.
- INPE. **Os Satélites LANDSAT 5 e 7**. Disponível em: <[http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57\\_PT.php](http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php)>.
- IOANNIS, M.; MILIADIS, M. Multi-temporal Landsat image classification and change analysis of land cover/use in the Prefecture of Thessaloiniki, Greece. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v. 1, n. 1, p. 15–25, 2011.
- JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING. Data Used in Remote Sensing. In: **Remote Sensing Note**. [s.l: s.n.].
- KAMPEL, M.; AMARAL, S.; SOARES, M. L. G. **Imagens CCD/CBERS e TM/Landsat para análise multi-temporal de manguezais no Nordeste brasileiro. Um estudo no litoral do Estado do Ceará**XII Simpósio Brasileiro de .... **Anais...**Goiânia: INPE, 2005Disponível em: <<http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2013
- KOZAK, M. **Destination Benchmarking: Concepts, Practices and Operations**. [s.l.] CABI, 2004. p. 216
- LIEW, S. C. **Principles of Remote Sensing - Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing, CRISP**. Disponível em: <<http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/image.htm>>.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.



LORENA, R. B. et al. **Dados multitemporais de sensoriamento remoto para a análise da dinâmica do uso e da cobertura da terra na região do Peixoto (AC)**X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...**Foz do Iguaçu: INPE, 2001Disponível em: <<http://urlib.net/rep/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.10.20?languagebutton=en>>

LORENA, R. B.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Técnica de Detecção de Mudanças Aplicada em Imagens de Satélite como Ferramenta de Monitoramento de Uso e Cobertura da Terra na Amazônia Ocidental (Acre). **Espaço & Geografia**, v. 7, n. 1, p. 47–76, 2004.

MATA, C. L. et al. Avaliação Multitemporal da Susceptibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (MG) por Meio da Equação Universal de Perda de Solos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 57–71, 2007.

MENKE, A. B. et al. Análise das Mudanças do Uso Agrícola da Terra a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto Multitemporal no Município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 3, p. 315–326, 2009.

MONTABONE, S. **Beginning Digital Image Processing: Using Free Tools for Photographers**. New York: Apress, 2010.

MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 223–231, 2004.

MUNDOGEO. **Comportamentos Espectrais**, 2004. Disponível em: <<http://mundogeo.com/wp-content/uploads/2000/portugues/infogeo/n-33/pag32-2.jpg>>

OLIVEIRA, E. S. Estudo Preliminar Sobre a Evolução do Uso e Ocupação do Solo no Município de Planaltina de Goiás. **GeoTemas**, v. 3, n. 1, p. 111–123, 2013.

PETROU, M.; PETROU, C. **Image Processing: The Fundamentals**. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

QIAN, S.-E. **Optical Satellite: Signal Processing and Enhancement**. Bellingham: Spie Press, 2013.

QIN, J.; CHAO, K.; KIM, M. S. Raman Chemical Imaging System for Food Safety and Quality Inspection. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, n. 6, p. 1873–1882, 2010.

SANTANA, O. A. et al. Modelagem de Espectros Temporais NDVI-MODIS, no Período de 2000 a 2008 na Bacia do Rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 1, p. 47–60, 2010.

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento Remoto e suas Aplicações para Recursos Naturais**.

Disponível em:

<<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm#tania>>. Acesso em: 28 jan. 2015.

SCHEER, M. A. P. DA S.; ROCHA, J. V. Detecção de Mudanças no Uso da Terra no Município de Sertãozinho (SP) por Meio de Técnicas de Geoprocessamento, 1981 – 2001. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 02, p. 163–174, 2006.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3th. ed. California: Elsevier, 2007. p. 515

SHAIKH, A. A.; GOTOH, K.; TACHIIRI, K. Multi-temporal Analysis of Land Cover Changes in Nagasaki City Associated with Natural Disasters Using Satellite Remote Sensing. **Journal of Natural Disaster Science**, v. 27, n. 1, p. 9–15, 2005.

SHARMA, P. **Software Engineering**. New Delhi: APH Publishing Corporation, 2004.

SILVA, N. C. et al. Change Detection Software Using Self-Organizing Feature Maps. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 4, p. 505–518, 2012.

STALLINGS, W. **Arquitetura e Organização de Computadores: Projeto para o Desempenho**. São Paulo: Pretience Hall, 2002.

TEIXEIRA, F. R. **Detecção de mudanças na paisagem em área de Floresta Tropical utilizando técnicas de sensoriamento remoto e imagens LANDSAT TM**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 2008.

VAN DE VOORDE, T.; DEMARCHI, L.; CANTERS, F. Multi-temporal spectral unmixing to characterise urban change in the Greater Dublin area. **Remote Sensing for a Changing Europe**, p. 276 – 283, 2009.

VIEIRA, C. H. S. D.; BIONDI, D. Análise da Dinâmica da Cobertura Vegetal de Curitiba, PR (de 1986 a 2004), Utilizando Imagens LANDSAT TM. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 479–487, 2008.

WOODSIDE, M.; FRANKS, G.; PETRIU, D. C. **The Future of Software Performance Engineering** Future of Software Engineering (FOSE '07). **Anais...IEEE**, maio 2007 Disponível em:  
<[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4221619&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4221619](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4221619&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4221619)>. Acesso em: 20 dez. 2014

ZHOU, W.; TROY, A.; GROVE, M. Object-based Land Cover Classification and Change Analysis in the Baltimore Metropolitan Area Using Multitemporal High Resolution Remote Sensing Data. **Sensors**, v. 8, p. 1613–1636, 2008.

CARREIRA, Jéssica C.; RUDKE, Anderson P.; BRITO, Agni C. C.; BEZERRA, Rafael R.; SANTOS, Alex M.. **Técnicas de Sensoriamento Remoto Aplicadas à Análise da**

**Cobertura Vegetal no Município de JI-Paraná/RO (1991-2010).** Revista Brasileira de Ciências da Amazônia, Rolim de Moura, vol.1, n.1 p.38-43, 2012.

CARVALHO, Ana P. F.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; GUIMARÃES, Renato F.; MARTINS, Éder S.; ROCHA, Vera M. S.; CÉSAR, Carlota S.. **Análise Multitemporal de Imagens NDVI em Ações de Reforma Agrária.** Espaço & Geografia, [s.l.], vol.5, n.1, p.139-152, 2002.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; COUTO JÚNIOR, Antonio F.; SILVA, Nilton C. MARTINS, Éder S. CARVALHO, Ana P. F.; GOMES, Roberto A. T.. **Avaliação dos Classificadores Espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Espectral Correlation Mapper em Séries Temporais NDVI-MODIS no Campo de Instrução Militar de Formosa (GO).** Revista Brasileira de Cartografia, [s.l.], vol.61, n.4, p.399-412, 2009.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar A., GUIMARÃES, Renato F.; CARVALHO, Ana P. F.; GOMES, Roberto A. T.; MELO, Aristóteles F. M.; SILVA, Paulo A.. **Processamento e Análise de Imagens Multitemporais para o Perímetro de Irrigação de Gortuba (MG).** Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, vol.7, p.473-480, 2005.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; GUIMARÃES, Renato F.; GILLESPIE, Alan R.; SILVA, Nilton C.; GOMES, Roberto A. T.. **A New Approach to Change Vector Analysis Using Distance and Similarity Measures.** Remote Sensing, [s.l.], n.3, p.2473-2493, 2011.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; HERMUCHE, Potira M.; GUIMARÃES, Renato F.. **Identificação Regional da Floresta Estacional Decidual na Bacia do Rio Paranã a Partir da Análise Multitemporal de Imagens MODIS.** Revista Brasileira de Geofísica, [s.l.], n.24, vol.3, p.319-332, 2006.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; SAMPAIO, Cárta S.; SILVA, Nilton C.; COUTO JÚNIOR, Antonio F.; GOMES, Roberto A.; CARVALHO, Ana P. F.; SHIMABUKURO, Yosio E.. **Classificação de Padrões de Savana Usando Assinatura Temporais NDVI do Sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros.** Revista Brasileira de Geofísica, [s.l.], n.26, v.4, p.505-517, 2008.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; SILVA, Nilton C.. **Detecção de Mudança Espectral uma Nova Metodologia para Análise de Séries Temporais.** Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, vol.8, p.5635-5641, 2007.

COUTO, Edivando V., SOUZA FILHO, Edvard E.; HAYAKAWA, Ericson H.. **Análise das Modificações da Cobertura Vegetal da Planície Fluvial do Alto Rio Paraná no Período entre 1976 e 2007.** Acta Scientiarum. Technology, vol.33, n.2, p.205-213, 2011.

COUTO JÚNIOR, Antonio F.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; MARTINS, Éder S.; ENCINAS, José I.. **Identificação das Assinaturas Temporais NDVI das Principais Fisionomias da Região do EcoMuseu do Cerrado.** Espaço & Geografia, [s.l.], vol.10, n.1, p.173-189, 2007.

DAN SCIENTIA. **Espectro.** [2010?]. Altura: 428 pixels. Largura: 800 pixels. 91 dbi. 32,4 Kb. Formato JPEG. Disponível em: <[http://2.bp.blogspot.com/\\_JDeDgbdDHa0/S6u0wkYWu1I/AAAAAAAAARw/oCoXyp8qRus/s1600/espectro.jpg](http://2.bp.blogspot.com/_JDeDgbdDHa0/S6u0wkYWu1I/AAAAAAAAARw/oCoXyp8qRus/s1600/espectro.jpg)>. Acesso em: 08 dez. 2013.

DIAS, Taciana de L.; CÂMARA, Gilberto; DAVIS JR., Clodoveu. A.. Modelos espaço-temporais. In: CASANOVA, Marco A.; CÂMARA, Gilberto; DAVIS JR., Clodoveu A.; VINHAS, Lúbia; QUEIROZ, Gilberto R. et al. (Org. e Ed.). **Bancos de Dados GeoGráficos**. Curitiba: Editora Mundogeo, 2005. Cap. 4.

DIEDRICH, Tiago J.; NARVAES, Igor S.. **Técnicas de Detecção de Mudanças em Áreas Urbanas de Brasília.**” Revista Brasileira de Cartografia, [s.l.], vol.65, n.3, p.493–509, 2013.

FLORENZANO, Tereza G.. **Imagens de Satélites para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FLORENZANO, Tereza. G.. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GOMES, Daniel D. M.; MENDES, Lúcia M. S.; MEDEIROS, Cleyber N.; VERÍSSIMO, Cesar U. V.. **Análise Multitemporal do Processo de Degradação da Vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio Jaibas no Estado do Ceará**. Geografia Ensino & Pesquisa, [s.l.], vol.5, n.2, p.41–62, 2011.

GONZALES, Rafael C.; WOODS, Richard E.. **Processamento Digital de Imagens**. Tradução YAMAGAMI, Cristina; PIAMONTE, Leonardo. 3.ed. São Paulo: Pearson Pretience Hall, 2010.

GURMESSA, Dessalegn; NEMOMISSA, Sileshi; TADESSE, Girma. **Borana Rangeland Change from 1986-2003: The application of remote sensing and GIS**. Proceedings of Global Geospatial Conference, Addis Ababa, vol.4, n.8.

INPE. **Os Satélites LANDSAT 5 e 7**. Disponível em: <[http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57\\_PT.php](http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php)>. Acesso em: 08 dez. 2013.

IOANNIS, Meliadi; MILIADIS, Miltiadis. **Multi-Temporal Landsat Image Classification and Change Analysis of Land Cover/use in the Prefecture of Thessaloiniki, Greece**. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, vol.1, n.1, p.15–25, 2011.

JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING. Data Used in Remote Sensing. **Remote Sensing**. [s.l.]: JARS, [s.d.]. Cap. 6.

KAMPEL, Milton; AMARAL, Silvana; SOARES, Mário L. G.. 2005. **Imagens CCD/CBERS e TM/Landsat para Análise Multi-Temporal de Manguezais no Nordeste Brasileiro**. Um Estudo no Litoral do Estado do Ceará. Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, vol.7, p.979–86, 2005.

LORENA, Rodrigo B.; SANTOS, João R.; SHUMABUKURO, Yosio E.. **Técnicas de Detecção de Mudanças Aplicada em Imagens de Satélite como Ferramenta de Monitoramento de Uso e Cobertura da Terra na Região da Amazônia Ocidental (Acre)**. Espaço & Geografia, [s.l.], vol.7, n.1, p.47-76, 2004.

LORENA, Rodrigo B.; SANTOS, João R.; SHIMABUKURO, Yosio E.; SANT'ANNA, Henrique M.; SANT'ANNA, Hiromi S. S.; MENEZES, Roney S.. **Dados Multitemporais de Sensoriamento Remoto para a Análise da Dinâmica do Uso e da Cobertura da Terra na**

**Região do Peixoto (AC).** Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, vol.10, p.1653-1656, 2001.

MATA, Clarisse L.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; CARVALHO, Ana P. F.; GOMES, Roberto A. T.; MARTINS, Éder S.; GUIMARÃES, Renato F.. **Avaliação Multitemporal da Susceptibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (MG) por Meio da Equação Universal de Perda de Solos.** Revista Brasileira de Geomorfologia, [s.l.], vol.8, n.2, p.57–71, 2007.

MENKE, Aline B.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; GOMES, Roberto A. T.; MARTINS, Éder S.; OLIVEIRA, Sandro N.. **Análise das Mudanças do Uso Agrícola da Terra a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto Multitemporal no Município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil).** Sociedade & Natureza, Uberlândia, vol.21, n.3, p.315–326, 2009.

MOREIRA, Maurício A.; ADAMI, Marcos; RUDORFF, Bernardo F. T.. **Análise Espectral e Temporal da Cultura do Café em Imagens Landsat.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, [s.l.], vol.39, n.3, p.223–231, 2004.

MUNDOGEO. **Comportamentos Espectrais.** [2004?]. Altura: 261 pixels. Largura: 491 pixels. 96 dbi. 33,5 Kb. Formato JPEG. Disponível em: <<http://mundogeo.com/wp-content/uploads/2000/portugues/infogeo/n-33/pag32-2.jpg>>. Acesso em: 02 set. 2012.

Oliveira, Elton S.. **Estudo Preliminar Sobre a Evolução do Uso e Ocupação do Solo no Município de Planaltina de Goiás.** GeoTemas, [s.l.], vol.3, n.1, p.111–123, 2013.

QIN, J.; CHAO, K.; KIM, M. S.. **Raman Chemical Imaging System for Food Safety and Quality Inspection.** American Society of Agricultural and Biological Engineers, [s.l.], vol.53, n.6, p.1873–1882, 2010.

SANTANA, Otacílio A.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; PIMENTEL, Concepta M. M.; GOMES, Roberto A. T.; OLIVEIRA, Sandro N.. **Modelagem de Espectros Temporais NDVI-MODIS, no Período de 2000 a 2008 na Bacia do Rio Paracatu, Brasil.** Revista Brasileira de Geofísica, [s.l.], vol.28, n.1, p.47–60, 2010.

SAUSEN, Tania M.. **Sensoriamento Remoto e Suas Aplicações para Recursos Naturais.** Disponível em < <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm#tania> >. Aceso em 18 de fev. de 2012.

SCHEER, Marcia A. P. S.; ROCHA, Jansle V.. **Deteção de Mudanças no Uso da Terra no Município de Sertãozinho (SP) por Meio de Técnicas de Geoprocessamento, 1981 – 2001.** Revista Brasileira de Cartografia, [s.l.], vol.58, n.2, p.163–174, 2006.

SCHOWENGERDT, Robert A. 2007. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing.** 3a ed. California: Elsevier, 2007.

SHAIKH, Asif A.; GOTOH, Keinosuke; TACHIIRI, Kaoru. **Multi-Temporal Analysis of Land Cover Changes in Nagasaki City Associated with Natural Disasters Using Satellite Remote Sensing.** Journal of Natural Disaster Science, [s.l.], vol.27, n.1, p.9–15, 2005.

SILVA, Nilton C.; CARVALHO JÚNIOR, Osmar A.; ROSA, Antonio N. C. S.; GUIMARÃES, Renato F.; GOMES, Roberto A. T.. **Change Detection Software Using Self-Organizing Feature Maps.** Revista Brasileira de Geofísica, [s.l.], vol.30, n.4, p.505–518, 2012.

TEIXEIRA, Fabrício R.. **Detecção de mudanças na paisagem em área de Floresta Tropical Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto e Imagens LANDSAT TM**. Rio de Janeiro: UFRRJ, 2008.

VAN DE VOORDE, T.; DEMARCHI, L.; CANTERS, F.. **Multi-Temporal Spectral Unmixing to Characterise Urban Change in the Greater Dublin Area**. Remote Sensing for a Changing Europe, p.276–83, 2009.

VIEIRA, Carolina H. S. D.; BIONDI, Daniela. 2008. **Análise da Dinâmica da Cobertura Vegetal de Curitiba, PR (de 1986 a 2004), Utilizando Imagens LANDSAT TM**. Revista *Árvore*, [s.l.], vol.32, n.3, p.479–87, 2008.

ZHOU, Weiqi; TROY, Austin; GROVE, Morgan. **Object-Based Land Cover Classification and Change Analysis in the Baltimore Metropolitan Area Using Multitemporal High Resolution Remote Sensing Data**. *Sensors*, [s.l.], vol.8, p.1613–1636, 2008.

## APÊNDICE 01 – ARTICLE

### 1. MULTI-DIMENSIONAL SPATIAL DATA MODELING

#### 1.1 Introduction

Natural resources and the terrestrial environment are in constant change, in times due to natural evolution, in others due to human activities on the latter. The complex interrelationship of the phenomena that causes such changes must be understood through observation of a “large range of time and space scales”. The most effective and economic manner of collecting the necessary data in order to track such phenomena is the observation of the Earth through satellites (SAUSEN, 2012).

Remote sensing satellites, launched into orbit from the 1970s on (SAUSEN, 2012), provide digital images of the Earth’s surface. “A digital image may be considered as a matrix which line and column indexes identify a dot in the image, and the corresponding value of such element in the matrix identifies the gray levels in that dot.” (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Time is continuous by its nature, however, in order to be computationally displayed, one requires a discrete approach, where time variations may be displayed by a specific time line according to the desired frequency (DIAS; CÂMARA; DAVIS JR., 2005). As portrayed by Sausen (2012), in order to better understand the modifications that the terrestrial environment and natural resources experience, one requires the analysis of such environment not only in one single time and space, but multiplying these quantities.

This treatise proposes an approach through which one can analyze an image with  $k$ -bands, in  $n$ -times simultaneously, so that the common digital image, three-dimensional (lines, columns, and bands), is then analyzed taking into consideration the time dimension, becoming the latter four-dimensional (lines, columns, bands, and times). Therefore, conventional data storage formats (BSQ, BIL and BIP) have been refurbished, adding the time dimension.

In order to test the proposed new data storage formats, a prototype was developed in two stages. In the first version of the prototype, the tests were run on a considerable time, prompting the need to improve the efficiency of the implemented algorithms. For the second version of the prototype, then multi-pointers techniques were implemented, which brought significant gains in performance to the original prototype.

This study has innumerable applications, from the simple recognition of the concentration of vegetation in a specific area, to its estimated future changes, grounded on its standard chart of past changes in that region. Through the multi-times study of a region, the recognition of alteration patterns in soil usage, and how the latter evolved through time, becomes available.

## **1.2 Results and Discussion**

### ***1.2.1 New Data Formats for Remote Sensing Images***

Multi-bands images are stored in disc or tape and are displayed through a combination between the space dimension (lines and columns) and bands. Such storage can be presented in three formats: BSQ, BIL, and BIP (JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING, [s.d.]; QIN; CHAO; KIM, 2010; SCHOWENGERDT, 2007). This treatise proposes a new format for arranging digital images from remote sensors, the time dimension (Times) is added to the original formats, creating the new TBSQ, TBIL, and TBIP formats.

On the TBSQ data format (Time and Band SeQuential), the space data in each complete band of the image are displayed separately in sequence, and the procedure is repeated for each time of the image. On the TBIL format (Time and Band Interleaved by Line), the data in the lines in each band in a specific image time are displayed in order, according to the quantity of bands and times, so that this process repeats itself for the amount of image lines. On the other hand, the TBIP format (Time and Band Interleaved by Pixel) is an organization method in which a set of multi-bands and multi-times data, related to each pixel, is displayed according to the quantity of pixels and lines in the image.

Figure 1 exemplifies how an image with a space dimension of 2 lines by 2 columns, spectral dimension of 3 bands, and time dimension of 2 times, is stored in disc in each of the proposed three new digital storage formats: TBSQ (a), TBIL (b), and TBIP (c). The flow shown in arrows on the left side of each data type enables to realize the storage sequence of pixels.

Data stored in TBSQ format, Figure 1a, has all the pixels of a line in a band, stored in sequence, then all pixels in the next line, and the process repeats until the end of the band involved, starting then the next band until all the time be stored, repeating the process for the next time until the entire image is stored.



The data stored in TBIL format, Figure 1b, the pixels are arranged, all the pixels of one line in one band are stored in sequence, accordingly pixels are in the same line in the next band, and the process is repeated until the last band of the image, then all pixels in the next line of the first band will be stored, and the process repeats until all the time is stored, starting a new cycle for each next time until the entire image is stored images stored.

In the TBIP storage format, Figure 1c, the first pixel of the first line of the first band is stored, then the first pixel of the first line of the next band, the process is repeated until the last band, and then second pixel of the first line of the first band is stored and the process repeats until the end of the first line, passing to the second line and so on until all the time is stored, repeating the process for the next time until the end of image.

As seen in figure 1, the position of one pixel located in such four-dimensional space (line, column, band, and time) varies according to its storage format.

The following function  $f: Z^4 \rightarrow Z$  charts the memory address of a random pixel in a TBSQ image stored in disc:

$$f(l, c, b, t) = ((t \cdot QtB \cdot QtL \cdot QtC) + (b \cdot QtL \cdot QtC) + (l \cdot QtC) + c) \cdot TP \quad (1)$$

where:  $l$  = the pixel line,  $c$  = the pixel column,  $b$  = the pixel band,  $t$  = the pixel time,  $QtB$  = the amount of bands in the image,  $QtL$  = the amount of lines in the image,  $QtC$  = the amount of columns in the image, and  $TP$  = the pixel size in *bits*.

The function  $g: Z^4 \rightarrow Z$  maps the memory address of a random pixel in a TBIL image stored in disc:

$$g(l, c, b, t) = ((t \cdot QtB \cdot QtL \cdot QtC) + (b \cdot QtC) + (c \cdot b \cdot QtC) + c) \cdot TP \quad (2)$$

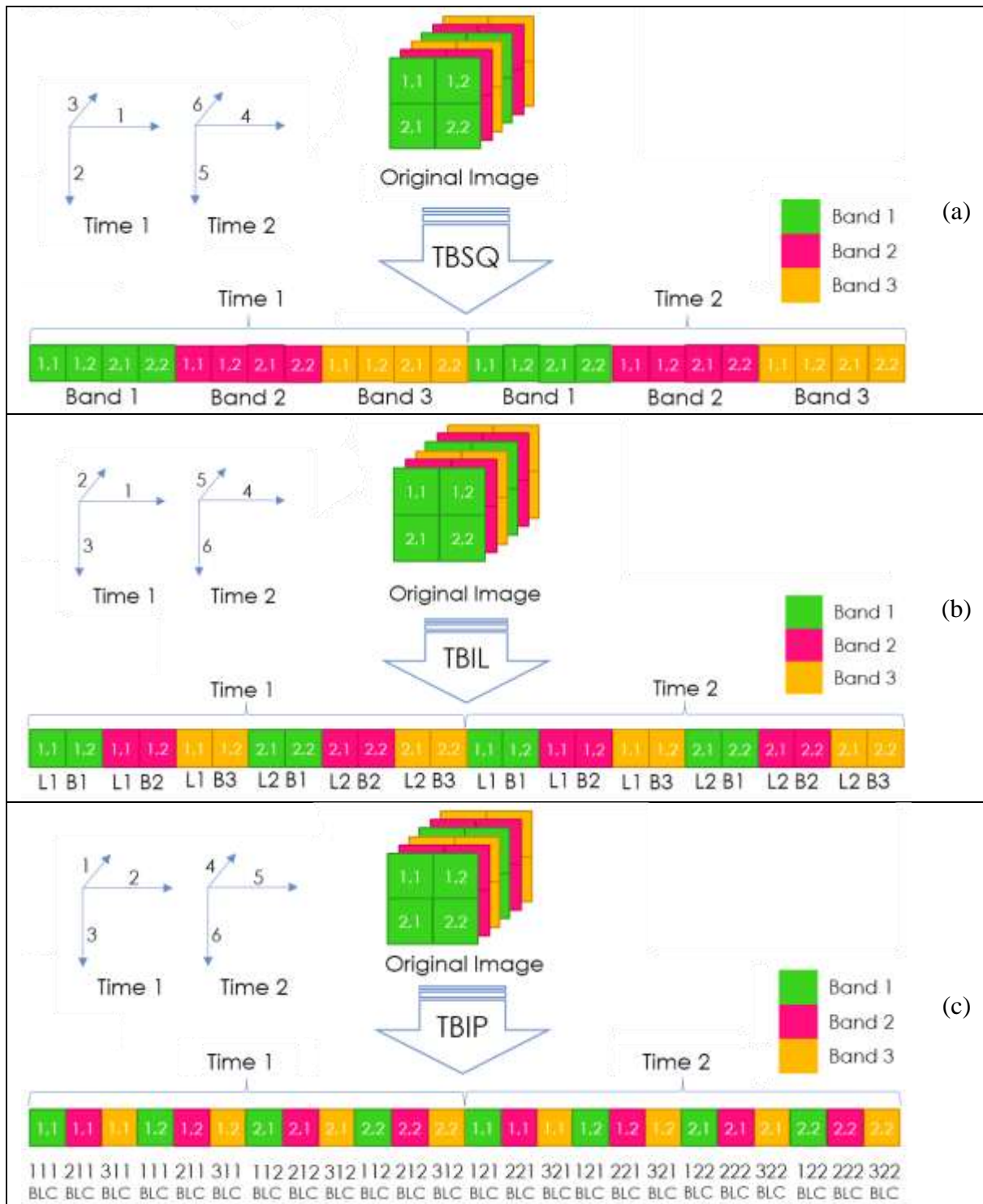
where:  $l$  = the pixel line,  $c$  = the pixel column,  $b$  = the pixel band,  $t$  = the pixel time,  $QtB$  = the amount of bands in the image,  $QtL$  = the amount of lines in the image,  $QtC$  = the amount of columns in the image, and  $TP$  = the pixel size in *bits*.

The function  $h: Z^4 \rightarrow Z$  maps the memory address of a random pixel in a TBIP image stored in disc:

$$h(l, c, b, t) = ((t \cdot QtB \cdot QtL \cdot QtC) + (l \cdot QtB \cdot QtC) + (c \cdot QtB) + b) \cdot TP \quad (3)$$

where:  $l$  = the pixel row,  $c$  = the pixel column,  $b$  = the pixel band,  $t$  = the pixel time,  $QtB$  = the amount of bands in the image,  $QtL$  = the amount of lines in the image,  $QtC$  = the amount of columns in the image, and  $TP$  = the pixel size in *bits*.

**Figure 1** – The new TBSQ, TBIL e TBIP Data Formats.



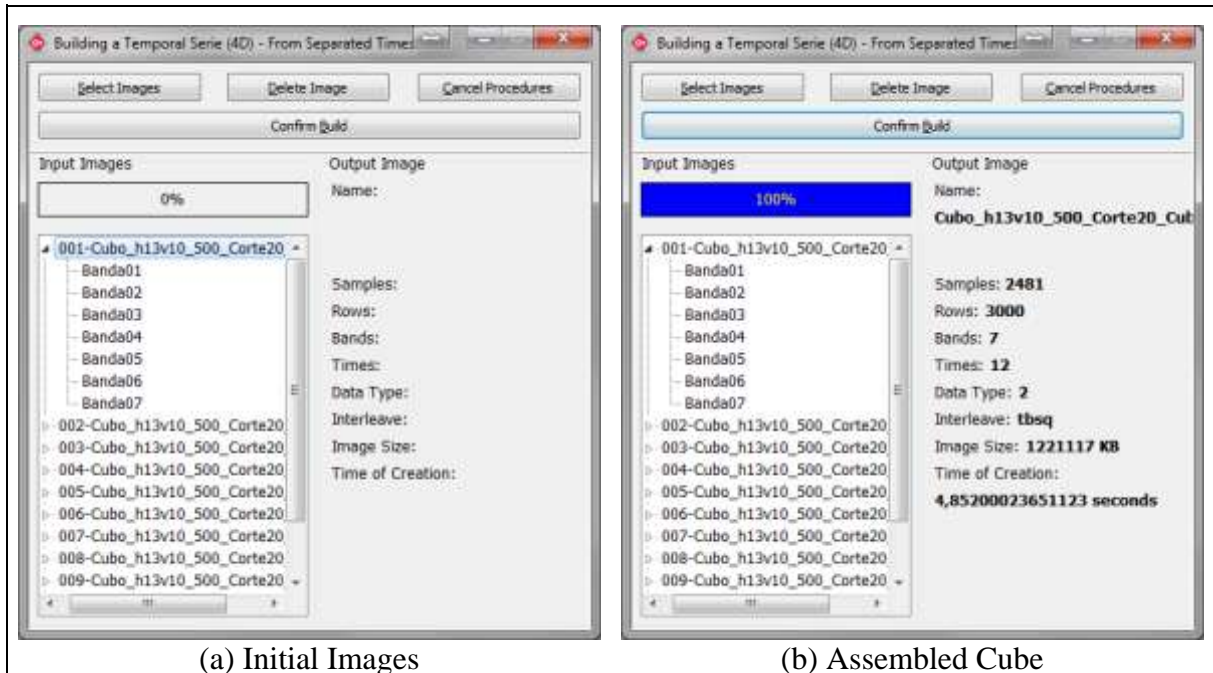
Fonte: O Autor

*1.2.1.1 Assembling the 4D Cube*

Figure 2 presents the interfaces for the temporal cube in the prototype. The first image (2a) brings the initial assembly phase, when solely the origin images were selected

through the “Select Images” button. On the other hand, the second figure (2b) displays the following stage, after the temporal series assembly through the “Confirm Build” button, when the information attaining the temporal cube is displayed on the interface and the cube, and its header, is assembled, being filed in disc. The moment shown in Figure 2b both temporal cube mounted as its header are ever stored on disk.

**Figure 2 – Prototype: 4D Cube Mounting.**

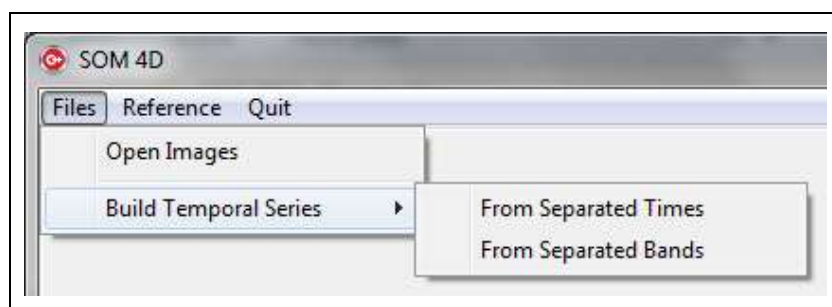


Fonte: The Author

The prototype in focus assembles temporal series in the TBSQ format from “multi-times” or “multi-bands” images, i.e., the original images may be stored so that 1 time encompasses  $k$ -bands (“multi-times”) or that 1 band encompasses  $n$ -times (“multi-bands”).

It is possible to select the entry image type (Figure 3), from which the final temporal series, in the TBSQ format, is assembled.

**Figure 3 – Prototype: Selecting the Entry Images for Mounting the 4D Cube.**



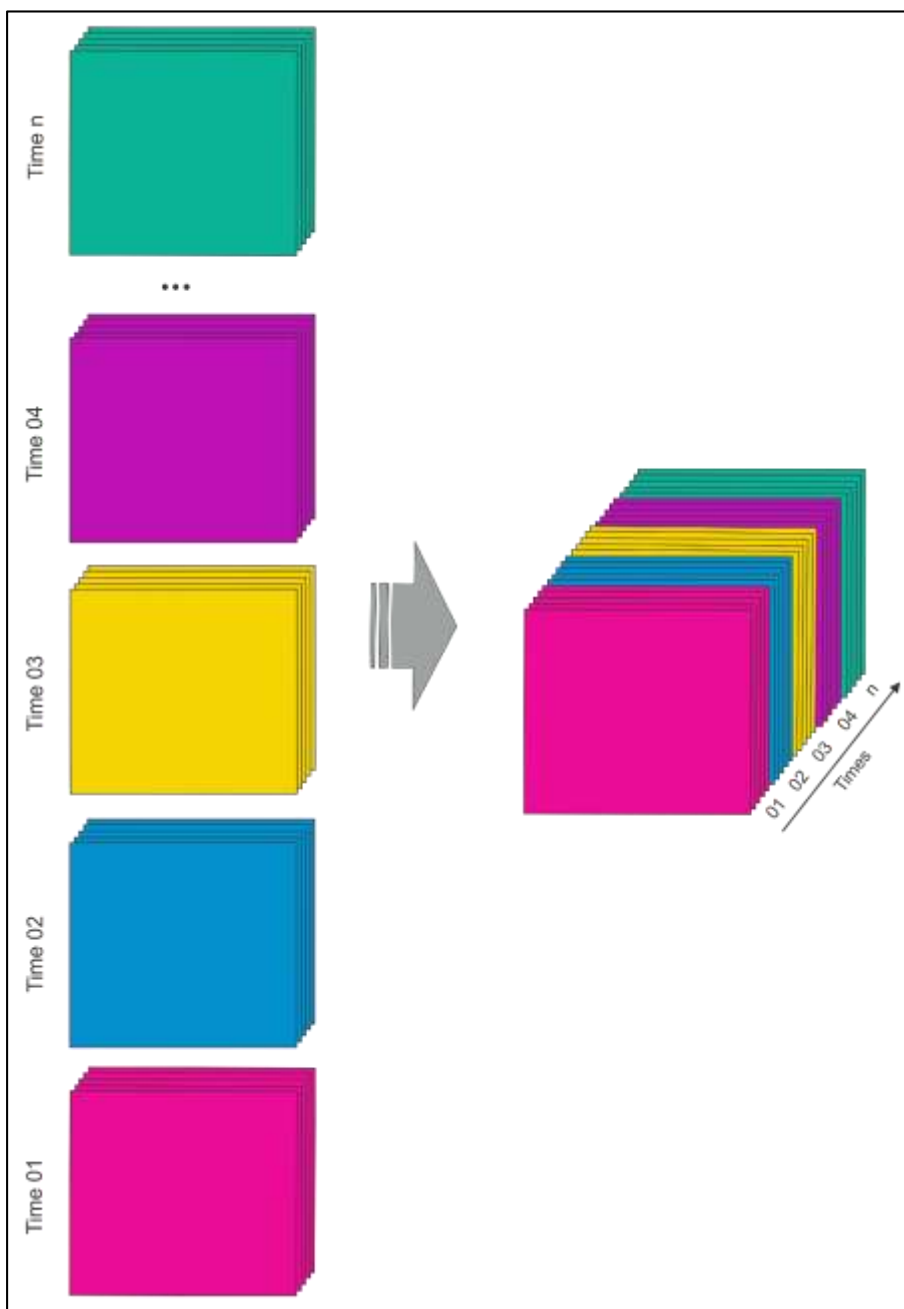
Fonte: The Author

The interfaces for the selection of origin images for the four-dimensional cube assembly (figure 2) are similar in the assembly process of both multi-bands and multi-times images.

- Multi-times Images:

Figure 4 displays a diagram that presents the assembly method of a TBSQ temporal series from a multi-times image, in which the initial images are the times of a remote sensor image and each time contains k-bands.

**Figure 4** – The 4D Cube Mounting from an Multi-Times Image.



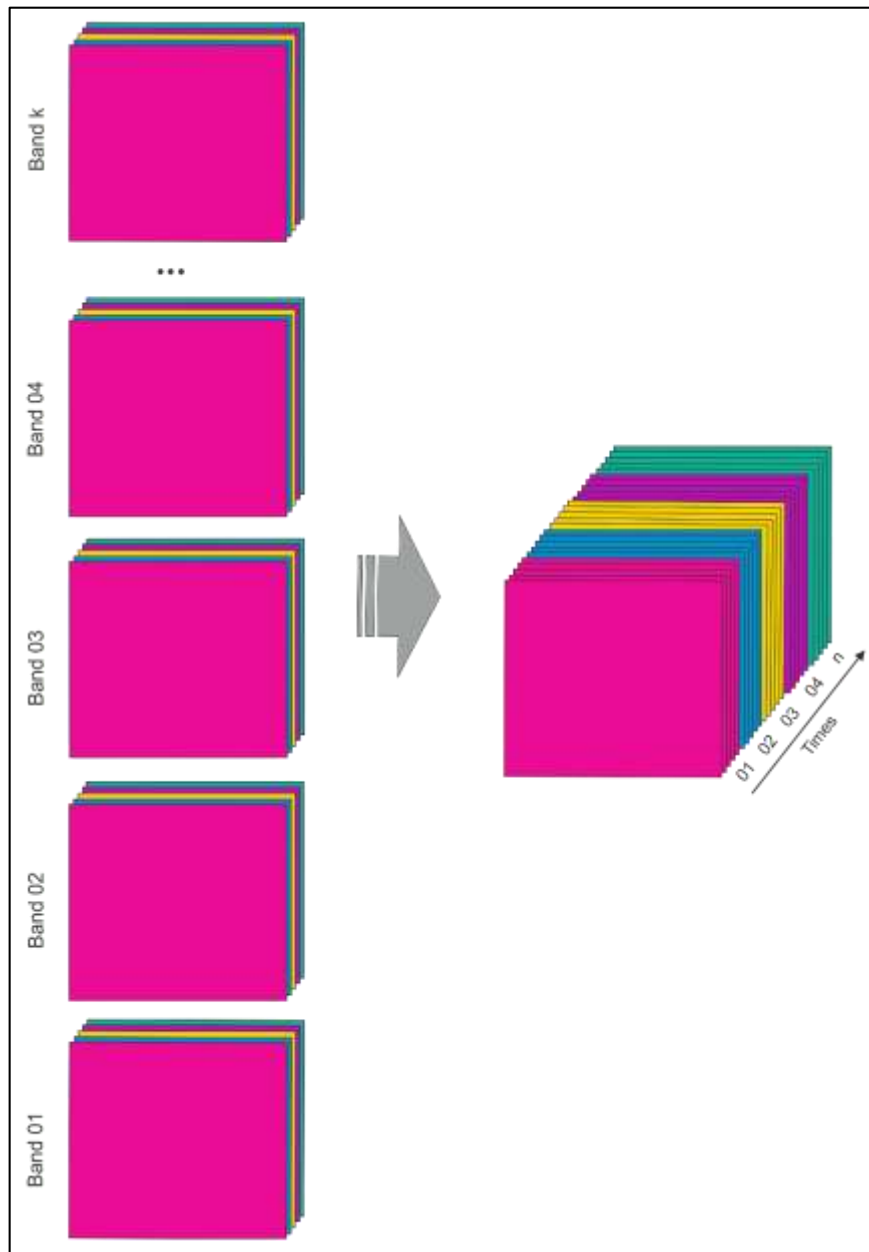
**Fonte:** The Author

The process is carried out so that one time is entirely copied (lines, columns, and bands) to the final file (4D cube), and the process repeats itself for the remaining times of the image, on the order informed by the user upon selecting them. In figure 4, each color represents a distinct time that contains  $k$ -bands.

- Multi-bands Images:

Figure 5 displays a diagram that represents the assembly method of a TBSQ temporal series from a multi-bands image, in which the initial images are the bands of a remote sensor image and each band contains  $n$ -times.

**Figure 5** – The 4D Cube Mounting from an Multi-Bands Image.



Fonte: The Author

The process is carried out so that one time (lines and columns) is copied to the final file (4D cube), interspersing same times in distinct bands. This process repeats itself for the quantity of times the image has. In figure 5, each color represents a distinct time in one of the  $m$  bands that will constitute the final image. Similar colors indicate similar times in distinct bands.

Both in figures 4 and 5, the final assembled cube possesses 4 dimensions, being 2 space dimensions (lines and columns), one spectral dimension (bands), and one temporal dimension (times).

In either case, the four-dimensional cube, as a result of the processing of the initial images, is in the TBSQ format. Being so, initial images with similar space, spectral and temporal dimensions will result on the same final 4D image, despite the fact that the formation process of the 4D cube is different.

### ***1.2.2 Temporal Spectrum***

Each and every object on the surface reflects, absorbs and transmits electromagnetic radiation proportionally in each wave-length, according to its chemical and bio-physical properties. Considering a satellite, that has many bands, each one responsible for capturing a specific length of the spectrum, it is possible to obtain the spectral signature of a target through observation of its reflectance in that channel (FLORENZANO, 2011).

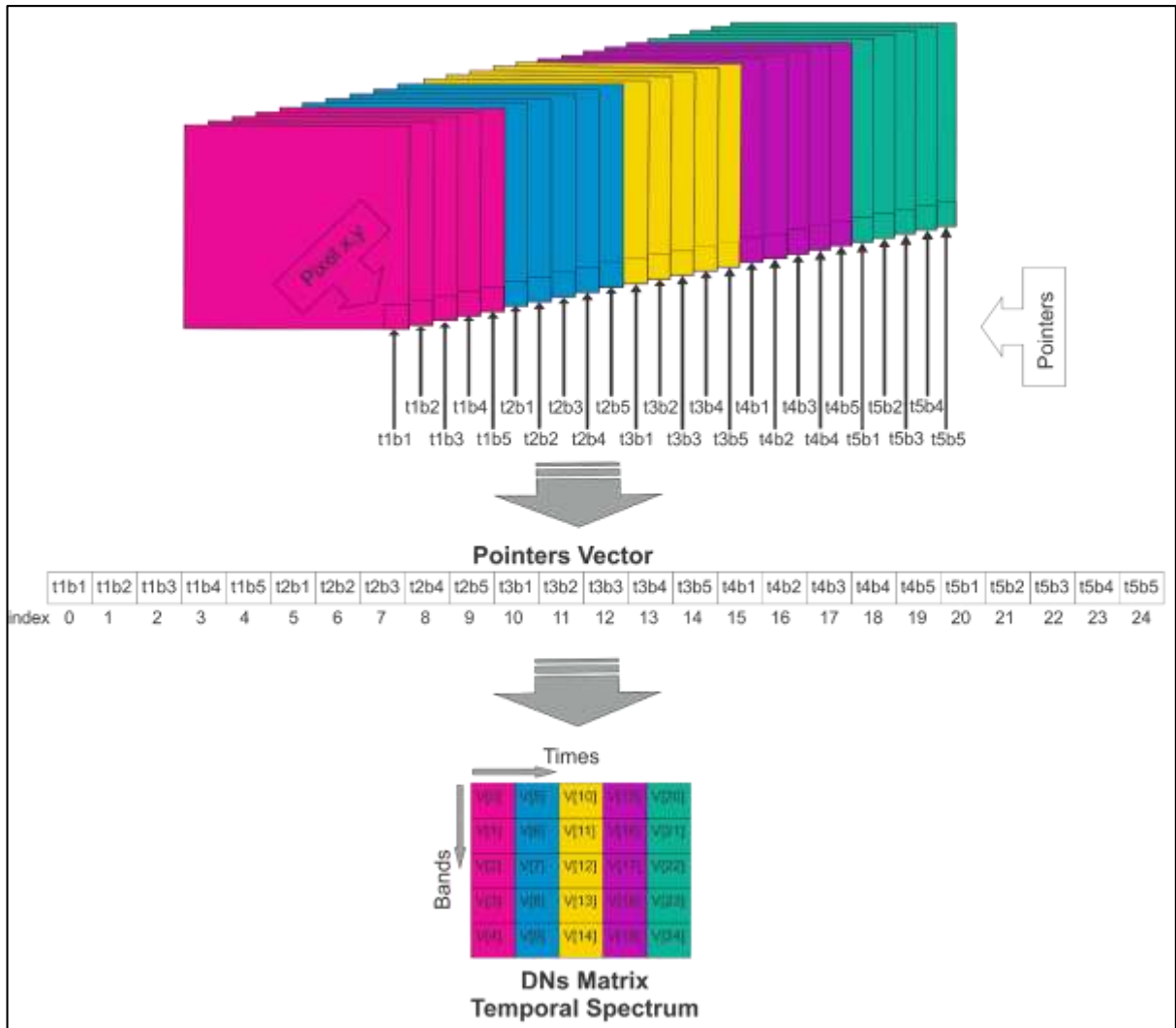
Each pixel of an image possesses a particular spectral signature, being it possible to observe pixels with similar or extremely distinct signatures. Considering each time in the image possesses the same set of bands, the spectral signature of a same pixel may varies in time, what enacts the need of further studies of such variation.

Hence, this treatise proposes a method of capitation of a pixel's spectrum along time, forming a temporal spectrum matrix of such pixel. Figure 6 displays a diagram containing the operation of this method for a random pixel.

The method presented in figure 6 utilizes a multi-pointers computational technique. From the space positions (lines and columns) of a selected pixel, a pointer is positioned in each band of each time of the image on the same space position, and the address of this pointer is stored in a pointer vector. The pointers are then utilized to collect the values of Digital Number (DN) in their position, hence filling the DN values matrix. The filling of this

DNs matrix is always carried out in the indexes according to the band and time where the pointer is placed.

**Figure 6** – Collecting the Temporal Spectrum Utilizing Multi-Pointers Technology.



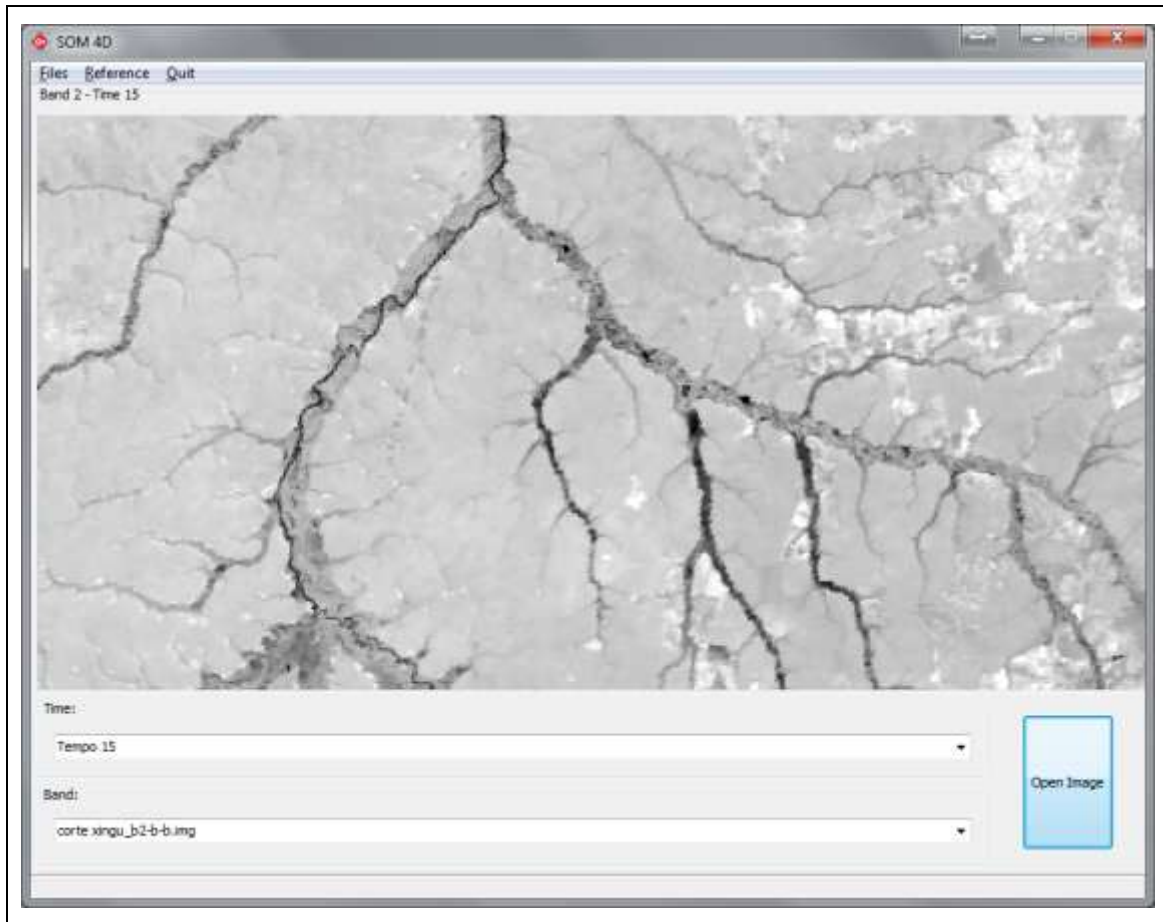
Fonte: The Author

This method enables the collection of consecutive DN values in all bands and times of the image, regardless the need of dislocating the collector through all the space dimension (lines and columns) of each band in every new DN collection, rendering the process more efficient.

The proposed technique was utilized in two steps in the prototype, in the temporal cube upload phase, for its visualization, and in the phase where the temporal spectrum characteristics of a single pixel are visualized.

During the temporal cube upload phase, it is necessary to verify the values with the higher and lower DN's, that will be used in the assembly of the temporal spectrum graphs. Such verification is arranged by utilizing the collection method of the temporal spectrum data of 20% of the pixels in the image, being individually collected and compared in pairs. At the end of all comparisons, the values of higher and lower DN's are defined.

**Figure 7 – Loaded 4D Cube.**



**Fonte:** The Author

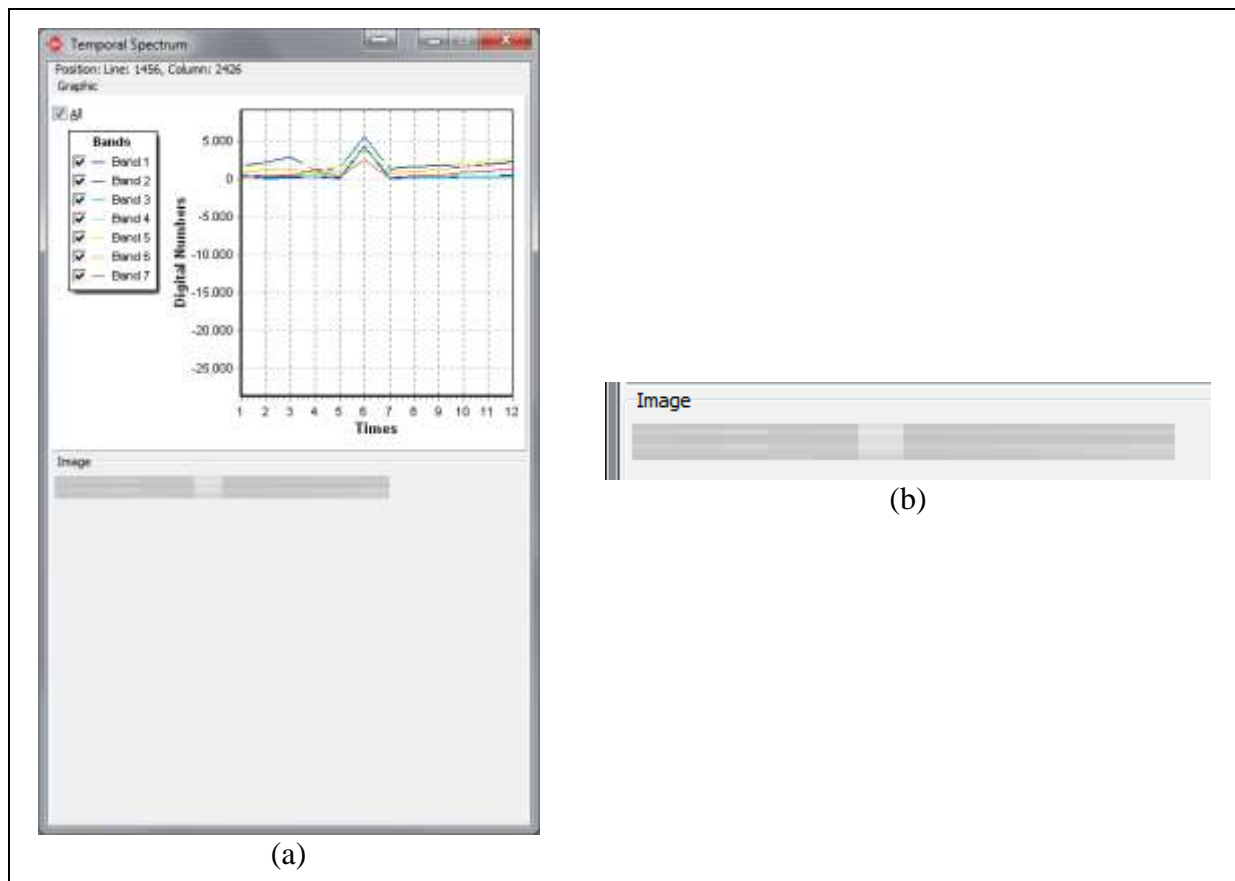
Figure 7 displays the prototype interface, presenting the image from one chosen band and time of an already loaded temporal cube. The prototype allows the interaction between the user and the loaded face of the cube, so that in every selected pixel a Temporal Spectrum graph (Figure 8) is instantaneously created, providing a visualization of the changes in that pixel over time in all image bands.

In the phase which presents the temporal spectrum graph of a selected pixel, the method is utilized to collect the values of DN relative to this pixel's spectrum in time. Figure 8 presents the prototype interface that provides the visualization of the spectrum in time from a



selected pixel. The preview is arranged in separate bands, allowing for the visualization of changes in the values presumed by the pixel throughout time in each of the spectral bands independently.

**Figure 8** – The Temporal Spectrum Graph.



**Fonte:** The Author

The y axis of the temporal spectrum graph is composed by a range of values among the lower and higher DN values, collected in the 4D cube upload phase. The x axis of the same graph brings the temporal dimension of the image, in the example displayed in figure 8, an image with 12 times. The spectral dimension is presented by colors, in which each color represents one band in the image, and they can be distinguished in the subtitle presented beside the graph, where one can select which bands should be presented in the graph, facilitating the analysis. The visualization form of the temporal spectrum bring, in addition, a figure in a gray scale, detailed in Figure 8b, where one can visually verify the shifts in DN values in each band, so that same tonalities represent the same DN value.

### 1.3 Experimental Section

In order to accomplish testing, a computer with the following configuration was utilized: Operational system Windows® 7 Ultimate 64 Bits, Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz 3.90GHz processor, 8GB RAM memory. The prototype performance test was done on a Western Digital Corporation® HD (Hard Disk) model WD10EARS-00Y5B1 (930261 cylinders, 16 heads, 63 sectors per tracks, 512 bytes per sector), SATA-II with 1TB in storage capacity, and also on a Kingston® SSD (Solid-State Drive) model SV300s37A480G (1938021 cylinders, 16 heads, 63 sectors per tracks, 512 bytes per sector), SATA-II with 470GB in storage capacity. Auxiliary external HDs stored the resulting products, as well as the original images and cuts.

The original image was provided by the Laboratory of Spatial Information Systems (LSIE – Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais) from the Department of Geography (GEA – Departamento de Geografia) at the University of Brasília (UnB – Universidade de Brasília).

Initially stored in the multi-band format, and 242,58GB total disk size, it has a spatial dimension of 5000 lines by 6296 columns, spectral dimension of 7 bands, a time dimension of 591 times, and pixels with 16 bits in length. The ENVI (Environment for Visualizing Images) software was used for the temporal and spatial cut of the image and the separation of the temporal and spectral dimensions, in order to obtain suitable materials for mounting images in a multi-times format.

To demonstrate the efficiency and effectiveness of the proposed methods, tests were made with images in two formats, multi-times and multi-bands. The spectral dimension of the images was set at 7 bands for all tests. As the image's spatial dimension (lines×columns) the 3000×2481 and 5000×6296 sizes were defined. The temporal dimension was set in 8 different times. The pixel size was the same (16 bits) for all tests.

In the original images were made temporary cuts in order to determine the 8 different times ranging from 2 (two) to 400 (four hundred). Table 1 (a) presents a description of the cuts made in the image for testing the performance of the prototype images in a multi-bands format. Table 1 (b) shows the image cuts prepared for testing in multi-times format, in which, due to hardware constrictions, it was not possible to work with a temporal dimension over 350 times.

**Table 1 – Image Samples for Testing.**

<b>Multi-Bands Format (a)</b>						
<b>Sample</b>	<b>Spatial Dimension</b>		<b>Spectral Dimension</b>	<b>Temporal Dimension</b>	<b>Pixel Size (bits)</b>	<b>Sample Size (GB)</b>
	<b>Lines</b>	<b>Columns</b>				
Sample 01a	3000	2481	7	400	16	38,82
Sample 02a	3000	2481	7	350	16	33,97
Sample 03a	3000	2481	7	300	16	29,11
Sample 04a	3000	2481	7	250	16	24,26
Sample 05a	3000	2481	7	100	16	9,70
Sample 06a	3000	2481	7	50	16	4,85
Sample 07a	3000	2481	7	12	16	1,16
Sample 08a	3000	2481	7	2	16	0,19
Sample 09a	5000	6296	7	400	16	164,18
Sample 10a	5000	6296	7	350	16	143,66
Sample 11a	5000	6296	7	300	16	123,14
Sample 12a	5000	6296	7	250	16	102,61
Sample 13a	5000	6296	7	100	16	41,05
Sample 14a	5000	6296	7	50	16	20,52
Sample 15a	5000	6296	7	12	16	4,93
Sample 16a	5000	6296	7	2	16	0,82
<b>Multi-Times Format (b)</b>						
<b>Sample</b>	<b>Spatial Dimension</b>		<b>Spectral Dimension</b>	<b>Temporal Dimension</b>	<b>Pixel Size (bits)</b>	<b>Sample Size (GB)</b>
	<b>Lines</b>	<b>Columns</b>				
Sample 01b	3000	2481	7	350	16	33,97
Sample 02b	3000	2481	7	300	16	29,11
Sample 03b	3000	2481	7	250	16	24,26
Sample 04b	3000	2481	7	100	16	9,70
Sample 05b	3000	2481	7	50	16	4,85
Sample 06b	3000	2481	7	12	16	1,16
Sample 07b	3000	2481	7	2	16	0,19
Sample 08b	5000	6296	7	350	16	143,66
Sample 09b	5000	6296	7	300	16	123,14
Sample 10b	5000	6296	7	250	16	102,61
Sample 11b	5000	6296	7	100	16	41,05
Sample 12b	5000	6296	7	50	16	20,52
Sample 13b	5000	6296	7	12	16	4,93
Sample 14b	5000	6296	7	2	16	0,82

Fonte: The Author.

### **1.3.1 Assembling the Four-dimensional Temporal Cubes**

The four-dimensional temporal cubes (4D cube) were assembled from the sections specified in Table 1. A benchmarking was performed in order to compare the performance in creating the 4D cube, both in tests made on a HD on the SSD.

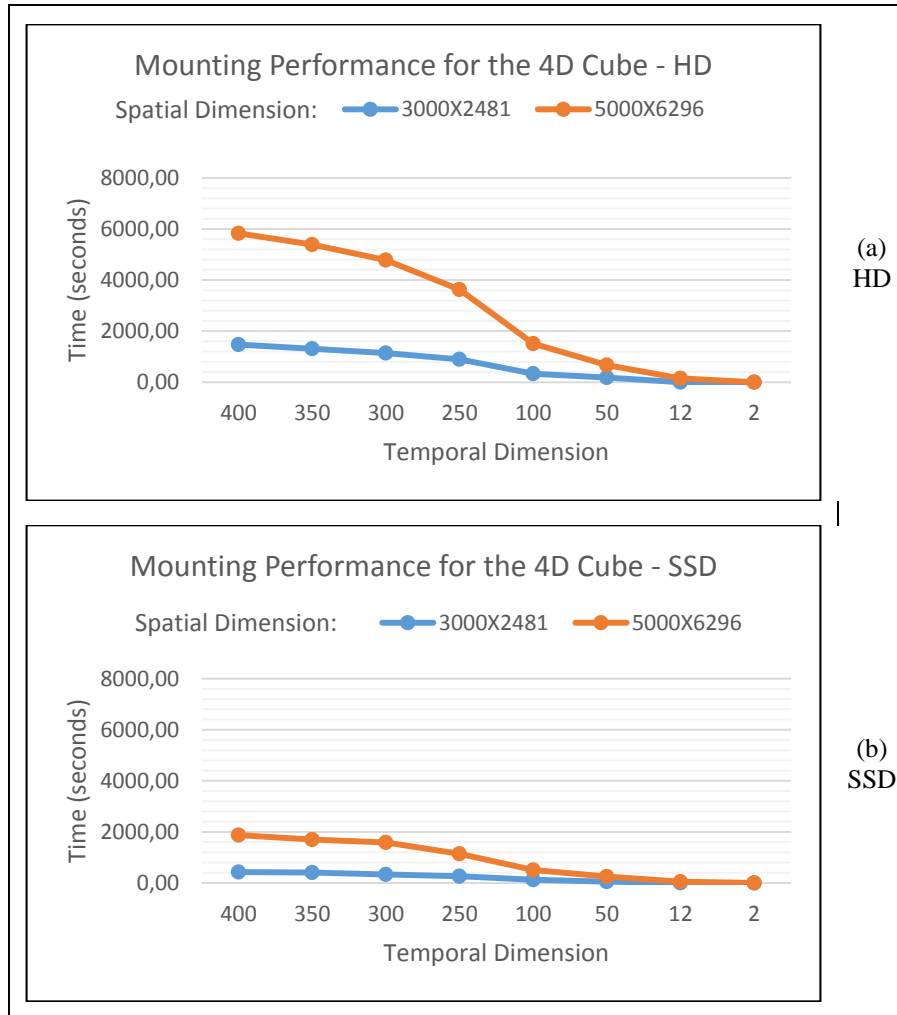
Figures 9 and 10 show the performance graphs of the prototype during the 4D cube assembly from multi-bands images (Figure 9) and from multi-times images (Figure 10), furthermore, it presents the tested performance on HD (Figures 9(a) and 10(a)) and on SSD (Figures 9(b) and 10(b)). The images used for testing had a spatial dimension of  $3000 \times 2481$  and  $5000 \times 6296$ .

One simple observation of the graphs in Figures 9 and 10 enables the perception that the performance of the prototype is superior when run on a SSD, due to the optimization of the hardware features. One can also see that the processing time spent by the prototype is directly proportional to the image size. When cross analyzing the graphs with Table 1, it is noteworthy that the higher the spatial and temporal dimensions of the image, the larger the size of the stored image, and, consequently, the longer the time for assembling the 4D cube.

The samples 01a and 09a have 400 times, only being able of testing originally for multi-bands images, which have seven original files (bands), and each one is composed of 400 layers (times). This limitation in the tests took place due to the hardware, with the settings established for testing, which did not support loading 400 distinct files (times), as it is the case of the configuration of multi-times images, in which each time is composed of 7 layers (bands).

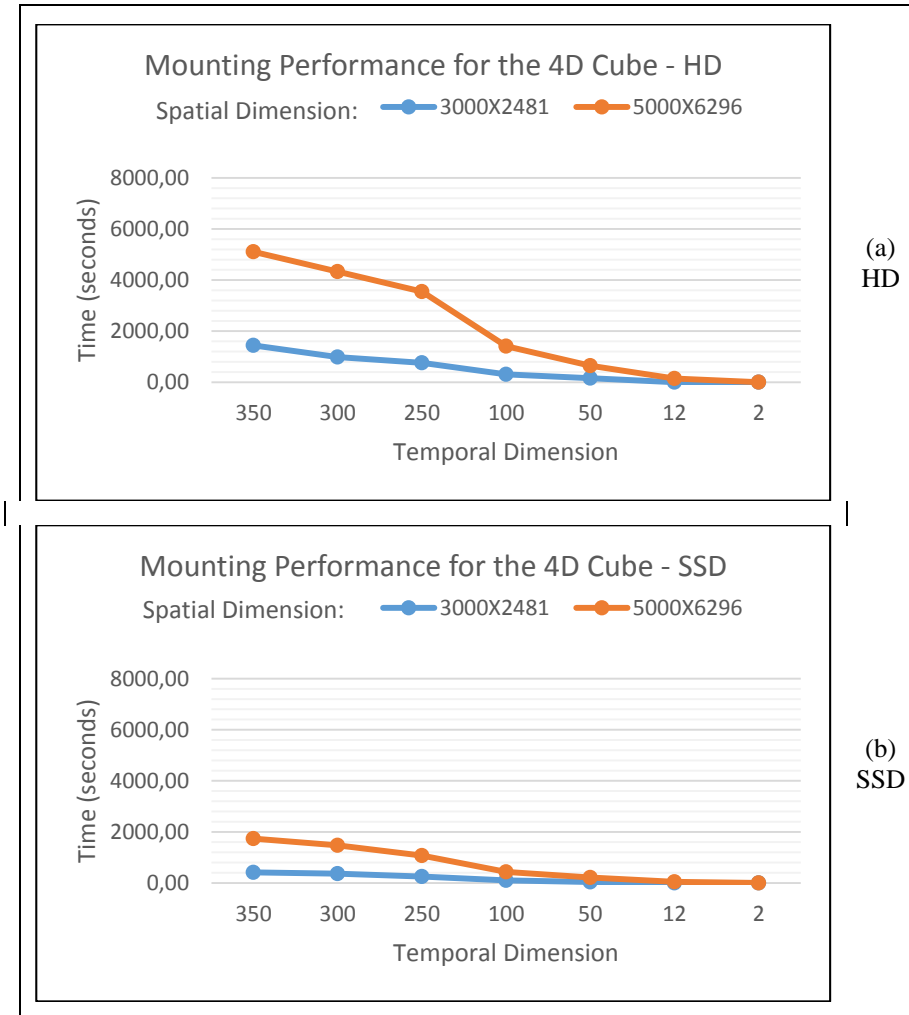
Comparing the performance of the prototype in mounting 4D cubes in multi-bands (Figure 9) and multi-times configurations (Figure 10), one notices the similarity in performance on images of same size tested on similar hardware configurations. It is important to note that the product (a 4D cube) generated in both cases is the same (Figures 4 and 5), that is, a TBSQ cube.

**Figure 9** – Mounting Performance for the Multi-Bands 4D Cube.



Fonte: The Author

**Figure 10** – Mounting Performance for the Multi-Times 4D Cube.



Fonte: The Author

Comparing the performance of the prototype in mounting 4D cubes in multi-bands (Figure 9) and multi-times configurations (Figure 10), one notices the similarity in performance on images of same size tested on similar hardware configurations. It is important to note that the product (a 4D cube) generated in both cases is the same (Figures 4 and 5), that is, a TBSQ cube.

Figure 9 brings the performance of the software during the assembly of four-dimensional cubes from multi-bands images. It was possible to test images up to 400 times. In this case, the software spent 1472.48 seconds to carry out the assembly of a cube of  $3000 \times 2481$  in space dimension on a HD, and 425.40 seconds to mount the same cube on a SSD. On the other hand, the assembly of a cube with 400 times with a spatial dimension of  $5000 \times 6296$  took 5829.24 seconds on a HD, and 1877.43 seconds on a SSD. The temporal dimension presented in samples 01a and 09a was the largest amount of times tested in the prototype due to hardware limitations, however, utilizing the prototype for images with higher temporal dimension is possible with adequate hardware.

Both Figures 9 and 10 bring tests in samples with a time dimension of 350 times or less. An image with this temporal dimension, and a spatial dimension of  $3000 \times 2481$ , was processed by the prototype on a HD in 1313.06 seconds in the case of original multi-bands images, and in 1441.18 seconds in the case of original multi-times images. The difference of approximately 128 seconds is due to the cube assembling technique used in each original type. If the assembly occurs on an SSD, the assembly time of the same cube with original multi-bands images is 410.60 seconds, and for multi-times images, 415.51 seconds, meaning a difference of approximately 5 seconds. When mounting images with a spatial dimension of  $5000 \times 6296$ , under the same conditions, the assembly time is 5829.24 and 1699.76 seconds for multi-bands images, and 1739.10 and 5109.95 seconds to multi-times images, respectively on a HD and a SSD.

The difference in performance in assembling four-dimensional cubes from multi-bands and multi-times images with the same spatial and temporal dimensions in similar circumstances is minimal, not hampering the overall performance of the prototype.

For images with low temporal dimensions, the difference in performance is even more negligible. For images with 2 times, spatial dimension of  $3000 \times 2481$ , mounted on a HD, the processing time was 0.51 seconds (multi-bands) and 0.50 seconds (multi-times). For a temporal cube mounted on a SSD, the processing time was 0.50 seconds (multi-bands) and

0.47 seconds (multi-times). For a spatial dimension of 5000×6296, the performance of the prototype was 2.21 seconds (multi-bands) and 2.00 seconds (multi-times) for a HD, and 2.17 seconds (multi-bands) and 1.97 seconds (multi-times), when using a SSD.

In sections with a temporal dimension of 12, the software performance was 4.46 (multi-bands) and 3.68 (multi-times) seconds using a HD, and 3.23 (multi-bands) and 2.81 (multi-times) seconds, using a SSD, for images with a spatial dimension of 3000×2481. And for images with a spatial dimension of 5000×6296, software had a processing time of 154.85 (multi-bands) and 147.90 (multi-times) seconds, using a HD, and 49.50 seconds (multi-bands) and 48.27 seconds (multi-times), using a SSD.

The performance in assembling the temporal cubes in samples 07a, 06b, 08a and 07b, respectively with 2 and 12 as temporal dimensions, shows that images of low spatial and temporal dimensions have a similar processing time in using both, HD and SSD. This happens due to the size of the memory buffer (8192 bytes) set to the assembly phase of the four-dimensional cube, which allows these images to be completely processed by the computer's memory, requiring no *swaping*<sup>1</sup>, thus saving processing time. Table 2 shows the data on the time reduction when using a SSD to mount the 4D cube for all cuts.

**Table 2** – Performance Time Reduction in Mounting the 4D Cube.

(Continua)

Initial Images in multi-Times format			
Sample	Time to Mount the 4D Cube (seconds)		Gain (%)
	on HD	on SSD	
Sample 01a	1472,48	425,40	71,11
Sample 02a	1313,06	410,60	68,73
Sample 03a	1141,38	336,67	70,50
Sample 04a	900,14	262,71	70,82
Sample 05a	334,25	126,27	62,22
Sample 06a	182,83	50,22	72,53
Sample 07a	4,46	3,23	27,62
Sample 08a	0,51	0,50	2,92
Sample 09a	5829,24	1877,43	67,79
Sample 10a	5391,16	1699,76	68,47
Sample 11a	4780,31	1589,85	66,74
Sample 12a	3630,28	1143,68	68,50
Sample 13a	1511,12	512,01	66,12
Sample 14a	672,60	250,76	62,72
Sample 15a	154,85	49,50	68,03
Sample 16a	2,21	2,17	2,08

<b>Initial Images in multi-Bands format</b>			
<b>Sample</b>	<b>Time to Mount the 4D Cube (seconds)</b>		<b>Gain (%)</b>
	<b>on HD</b>	<b>on SSD</b>	
Sample 01b	1441,18	415,51	71,17
Sample 02b	982,82	364,23	62,94
Sample 03b	756,85	251,35	66,79
Sample 04b	309,58	99,98	67,70
Sample 05b	156,08	42,90	72,51
Sample 06b	3,68	2,81	23,74
Sample 07b	0,50	0,47	5,81
Sample 08b	5109,95	1739,10	65,97
Sample 09b	4333,19	1471,79	66,03
Sample 10b	3545,37	1072,13	69,76
Sample 11b	1411,09	434,54	69,21
Sample 12b	648,03	213,94	66,99
Sample 13b	147,90	48,27	67,37
Sample 14b	2,00	1,97	1,35

**Fonte:** The Author.

In Table 2, it is possible to realize the amount of time reduction in performance from the utilizing the prototype on a SSD, compared to its use on a HD. In the tested images with a higher temporal dimension, i.e. samples 01a and 09a, the time reduction reaches 71.11% and 67.69%, respectively. For images with 350 times, such as samples 02a, 01b, 10a and 08b, the time reduction in the first two is similar to the previous cases, 68.73% and 71.17% respectively, and also in the last two cases, 68.47% and 65.97% respectively.

For medium images, with 250 times, the time reduction reaches 70.82% (sample 04a), 66.79% (sample 03b), 68.50% (sample 12a) and 69.76% (sample 10b). One can see, when analyzing table 2, that samples with more than 50 times and a spatial dimension of 3000×2481 (samples from 01a to 06a and samples from 01b to 05b) have an average performance time reducing of 68.77%. In the case of images with a spatial dimension of 5000×6296, the time reduction is higher than 60% for images with more than 12 times (samples from 09a to 15a and samples from 08b to 15b), being the average time reduction in this case 67.23%. Hence, in both cases, the time reduction is always similar in sections with similar characteristics, although in distinct kinds of original images (multi-bands and multi-times).

Images with only two times have a low time reduction (2.92% - sample 08a; 5.81% - sample 07b; 2.08% - sample 16a; 1.35% - sample 14b). This fact is justified due to the small



size of the image, the hardware can work with much of the latter in its main memory, reducing the need to constantly search for parts of the image in the secondary memory (*swapping*). The same goes for a sample with a spatial dimension of  $3000 \times 2481$  and temporal dimension of 12 times (27.62% - sample 07a; 23.74% - sample 06b)

In general, for images with a spatial dimension of  $3000 \times 2481$ , the average of time reduction is 54.38%, while the time reduction in images with a spatial dimension of  $5000 \times 6296$  is, on average, 58.45%. This shows that for images with a larger size, the time reduction is also higher. This feature can also be seen when analyzing the individual time reductions presented in Table 2.

### ***1.3.2 Uploading the Cube for Visualization***

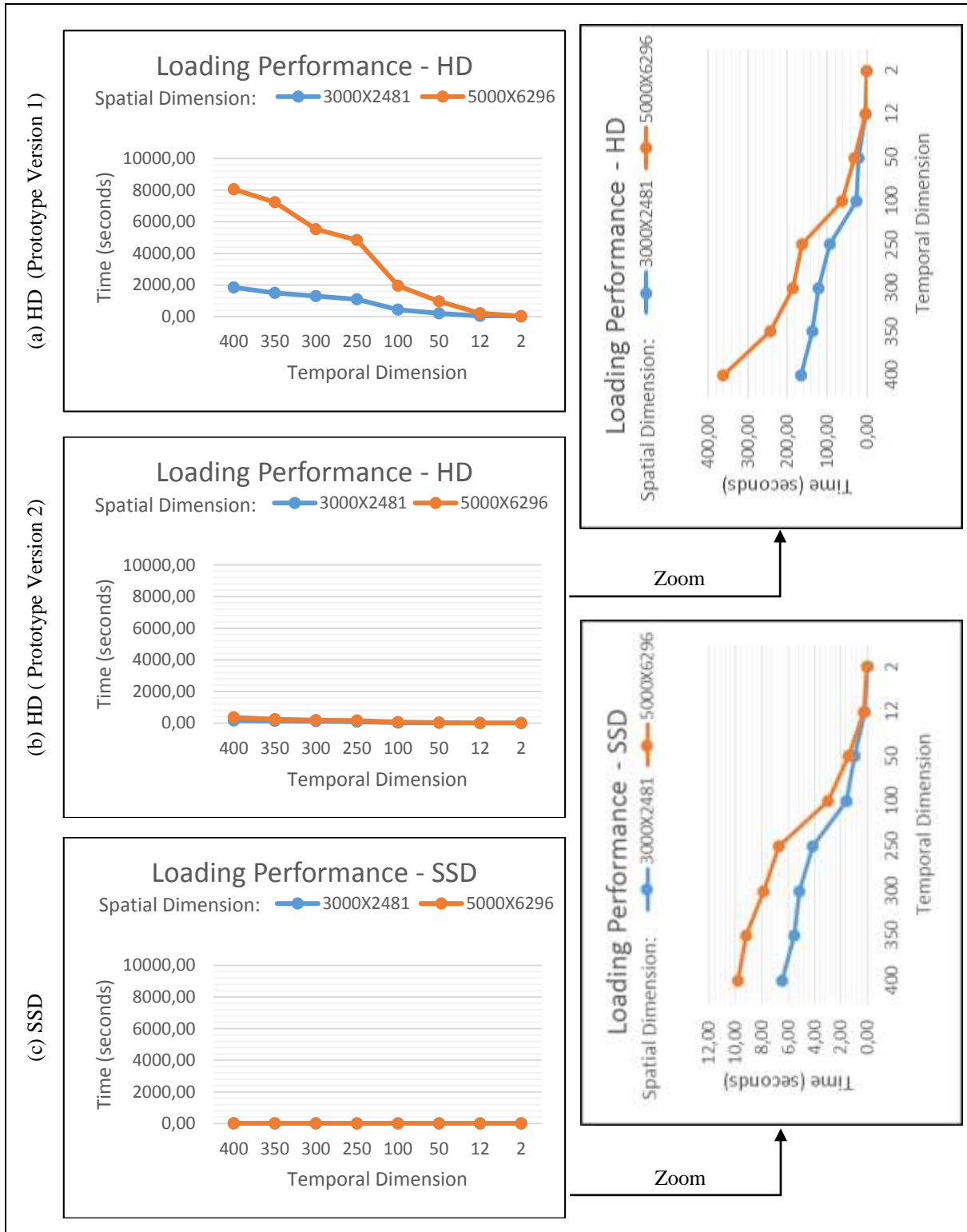
After assembling the four-dimensional cubes, it is required to load it into the prototype for the purpose of viewing a face image and / or the temporal spectrum of a pixel. Upon loading the temporal cube in the prototype, it performs a scan around the cube seeking the smallest and largest pixel values present in the whole 4D cube.

To verify the performance of the prototype at this stage, the four-dimensional cubes assembled for each section were loaded. Such loading was made on an initial version of the prototype using a HD (Figure 11(a)), in which the multi-pointer technology was not used yet. Also, the loading tests were performed in the second version of the prototype, in which the multi-pointers technique was already implemented, on a HD (Figure 11(b)) and a SSD (Figure 11(c)).

For a better visualization, the graphs in Figure 11 are initially presented using as reference for the y axis a scale of time values (in seconds) taken by the prototype during the loading of the cube in the first version of the software. In a second phase, the graphs of tests in the new version of the prototype are presented over again, in their own time scales (in seconds) of the loading processing of each 4D cube.

Figure 11 presents the performance graphics regarding the loading of four-dimensional cube, previously assembled in the prototype. The graphs shown are related to the cubes generated from multi-bands images, as from such images it was possible to generate cubes with a temporal dimension range from 2 to 400, while, from multi-times images, the maximum temporal dimension feasible for processing reached 350 times.

**Figure 11 – 4D Cube Loading Performance**



Fonte: The Author

Loading sample 01a in the old version of the prototype, utilizing a HD, required 1851.92 seconds. Loading the same section in the second version of software (with the multi-

pointers technique), and a HD, required a processing time of 164.60 seconds. One can see that the time reduction was circumstantial (approximately 1687 seconds). The cut 8section 09a loading time, in the old version of the prototype, was 8051.32 seconds, while 362.80 seconds for loading the latest version of the prototype, that is, over 7688 seconds of saved time. By doing the same tests using a SSD, the time reduction is even higher, 6.52 and 9.83 seconds respectively for samples 01a and 09a.

Cubes of intermediate size, such as those assembled from samples 04a and 12a, were loaded into 1097.89, and 4841.63 seconds, respectively, in the first version of the prototype. In the current version, using HD, loading took place at 93.27 (sample 04a) and 164.32 (sample 12a) seconds. By using a SSD, the time was 4.12 seconds for sample 04a, and 6.72 seconds for sample 12a.

Temporal cubes assembled from smaller images, of 12 times (samples 7a and 15a), require, in the first version of the prototype, approximately 47.17 (07a) and 211.62 (15a) seconds to load. Using a HD and the version of the prototype with the multi-pointers implementation, this time falls to 3.10 (07a) and 3.42 (15a) seconds. Using multi-pointers and SSD, the processing time to load cubes is 0.17 (07a) and 0.27 (15a) seconds.

In the case of temporal dimension 2 (samples 08a and 16a), the lowest temporal dimension tested, the prototype needed, with no multi-pointers, 5.97 (08a) and 33.17 (16a) seconds to load the cubes. With multi-pointers, and processing performed on a HD, 0.02 (08a) and 0.50 (16a) seconds were the loading times for four-dimensional cubes. With the SSD technology, the prototype required 0.0 and 0.01 seconds to load, respectively, cubes 08a and 16a.

There was a significant improvement upon implementing multi-pointers in the loading phase of the image, what can be determined by analyzing the graphs shown in Figure 11. Such improvement is enhanced by joining the technique of multi-pointers with the native features of the SSD technology.

The loading performance, utilizing the multi-pointers version of the prototype for temporal cubes from samples 08a and 16a, shows that images of low spatial and temporal dimensions have a similar processing time in the use both HD and SSD. As in the assembly of four-dimensional cubes, this fact occurs due to the size of the memory buffer set for the loading phase of the 4D cube.

Table 3 surveys the time reduction when loading an already assembled 4D cube. First, on improving the prototype by implementing multi-pointers, i.e., from versions 1 to 2 of the prototype, both tested in HD. Following, the table displays the time reduction solely related to the second version of the software when using SSD. All demonstrations are performed for all samples.

**Table 3 – Time Reduction in Loading the 4D Cube.**

Sample	Loading Time for the 4D Cube (seconds)		Gain (%)	Loading Time for the 4D Cube (seconds)		Gain (%)	Final Gain (%)
	Version 1 on HD	Version 2 on HD		Version 2 on HD	Version 2 on SSD		
Sample 01a	1851,92	164,60	91,11	164,60	6,52	96,04	99,65
Sample 02a	1497,66	137,16	90,84	137,16	5,57	95,94	99,63
Sample 03a	1295,40	122,31	90,56	122,31	5,20	95,75	99,60
Sample 04a	1097,89	93,27	91,50	93,27	4,12	95,59	99,62
Sample 05a	439,60	26,00	94,08	26,00	1,62	93,76	99,63
Sample 06a	207,33	20,58	90,08	20,58	0,97	95,30	99,53
Sample 07a	47,17	3,10	93,42	3,10	0,17	94,46	99,64
Sample 08a	5,97	0,02	99,75	0,02	0,00	0,00	100,0
Sample 09a	8051,32	362,80	95,49	362,80	9,83	97,29	99,88
Sample 10a	7232,05	242,94	96,64	242,94	9,20	96,21	99,87
Sample 11a	5528,04	186,16	96,63	186,16	7,91	95,75	99,86
Sample 12a	4841,63	164,32	96,61	164,32	6,72	95,91	99,86
Sample 13a	1956,18	63,06	96,78	63,06	3,01	95,22	99,85
Sample 14a	965,51	32,18	96,67	32,18	1,42	95,59	99,85
Sample 15a	211,62	3,42	98,39	3,42	0,27	92,21	99,87
Sample 16a	33,17	0,50	98,50	0,50	0,01	96,99	99,95

Fonte: The Author.

Table 3 presents the time reduction by using, on a HD, the prototype in its second version compared to version 1; and, in the second version, on an SSD compared to its use on a HD. In the tested images with higher temporal dimension, i.e. samples 01a and 09a, the time reduction reaches 91.11% and 95.49%, respectively, if compared between versions 01 and 02 of the prototype; and 96.04% and 97.29%, respectively, when compared between the HD and SSD on version 2. The final time reduction, comparing the first version of the prototype running on a HD and version 2 of the prototype, running on a SSD, reaches 99.65% (sample 01a) and 99.88% (sample 09a).

In medium images, containing 250 times, the time reduction reaches 91.50% (sample 04a) and 96.61% (sample 12a), in the comparison between versions 1 and 2 of the prototype. If compared in the version 2 on a HD and on a SSD the time reduction is 95.59% (sample

04a) and 95.91% (sample 12a), gaining these samples a final improvement of 99.62% (sample 04a) and 99.86% (sample 12a).

One can tell, by analyzing Table 3, that in all sections the average time reduction in performance is 94.82%, if versions 1 and 2 of the prototype are compared, both tested on a HD. By verifying the second version, the average of time reduction in loading a 4D cube, on HD and SSD, is 89.50%. The reduction of performance gain occurs, since in the version 2 of the software, sample 08a was loaded in very similar times in both technologies, with no time reduction in this case. The overall average of time reduction in loading a 4D cube is 99.77%.

Table 3 shows that, in fact, the improvement achieved by implementing multi-pointers is real, reaching more than 99% increase in performance in loading the four-dimensional cubes.

### ***1.3.1 The Visualization of the Temporal Spectrum of a Pixel***

With a four-dimensional cube loaded in the prototype, it is possible to realize the visualization of temporal spectrum from selected pixels. This visualization is performed as a graph, in which the limiting values on the y-axis are the lowest and the highest value of DN collected from the 4D cube. The x-axis has the temporal dimension of the cube as marks, and the spectral dimension is represented individually (in each band) by the lines shown in the graph.

To verify the performance of the prototype at this stage, four-dimensional cubes assembled for each sample were loaded, this loading was made on an initial version of the prototype using a HD (Figure 12(a)), in which the multi-pointer technology was not used. In addition, the loading tests were performed in the second version of the prototype, in which the multi-pointers technique was already implemented, in HD (Figure 12(b)) and SSD (Figure 12(c)). Five random pixels were collected, from the beginning to end of the cube, and the values presented are the arithmetic mean of the collected values.

For a better visualization, the graphs in figure 12 are initially presented using as values on the y axis a time scale (in seconds) taken by the prototype during the collection for the cube, using the first version of the software. In a second moment, the graphs of the tests on the new version of the prototype are presented, in their own processing time scales for the collection of temporal spectrum (in seconds) of the pixels for each 4D cube mounted.

As well as in the analysis of the loading time of a four-dimensional cube in the prototype, one can perceive a performance improvement obtained with the implementation of

multi-pointers in the collection and visualization phases of a temporal spectrum. The technique brought the prototype considerable time reduction, which are even better exploited when used in conjunction with the SSD technology.

To collect the temporal spectrum in a cube of temporal dimension 400 (samples 01a and 09a), the prototype spends 674.25 (01a) and 2827.24 (09a) seconds when its first version is used on HD. The performance difference of the temporal spectrum collection is huge compared to the new version of the prototype, which spends approximately 18.99 (01a) and 21.21 (09a) seconds when used on HD, or just 0.81 (01a) and 0.83 (09a) seconds when used on SSD.

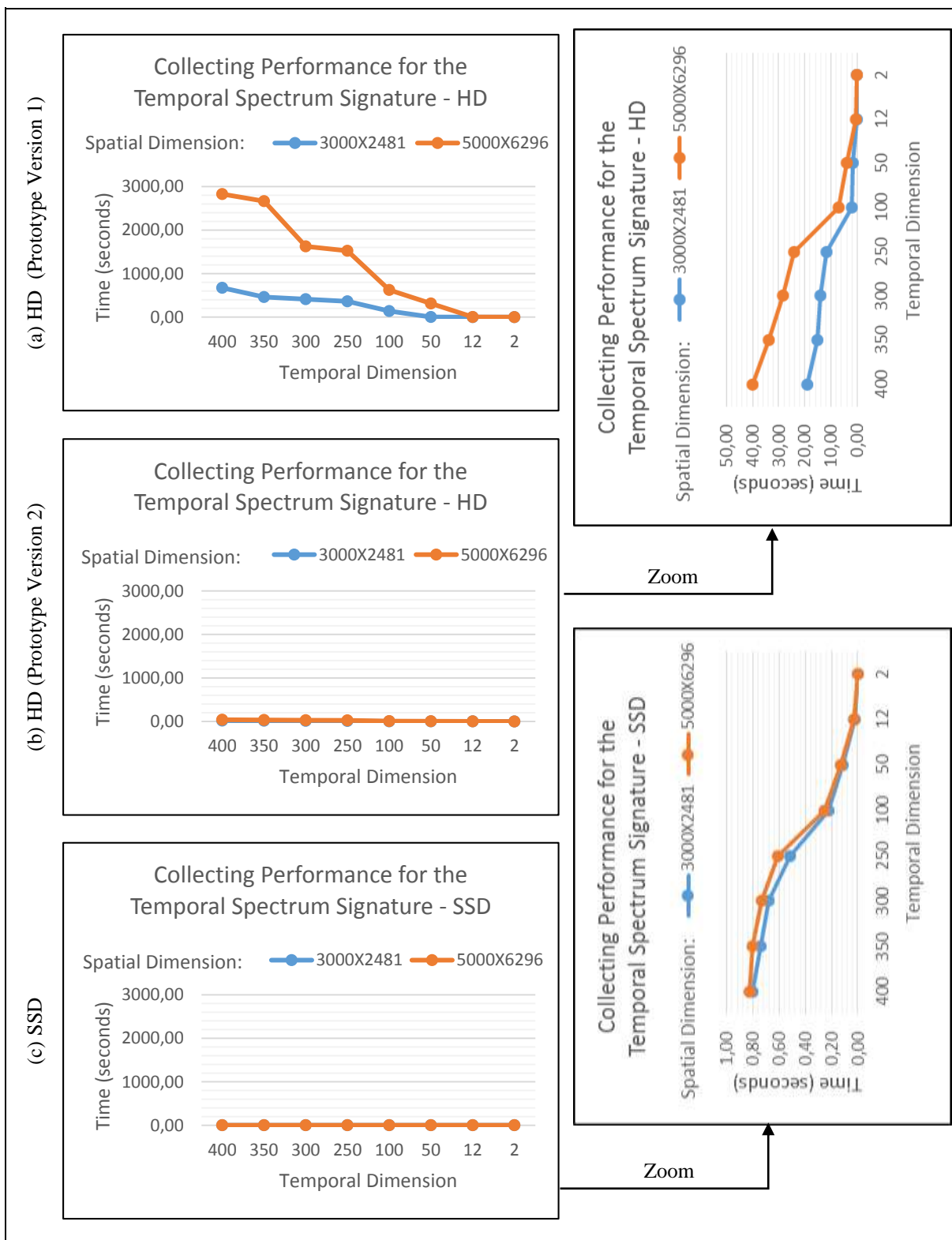
In order to collect data from medium sized cubes, 250 times, i.e., samples 04a and 12a, the prototype requires 362.14 and 1525.38 seconds respectively when using the 2nd version of the prototype without multi-pointers. Performing the same operation on the new version of the prototype, the time spent is 11.72 (04a) and 12.65 (12a) seconds when running on HD, or 0.52 (04a) and 0.61 (12a) seconds if using SSD.

Analyzing the processing time of the first version of the prototype on the collection of temporal spectrum in small sized images (samples 07a and 15a), one realizes that time of collection is dramatically reduced, being 0.38 (07a) and 1.41 (15a) seconds, somewhat an acceptable time. However, when compared with the processing time of the multi-pointers version, which is 0.32 (07a) and 0.33 (15a) seconds using HD, or 0.03 seconds to both samples using SSD, one perceives that there is still a large performance gain in implementing multi-pointers.

In order to collect the temporal spectrum of cubes generated from samples 08a and 16a, the prototype spent 0.01 (08a) and 0.25 (16a) seconds when using the first version of the prototype on HD, and 0.0 seconds when using the multi-pointers version of the software, for both HD and SSD.

Moreover, it is clear that the time reduction is proportional to the image size. The larger the image, the greater the time reduction in using the new version of the prototype (with multi-pointers), compared to the previous version. I.e., for cubes with small temporal and spatial dimensions, the time reduction exists, however not as significant as for cubes with large dimensions.

**Figure 12** – Collecting Performance for the Temporal Spectrum Signature.



Fonte: The Author

Table 4 shows the data regarding the time reduction when loading an already mounted 4D cube, at first on the prototype improvement by implementing multi-pointers, i.e.,

from version 1 to version 2 of the prototype, both tested on HD. Following, the time reduction related solely to the version 2 of the software when using SSD is displayed. All data is displayed for all sections.

**Table 4** – Performance Time Reduction for the Temporal Spectrum Signature Collection.

Sample	Signature Collecting Time (seconds)		Gain (%)	Signature Collecting Time (seconds)		Gain (%)	Final Gain (%)
	Version 1 on HD	Version 2 on HD		Version 2 on HD	Version 2 on SSD		
Sample 01a	674,25	18,99	97,18	18,99	0,81	95,75	99,88
Sample 02a	461,21	15,34	96,67	15,34	0,74	95,16	99,84
Sample 03a	410,46	14,00	96,59	14,00	0,68	95,12	99,83
Sample 04a	362,14	11,72	96,76	11,72	0,52	95,58	99,86
Sample 05a	139,29	2,30	98,35	2,30	0,22	90,37	99,84
Sample 06a	2,25	1,67	26,04	1,67	0,12	92,89	94,74
Sample 07a	0,38	0,32	15,55	0,32	0,03	92,10	93,33
Sample 08a	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sample 09a	2827,24	21,21	99,25	21,21	0,83	96,10	99,97
Sample 10a	2666,40	18,52	99,31	18,52	0,80	95,67	99,97
Sample 11a	1624,48	14,26	99,12	14,26	0,73	94,86	99,95
Sample 12a	1525,38	12,65	99,17	12,65	0,61	95,19	99,96
Sample 13a	624,32	4,81	99,23	4,81	0,25	94,75	99,96
Sample 14a	311,70	2,41	99,23	2,41	0,13	94,68	99,96
Sample 15a	1,41	0,33	76,33	0,33	0,03	89,75	97,57
Sample 16a	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: The Author.

Table 4 shows the extent of the time reduction in performance in the collection of the Temporal spectrum Signature upon using, on HD, the prototype in its second version, compared to version 1; and, in the version 2, on a SSD compared to its use on a HD. In the tested images with higher temporal dimension, i.e. samples 01a and 09a, the time reduction reaches 97.18% and 99.25%, respectively when compared between the two versions of the prototype; and 95.75% and 99.97%, respectively, when compared, in version 2, between the HD and SSD. The final time reduction, comparing the first version of the prototype running on HD, and version 2 of the prototype on SSD, reaches 99.88% (sample 01a) and 99.97% (sample 09a).

In medium images, with 250 times, the time reduction reaches 96.76% (sample 04a) and 99.17% (sample 12a), in comparing versions 1 and 2 of the prototype. In comparing version 2 on HD and SSD it is 95.58% (sample 04a) and 95.19% (sample 12a), remaining these sections with a final time reduction of 99.86% (sample 04a) and 99.96% (sample 12a).



In images of two times, the time reduction is 0.00% (samples 08a and 16a) in all tests, granting no time reduction from version 1 to 2, or on the use of SSDs in relation to HD. This occurs in part due to the absence of swapping and mainly due to the implementation of multi-pointers which rendered the temporal spectrum signature collecting process very fast if compared to the first version of the prototype.

By analyzing table 4, one can realize that for all samples the average of time reduction is 74.92%, when comparing version 1 with version 2 of the prototype, both tested on HD. Upon verifying the time reduction in the second version, by comparing the performance in loading a 4D cube on HD and SSD, the average reduction is 82.37%. The overall average of time reduction in loading 4D cubes is 86.54%.

#### **1.4 Conclusion**

The need to analyze changes in land use over time is constant. Scholars and researchers seek to analyze these changes, but due to software limitations to assist in this study, the time dimension is limited. This article brought new concepts for the use of time in this analysis, contributing to a significant improvement in processes involving the analysis of land use over time.

Two key concepts for a better use of the temporal dimension in the analysis of changes in spectral behavior were presented. One is the inclusion of the temporal dimension in popular formats of digital data (BSQ, BIL and BIP), bringing, therefore, a new approach to the storage of digital images on disc: TBSQ, TBIL and TBIP formats, enabling the treatment of four-dimensional data (Lines, Columns, Bands and Times) into digital data files. These new digital formats allow the manipulation of temporal data in a efficient and effective manner.

Another concept introduced was the use of multi-pointers on the temporal spectrum processing of  $n$ -temporal images. This brought a significant performance gain for the prototype, in both the loading of the four-dimensional cube and in the collection phase of the temporal spectrum signature of a selected pixel on a cube face.

Performance tests were conducted in three phases of  $n$ -temporal image processing: the assembly phase of the four-dimensional cube, the loading phase of an already assembled 4D cube, and in the collection phase of the temporal spectrum signature of a selected pixel. As expected, generally speaking, the image processing time is directly proportional to its size. The tests were performed on HD and SSD technologies, thereby demonstrating the improved

efficiency of the version 2 of the prototype when utilized along with the SSD technology. In small images, the difference in processing time between the use of HD and SSD is imperceptible to the user, since no swapping occurs – the main memory of the hardware was sufficient to load the entire image in process.

Tests performed comparing the processing time of the initial version (version 1) of the prototype and the time spent by the current prototype version (version 2), in which the concepts of multi-pointers are already implemented, demonstrate the effectiveness of this method by presenting significant time reduction from the first run on HD to the new version on HD and SSD.

Thus, the experiments proved the effectiveness of the proposed concepts, in practice demonstrating the advantages that their use brings to the spectrum analysis over time.