

Compressão de Imagens de Satélites: Embarcada e em Solo

Adriano Carvalho de Paula ^{*}
Diego Vilela Monteiro ^{**}
João Eliakin Mota de Oliveira ^{***}
Rubens Andreas Sautter [†]

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,
São José dos Campos, São Paulo - Brasil*

Resumo A compressão de dados é uma necessidade presente em todas as áreas que lançam mão da computação para automatizar e viabilizar tarefas complexas. Com os avanços nas tecnologias de reprodução de imagem e vídeo, os arquivos que representam essas mídias têm demandado cada vez mais capacidade de armazenamento. Quando se trata de imagens coletadas por satélites para observação da Terra a necessidade de se comprimir dados se torna ainda mais crucial, pois as limitações de armazenamento e transmissão desses dados podem ser um obstáculo intransponível para o cumprimento de uma missão espacial. No presente texto, discutimos, a princípio, a compressão de imagens de maneira geral e, posteriormente, damos enfoque especial às questões relacionadas a uma plataforma orbital realizando missão espacial de observação da terra (sensoriamento remoto). Nesse contexto, abordamos a compressão embarcada e em solo, apresentando os requisitos para cada um desses segmentos, além das técnicas de compressão em *hardware* e em *software* mais comumente utilizadas.

Palavras-chave: imagens de satélites, compressão embarcada, compressão em solo

1 Introdução

Uma imagem digital pode ser entendida como uma matriz retangular de pontos, dispostos em m linhas e n colunas. A expressão $m \times n$ é chamada de resolução da imagem, e os elementos que a compõe são chamados de *pixels* [8] (ver Figura 1).

^{*} adrianocarv@gmail.com

^{**} dvm1607@gmail.com

^{***} joaoeliakin@gmail.com

[†] rubens.sautter@gmail.com

O termo “resolução”, por vezes também é usado para indicar o número de *pixels* por unidade de comprimento da imagem [9], por exemplo, d.p.i. significa pontos por polegada (*dots per inch*). A seguir, apresentamos alguns tipos comuns de imagens digitais:

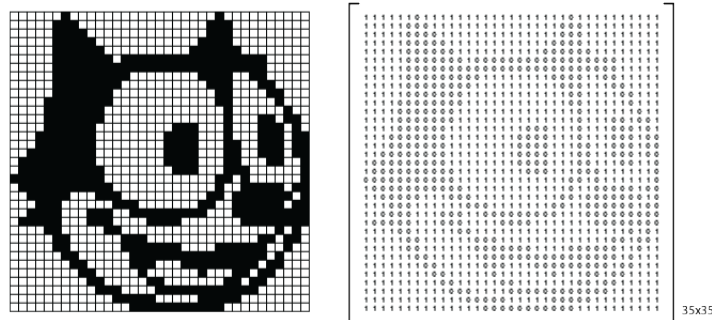


Figura 1. Exemplo de representação matricial de uma imagem digital (uso sob a licença *Creative Commons*)

1. Binária (ou monocromática) (ver Figura 2): Esta é uma imagem em que os *pixels* podem ter um de dois valores, normalmente referido como preto e branco. Cada *pixel* em uma imagem desse tipo é representado por um bit, tornando este o tipo mais simples de imagem [8] [9].

2. Tons de cinza (*grayscale image*) (ver Figura 3): Um *pixel* em tal imagem pode ter n valores de 0 a $n - 1$, indicando um dos tons de cinza (ou tons de alguma outra cor).

O valor de n é normalmente compatível com um tamanho em *bytes*; ou seja, pode ser de 4, 8, 12, 16, 24 *bytes*, ou algum outro múltiplo conveniente de 4 ou 8. O conjunto dos *bits* mais significativos de todos os *pixels* compõem o *bitplane* mais significativo. Assim, uma imagem em tons de cinza tem n *bitplanes* [9].

3. Tom contínuo: Este tipo de imagem pode ter muitas cores similares (ou tons de cinza). Quando *pixels* adjacentes diferem em apenas uma unidade, é difícil ou mesmo impossível para o olho humano distinguir as suas cores [9]. Como resultado, uma imagem desse tipo pode conter áreas com cores que parecem variar continuamente à medida que o olho se move ao longo da área (ver Figura 4). Um *pixel* desse tipo de imagem é representada por um único número grande (no caso de diversos tons de cinza) ou três componentes (no caso de uma imagem em cores). Uma imagem de tom contínuo é nor-



Figura 2. Imagem Binária (uso sob a licença *Creative Commons*)

malmente uma imagem natural (em oposição a artificial) e é obtido, por exemplo, ao se tirar uma foto com uma câmera digital, ou digitalizando uma fotografia através de um *scanner* [9].

4. Tom discreto (também chamada de imagem gráfica ou imagem sintética): Normalmente trata-se de uma imagem artificial. Tal imagem pode ter algumas ou muitas cores, mas sem o ruído e indefinição de uma imagem natural [9]. Por exemplo, um objeto artificial ou máquina, uma página de texto, um gráfico, um desenho animado digital, ou o conteúdo de uma tela de computador (ver Figura 5). Objetos artificiais, texto e desenhos de linha têm bordas afiadas e bem definidas, portanto, contrastado com o resto da imagem (o fundo) [9]. Muitas vezes os *pixels* adjacentes em uma imagem desse tipo são idênticos ou variam significativamente em valor. Tal imagem não é bem comprimida com métodos com perdas, pois a perda de apenas alguns *pixels* pode torná-la irreconhecível [9]. (ver seção 2, em que são discutidas as formas de compressão).

5. Cartoon-like: Esta é uma imagem colorida que consiste em zonas uniformes. Cada área tem uma cor uniforme, mas as áreas adjacentes podem ter cores muito diferentes (ver Figura 6). Este recurso pode ser explorado para obter excelente compressão [9].



Figura 3. Imagem em Tons de Cinza (Escala de Cinza) (uso sob a licença *Creative Commons*)

Os computadores atuais fazem uso de recursos gráficos de maneira extensiva. O progresso de muitas operações de sistema tal como realizar *download* de um arquivo pode ser acompanhado graficamente (ver Figura 7). Muitas aplicações possuem uma interface gráfica de usuário (GUI), o que facilita o uso de um programa e a interpretação dos resultados. A computação gráfica é usada em muitas áreas para a conversão de informações complexas em imagens [9]. Assim, imagens são importantes, mas elas costumam demandar alta capacidade de armazenamento.

Hardwares modernos são capazes de lidar com muitas cores, isso explica porque é comum ter um *pixel* representado internamente por um número de 24 bits, em que as porcentagens de vermelho, verde e azul são ocupadas por 8 bits cada [9]. O *pixel* de 24 bits pode especificar uma das $2^{24} \approx 16,78$ milhões de cores. Como resultado, uma imagem com resolução de 1024×1024 se torna quatro vezes maior, requerendo

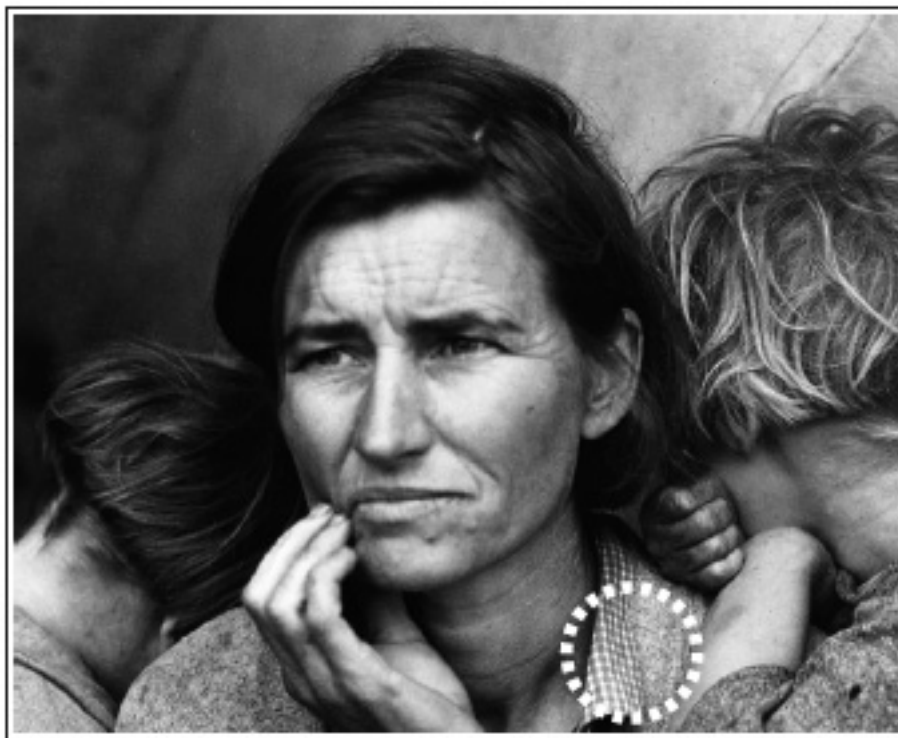


Figura 4. Imagem em tom contínuo, escaneada em 300 dpi (uso sob a licença *Creative Commons*)

3.145.728 bytes [9]. Os vídeos fazem com que os arquivos sejam ainda maiores, nesse contexto a compressão de imagens se torna fundamental.

Uma característica importante da compressão de imagens é a possibilidade de haver perdas. Uma imagem digital, tem por finalidade ser apreciada pela visão humana, assim é aceitável alguma perda em suas características se não são percebidas pelos olhos [9].

Em geral, a informação pode ser comprimida se ela é redundante. Caso haja perda, há então outro conceito, conhecido por compressão com remoção de “irrelevância”, ou seja, uma imagem pode ser comprimida, com perdas, removendo-se informação irrelevante, não sensível ao sistema psicovisual humano [9]. Neste texto, a irrelevância será tratada indiscriminadamente como redundância psicovisual.

A compressão de imagens tem sido estudada por longo tempo. O desenvolvimento de novas técnicas de compressão levou ao surgimento de vários padrões de compressão, tais como JPEG e JPEG2000 que são rotineiramente usados em muitas aplicações de usuário [3] [9]. Paralelamente, o problema da compressão de imagens se tornou

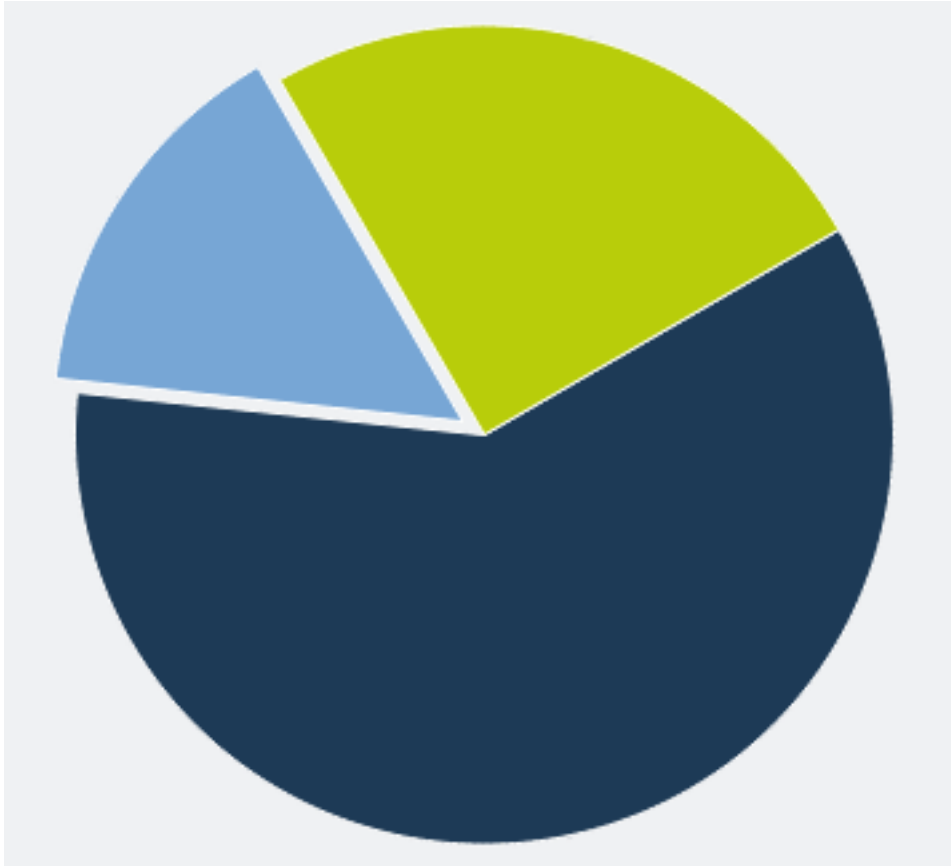


Figura 5. Imagem em Tom Discreto

mais cada vez mais importante para uma classe particular de imagens: aquelas adquiridas por satélites remotos com câmeras embarcadas [3]. Tais câmeras podem ser de diferentes espécies, podendo adquirir informação em todo o espectro de visão (imagem de banda única) ou especificamente em diferentes comprimentos de onda (imagens de bandas múltiplas) [3]. A quantidade de comprimentos de onda amostrados ditará a resolução espectral e, graus crescentes dessa resolução, de poucas para dezenas, centenas e milhares de bandas, dão origem às imagens multiespectrais, hiperespectrais e ultraespectrais, respectivamente [9].

Está claro que tamanha quantidade de dados, corresponderá à largura de banda disponível para transmissão, apenas se técnicas de compressão de imagens são empregadas. Isto tem estimulado bastante a pesquisa na busca de se desenvolver algoritmos



Figura 6. Imagem Cartoon-Like (uso sob a licença *Creative Commons*)

de compressão de imagem, embarcada, no contexto de sensoriamento remoto [9]. Além disso, quando as imagens são recebidas pelas estações de recepção terrestres e propriamente processadas (calibradas ou retificadas, por exemplo), elas devem ser entregues ao usuário final. Isso é tipicamente feito através de um navegador *web* (*web-browser*), o que, por consequência, demanda que os algoritmos de compressão sejam capazes de lidar com grandes volumes de imagem, de forma a atender aos requisitos dos usuários finais [9].

2 Métodos de Compressão de Imagem

Os métodos de compressão são divididos em duas classes: com perda e sem perda [12]. Caso a compressão seja sem perda, a imagem reconstruída após processo de decodificação é perfeitamente idêntica à original, sem nenhuma perda de informação. A entropia, que mede a quantidade de informação contida na fonte, dá o limiar teórico para a compressão sem perdas expressado pelo mais baixo *bitrate* (taxa) de compressão por *pixel* [12]. A entropia depende da natureza estatística da fonte e, idealmente, uma probabilidade de ordem infinita é necessária para avaliá-la [12]. A compressão sem perdas é altamente desejável uma vez que garante transparência em termos de qualidade

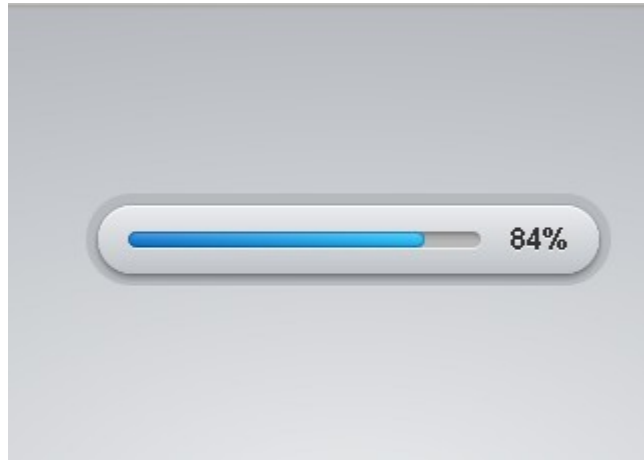


Figura 7. Exemplo de progresso de *download* em interface gráfica de usuário (GUI)

de imagem. Todavia devido ao limite teórico da entropia, as compressões sem perda tipicamente alcançam taxas de compressão limitadas [12].

Em contrapartida, algoritmos de compressão de imagens com perda proveem uma imagem reconstruída com um certo grau de perda da informação, uma vez que nem toda informação contida na imagem original é codificada no arquivo comprimido [12] (a Figura 8 ilustra os efeitos da compressão com perda). Isso permite atingir ganhos significantes de compressão quanto maior for a distorção com a imagem original. A compressão com perdas levanta a questão de se assegurar que a qualidade da imagem reconstruída, na decodificação, é ainda adequada para o uso científico pretendido. Nesse sentido, usualmente apenas uma pequena quantidade de distorção é tolerada, contudo, isso permite taxas de compressão muito maiores e vem se comparada às técnicas com perda, tornando-se uma abordagem bastante popular em estudos de sensoriamento remoto [12].

A quantidade de distorção tolerada pode depender de muitos fatores, em geral, se a distorção é pequena com respeito ao ruído de aquisição inerente da imagem, então esse efeito provavelmente será insignificante. Por outro lado, em algumas aplicações específicas, mesmo os ruídos de alto nível são aceitáveis e não reduzirão seriamente a *performance* da aplicação [12]. Em imagens de banda única, isso é particularmente importante para evitar a geração de artefatos visuais, enquanto que em imagens de bandas múltiplas é desejável que as técnicas de análise de imagem (tais como classificação, detecção de anomalia, etc.) produzam quase os mesmos resultados caso as técnicas fossem aplicadas à imagem original [9] [12].

Exemplo de Compressão com Perda



Figura 8. Exemplo de compressão com perda aplicada à imagem Lena

Um tipo particular de compressão com perda, chamado “quase sem perda”, é baseado no paradigma de controle da qualidade da imagem tratando de se impor uma limitação que, não importando quais operações sejam realizadas pelo algoritmo de compressão, o erro máximo obtido entre cada *pixel* da imagem original e da imagem reconstruída é limitado por algum valor pré-determinado pelo usuário (método semi-supervisionado) [12]. Essa é uma maneira simples de se evitar grandes erros ocasionais que podem ser prejudiciais na interpretação da imagem, por exemplo, provocando falsa detecção de anomalias [12].

Existem vários tipos de redundância em uma imagem, tais como redundância espacial, redundância estatística e redundância psicovisual (irrelevância). Basicamente, ao se remover esses tipos de redundância é que a compressão pode ser alcançada.

A seguir veremos de maneira mais detalhada cada uma dessas redundâncias.

2.1 Tipos de Redundância

Redundância Espacial: Redundância espacial significa que a informação em um *pixel* pode ser parcialmente deduzida a partir dos *pixels* vizinhos. Métodos de decorrelação espacial, tais como predição ou transformada, são usualmente aplicados para remover a redundância espacial [12]. A predição é usada para prever o valor de um *pixel* a partir dos *pixels* vizinhos. Por exemplo, o método de modulação de código de pulso diferencial (DPCM) é uma típica técnica baseada em predição. A transformada é usada para transformar a imagem do domínio do espaço para algum outro domínio,

aplicando-se, por exemplo, a transformada discreta do cosseno (DCT) ou a transformada discreta de wavelet (DWT) [12].

Redundância Estatística: Redundância estatística explora a probabilidade de símbolos. A ideia básica é atribuir códigos de palavras menores para símbolos de maior probabilidade. A codificação de Huffman e a codificação aritmética são dois métodos populares para remover a redundância estatística, são comumente chamadas de codificação por entropia [12].

Redundância Psicovisual: A redundância psicovisual, quando de uma compressão com perdas, explora o fato de que o olho humano não é sensível às altas frequências. A remoção da informação irrelevante à visão humana normalmente é alcançada por quantização, com os elementos de alta frequência sendo sobre-quantizados ou mesmo removidos [12].

2.2 Arquitetura e Técnicas de Compressão

Geralmente o modelo de sistema de compressão consiste de dois blocos estruturais: o codificador e o decodificador [5]. O codificador cria o código de transmissão do dado de entrada original. Após a transmissão pelo canal, o decodificador gera um dado de saída reconstruído [5].

Um típico modelo de um codificador consiste em três módulos funcionais, como mostrado na Figura 9: um módulo de predição (para sistemas de compressão baseados em predição) ou um módulo de transformada para frente (para sistemas de compressão baseados em transformada) que realiza a decorrelação espacial, um módulo quantizador que reduz o alcance dinâmico dos erros e um módulo codificador de entropia que reduz a redundância de codificação [5]. Quando a compressão sem perda é desejada, o passo de quantização é omitido, pois é uma operação irreversível [5].

Basicamente o decodificador consiste em dois módulos funcionais: o decodificador de entropia e uma predição ou transformada inversa. O passo de quantização resulta em uma perda de informação irreversível e a reconstrução do dado quantizado é baseado nos pontos médios de cada intervalo de quantização [5].

Diferentes esquemas podem ser usados para a decorrelação espacial. Em geral, eles podem ser divididos em: baseados em predição ou baseados em transformada. Técnicas de predição são usadas para prever o valor atual de um *pixel* a partir dos valores de *pixels* vizinhos. Dentre os métodos de compressão por predição incluem-se

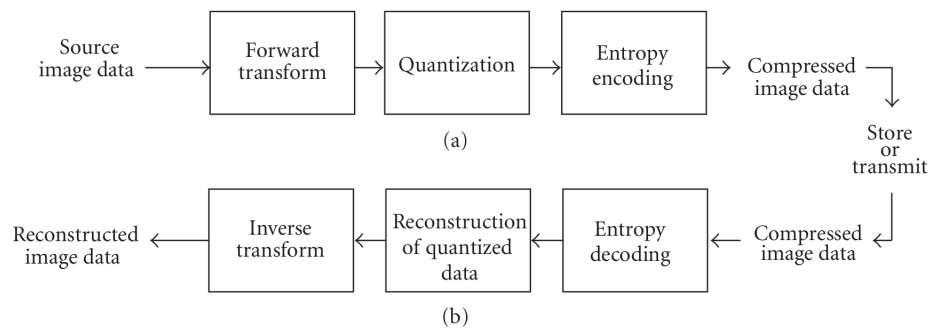


Figura 9. Um diagrama de blocos geral dos sistemas de compressão de imagem: (a) codificador e (b) decodificador.

o DPCM (Differential Pulse Code Modulation) e o JPEG (Joint Photographic Experts Group) sem perdas, o JPEG-LS [5]. Os sistemas baseados em transformada, realizam um mapeamento da imagem, a partir do domínio de espaços (*pixel*), em um sistema de coordenadas de imagem rotacionado num espaço de sinal, aplicando-se transformadas, tais como DCT (discrete cosine transform) e DWT (discrete wavelet transform). O padrão JPEG é um esquema de compressão baseado no DCT. Esquemas de compressão baseados no DWT incluem o JPEG2000, ICER e o CCSDS-IDC (Consultative Committee for Space Data Systems-Image Data Compression). O novo padrão JPEG-XR (JPEG Extended Range) usa uma outra transformada conhecida por LBT (Lapped Biorthogonal Transform).

De acordo [12] e [5], compressões preditivas e baseadas em DCT são os métodos mais comuns para uso embarcado em satélite. Embora os métodos baseados em predição tenham baixa taxa de compressão, eles ainda são populares em missões espaciais devido a sua eficácia em alcançar compressão de dados sem perda, além de apresentarem baixa complexidade computacional. Muito embora métodos de compressão baseados em DCT com perdas tenham blocos indesejáveis de efeitos de artefato, eles tem sido bastante usados por muito tempo. Contudo, mais recentemente, os esquemas de compressão baseados em DWT têm sido mais usados em missões espaciais, uma vez que proveem melhor qualidade de imagem [5].

2.3 Consultative Committee for Space Data Systems - CCSDS

Algumas técnicas de compressão que foram e serão discutidas nesse texto, fazem menção ao comitê CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems), com o

objetivo de tornar o texto o mais autocontido possível, tratamos brevemente sobre o que vem a ser esse comitê.

O CCSDS foi fundado em 1982 por agências espaciais governamentais e quase-governamentais para discutir e desenvolver padrões para dados espaciais e sistemas de informação. Atualmente é composto por 11 agências membros, 28 agências observadoras e mais de 140 associações industriais [1].

O CCSDS trabalha para apoiar a colaboração e interoperabilidade entre membros de agências através da instituição de padrões de sistemas e dados.

Cada nação participante no CCSDS pode ter uma organização como agência-membro. As atuais 11 agências-membros no CCSDS são [1]:

- Agenzia Spaziale Italiana (ASI) - Itália
- Canadian Space Agency (CSA) - Canadá
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) - França
- China National Space Administration - China
- German Aerospace Center (DLR) - Alemanha
- European Space Agency (ESA) - Alemanha
- **National Institute for Space Research (INPE)** - Brasil
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) - Japão
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) - Estados Unidos
- Russian Federal Space Agency (RFSA) - Rússia
- UK Space Agency - Reino Unido

Cujos emblemas são compilados na Figura 10.



Figura 10. Emblemas das agências que compõem o CCSDS (uso sob a licença *Creative Commons*)

2.4 Sistemas de Compressão Baseados em Predição

A idéia básica por trás desta técnica é prever o valor de um *pixel* baseado na correlação entre certos valores de *pixels* vizinhos usando certos coeficientes de predição

[5]. O número de *pixels* usados na predição é chamado ordem de predição. A diferença entre o valor predito e o valor de fato dos *pixels*, fornece a diferença (residual) da imagem, que é muito menos correlacionada espacialmente que a imagem original [5]. A imagem diferença é então quantizada e codificada. A função básica da quantização é mapear um conjunto grande de valores em um conjunto de valores relativamente menor [5].

Métodos preditivos não requerem muito armazenamento e apresentam um bom *tradeoff* entre complexidade e eficiência. A principal desvantagem dos métodos de predição é sua susceptibilidade à propagação de erros [5].

Agora iremos analisar dois métodos preditivos para compressão de imagens, um com perda e outro sem perda, que servirão de ilustração para sedimentar os conceitos até então discutidos.

DPCM - Differential Pulse Code Modulation É a abordagem mais comum de codificação preditiva, oferece vantagens de simplicidade computacional e é fácil de paralelizar em *hardware* [5].

Assim como em [6], iremos analisar o algoritmo implementado pela CAST/China tendo em vista seu uso com a câmera PANMUX a bordo do CBERS 3 e 4. O diagrama desse algoritmo, com perda, é mostrado na Figura 11.

O codificador usa o valor do *pixel* reconstruído precedente para prever o próximo *pixel*, ou seja, $\tilde{x}_n = \rho \cdot \hat{x}_{n-1}$, em que ρ é um coeficiente de predição para reduzir a propagação de erro [6]. Neste algoritmo DPCM, em particular, o erro de predição é quantizado de 8 bits para 4 bits, resultando em uma razão de compressão fixa de 2. Por fim, o erro quantizado \hat{e}_n é codificado com um codificador binário [6].

As distorções típicas causadas pela quantização no DPCM com perda são: ruído granular nas áreas planas da imagem e suavização das bordas (slope overload) [6].

JPEG-LS sem perda JPEG-LS é um método de compressão de imagens preditivo, sem perda ou quase sem perda, baseado no algoritmo LOCO-I (Low Complexity Lossless Compression for Images) (ISO/IEC FCD 14495-1, 1997) [6]. O diagrama básico pode ser visto na Figura 12. De forma simples, pode-se dizer que o JPEG-LS consiste em dois estágios independentes chamados modelagem e codificação [6]. A modelagem é baseada em um contexto determinado por quatro amostras reconstruídas nas posições a, b, c e d . A partir destes valores, o contexto irá determinar se a informação na amostra x deveria ser codificada no modo regular ou no modo de corrida. O modo de corrida é selecionado quando o contexto estima que sucessivas amostras são idênticas (para

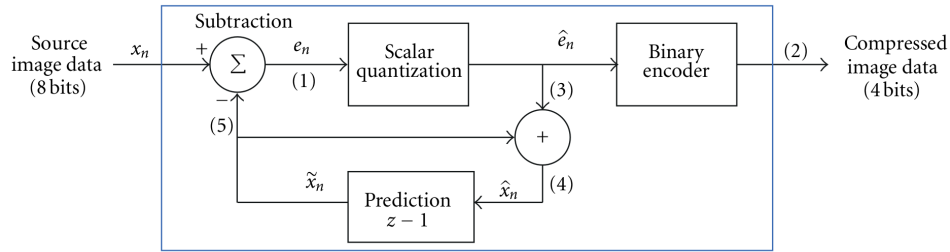


Figura 11. Um diagrama do método de codificação DPCM (extraído de [5])

codificação sem perda) ou quase idênticas (para codificação quase sem perda), caso contrário, o modo regular é usado [6].

Modo Regular A modelagem de contexto é seguida por um procedimento de predição (descorrelação) e codificação de erro [6]. O preditor combina os valores reconstruídos das três amostras vizinhas nas posições a , b e c usando um preditor de detecção de borda ou preditor LOCO-I para prever a amostra na posição x [6]. O erro de predição é calculado como a diferença entre o valor real da amostra na posição x e seu valor predito. Os erros de predição são codificados usando um procedimento derivado da codificação de Golomb que associa códigos mais curtos para símbolos mais frequentes [6] [5].

Modo de Corrida Se os valores reconstruídos das amostras em a , b , c e d são idênticos (para codificação sem perda) ou se as diferenças entre elas estão dentro de um limite (para codificação quase sem perda), o procedimento de modelagem de contexto seleciona o modo de corrida e não executa a predição e codificação de erro [6]. No modo de corrida, uma sequência de amostras consecutivas com valores idênticos (ou valores dentro de um limite especificado) é codificada [6].

2.5 Sistemas de Compressão Baseados em Transformada

Os sistemas de compressão baseados em transformada são baseados no fato de que a descorrelação dos coeficientes de uma transformada pode ser codificada mais eficientemente do que os *pixels* da imagem original [5]. A transformada tipicamente resulta em alguma compactação de energia, ou seja, a energia de redistribuição da imagem

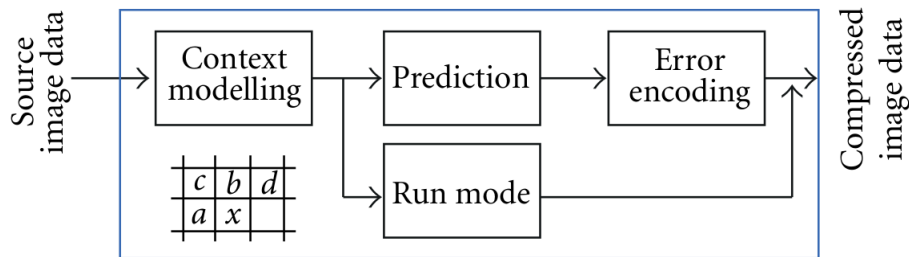


Figura 12. Um diagrama simplificado do codificador do JPEG-LS (extraído de [5])

original em um conjunto menor de coeficientes. Muito embora a energia seja compactada em menos coeficientes, a energia total é conservada, resultando em um número significativo de coeficientes com valores zero ou próximos de zero [5].

Vários tipos de transformada, com diferentes eficiências, métodos de compactação e complexidade computacional, são úteis nos sistemas de compressão. As transformadas mais comuns para compressão de dados são: o DCT (*discrete cosine transform*) e o DWT (*discrete wavelet transform*) [5] [12] [3].

Sistema de Compressão Baseados em DCT A transformada discreta do cosseno expressa uma sequência finita de pontos em termos da soma de funções cossenos, oscilando em diferentes frequências .

O uso do cosseno ao invés do seno é crítico para a compressão, uma vez que um número menor de funções cosseno são necessárias para aproximar um sinal típico.

O JPEG *baseline* é uma técnica de compressão típica baseada em DCT, ele é o padrão para tratar imagens fixas que permitam codificação com perda e sem perda [5]. O JPEG sem perda é uma técnica de compressão de codificação preditiva, independente, que inclui codificação diferencial, *run length* e codificação de Huffman [5]. JPEG sem perda não é usado com frequência em missões espaciais devido a sua baixa taxa de compressão [5].

Existem vários modos definidos para o JPEG, pode-se citar o *baseline* (codificação sequencial), progressivo e hierárquico. O modo *baseline*, que suporta apenas compressão com perda usando o DCT é o mais popular [5]. O fluxo do processo é mostrado na Figura 13. O codificador do JPEG-*baseline* começa com um bloco 8×8 baseado no DCT, passa por quantização, ordenação zigzag e codificação de entropia com tabelas de Huffman. Quando ajustes de qualidade são aplicados na imagem, blocos de artefa-

tos são induzidos pelo processo de codificação e sérias degradações na qualidade da imagem se tornam evidentes [5].

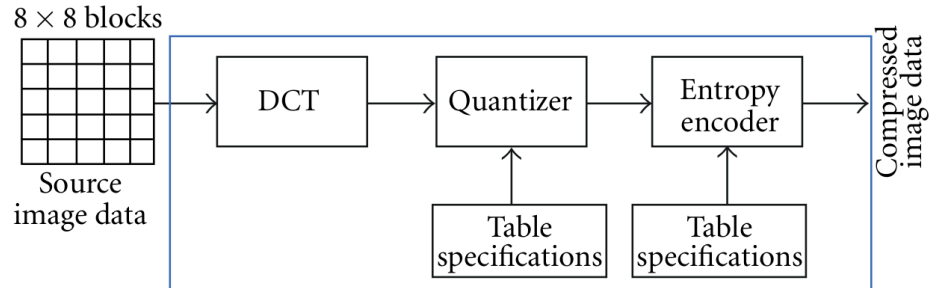


Figura 13. Um diagrama simplificado do codificador do JPEG-LS (extraído de [5])

Sistema de Compressão Baseados em DWT A transformada *wavelet* decompõe a imagem original em uma soma de funções espaciais e frequências localizadas, de forma similar à decomposição sub-banda [5]. A mais importante informação visual tende a se concentrar em um número reduzido de componentes (coeficientes), portanto, os coeficientes remanescentes podem ser quantizados grosseiramente ou truncados para zero com pequena distorção na imagem [5]. Métodos de compressão baseados em *wavelets* impedem a ocorrência de blocos de artefatos comuns nos métodos baseados em DCT [5]. Esta é uma das razões pelas qual esquemas de compressão baseados em wavelet tendem a produzir imagens de qualidade superior [5] [6].

O CCSDS-IDC é uma nova recomendação para compressão de imagens adequado para aplicações espaciais, que foi estabelecido em 2005 [5] [6] [12]. A técnica de compressão descrita nessa recomendação pode ser usada para produzir imagens comprimidas com perda ou sem perda [5].

O compressor CCSDS-IDC consiste de duas partes funcionais: o módulo da transformada discreta de *wavelet* (DWT), que realiza a decomposição da imagem e um codificador *bit-plane*, que codifica o dado transformado como mostrado na Figura 13 [5]. Essa arquitetura é similar ao da estrutura do JPEG2000, diferindo dele em alguns aspectos, a saber: (a) visa especificamente instrumentos *high-rate* usados a bordo em missões espaciais, (b) um *tradeoff* foi realizado entre performance de compressão e complexidade, (c) a menor complexidade suporta implementação de *hardware* de baixo

consumo energético, (d) tem um conjunto limitado de opções. De acordo com [5] *apud* [11], o CCSDS-IDC pode alcançar performance similar a do JPEG2000.

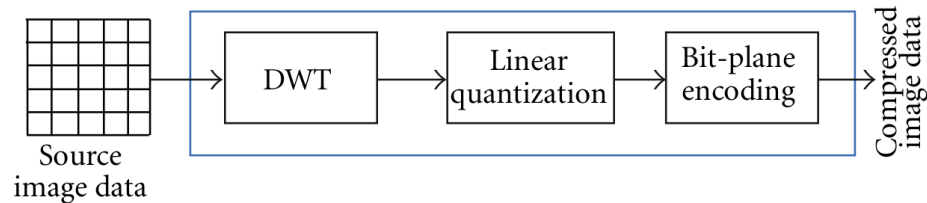


Figura 14. Um diagrama geral do codificador do CCSDS-IDC (extraído de [5])

JPEG-XR JPEG-XR é o mais novo padrão de compressão de imagens do comitê JPEG [5] *apud* [7]. As principais operações de JPEG-XR, como transformada, quantização escalar e codificação, são mostradas na Figura 15. A transformada LBT (Lapped Biorthogonal Transform) mapeia os *pixels* do domínio espacial para o domínio da frequência. Um parâmetro de quantização modifica cada coeficiente da transformada. Por fim, os coeficientes são codificados [6].

JPEG-XR usa uma técnica de quantização dos coeficientes que é controlada pelos parâmetros de quantização (QPs) [6]. Os coeficientes são organizados e convertidos em um vetor unidimensional antes de serem codificados. Para isto, é usada uma técnica de codificação de comprimento variável (VLC) através de uma tabela; baseada em estatísticas locais, uma tabela VLC é selecionada de um pequeno conjunto de tabelas predefinidas [6].

A imagem é dividida em macroblocos com 256 coeficientes: um DC, 15 passa-baixa, e 240 passa-alta. Os dados da imagem são representados no domínio da frequência, e os coeficientes associados com cada macrobloco são divididos em três bandas de frequência: coeficientes DC, coeficientes passa-baixa e coeficientes passa-alta [6]. Esta divisão hierárquica suporta descompressão em três resoluções diferentes contendo apenas coeficientes DC, sem coeficiente passa-alta e todos os coeficientes passa-baixa [6].

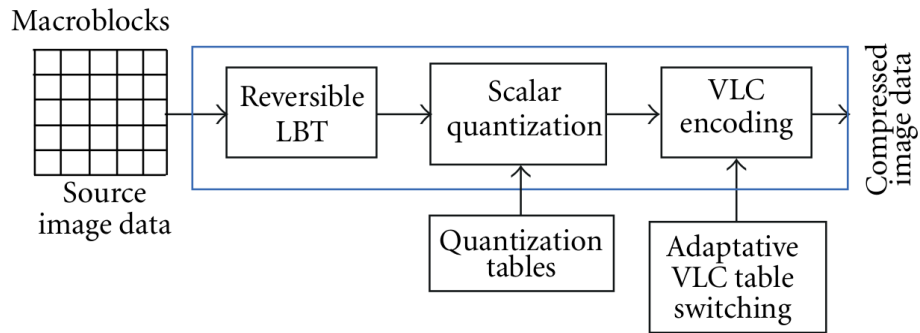


Figura 15. Um diagrama de blocos do codificador do JPEG-XR (extraído de [5])

3 Compressão Embarcada

Imagens adquiradas por dispositivo embarcados em naves espaciais (satélites de observação da Terra, por exemplo) representam na maioria dos casos um alto volume de informação. É necessário armazenar esses dados embarcados e transmiti-los para a estação terrestre. Devido às limitações inerentes (em termos de capacidade de armazenamento e consumo de energia elétrica) relacionados ao equipamento a bordo e seu custo, é essencial reduzir ao mínimo a capacidade de armazenamento a bordo e a taxa de transmissão necessárias para cumprir a missão [2].

Compressão de imagem embarcada tem se mostrado cada vez mais uma solução vantajosa por duas razões principais:

1) As melhorias de desempenho dos algoritmos de compressão, em função de diversas pesquisas nas áreas das telecomunicações, televisão e computação [2].

2) A disponibilidade nos últimos anos para aplicações de missão espacial de circuitos altamente integrados (tecnologia ASIC) que tornou possível a implementação, em sistemas de altas taxas de *pixel*, esquemas de compressão sofisticados que trabalham em tempo real [2].

3.1 Requisitos para Compressão Embarcada

Ao se projetar uma algoritmo para uso a bordo deve-se levar em conta um número de limitações ditadas pela estrutura do sistema de processamento a bordo. A Figura 16

mostra a modelo operacional de um sensor a bordo em um avião.

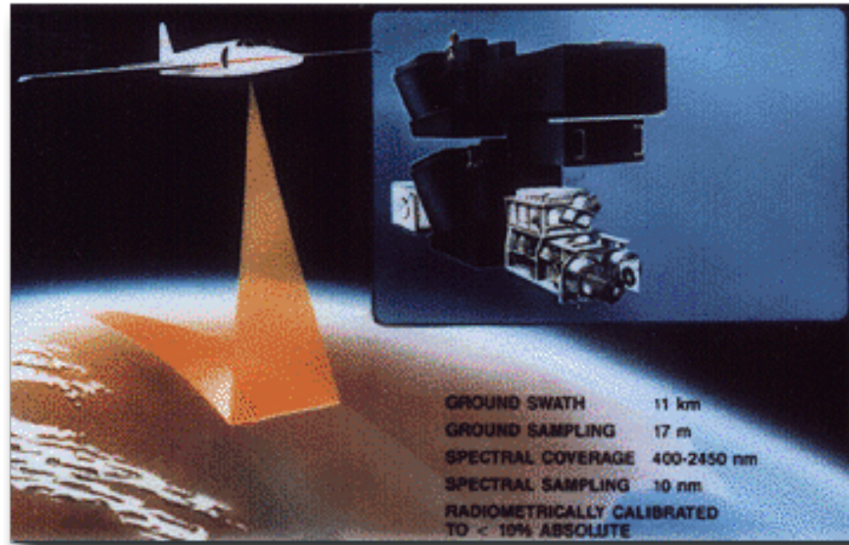


Figura 16. Modelo operacional AVARIS (NASA/JPL-Caltech) (extraído de [3])

Tal sistema de processamento embarcado é tipicamente limitado por capacidades computacionais das quais incluem energia elétrica, capacidade de armazenamento e questões quanto à proteção contra radiação [3]. Portanto, baixa complexidade de codificação é altamente desejável. Além disso, o planejamento de codificador deve ser tal que o algoritmo deva ser de fácil implementação no hardware disponível [3].

O hardware típico para processamento a bordo se desenvolveu bastante através dos anos. Usualmente a escolha preferida é um “Arranjo de Portas Programável em Campo” (*Field Programmable Gate Array - FPGA*), que requer uma descrição do algoritmo em uma linguagem de descrição de hardware, tal como VHDL. Assim, o algoritmo não deve empregar operações que são difíceis de serem mapeadas para uma descrição VHDL [3].

Outro requisito é a habilidade de lidar de maneira apropriada com dados brutos. Isso significa que um algoritmo de compressão embarcado terá como entrada os números digitais originais gerados pelo sensor, anterior a qualquer processamento além do armazenamento. Logo, todas as imperfeições dos sensores, tais como ruído, listras (*stripes*), registros errados, etc., que são comumente corrigidos no segmento em

solo, estarão presentes na imagem [3]. Isso implica que tais imperfeições levarão à perda de eficiência na compressão e essa perda pode se tornar bastante grande ao menos que os algoritmos sejam robustos. A recomendação CCSDS-123 define modos de predição que são robustos com relação à ruído de listras (*striping*) [3].

Além disso, é conhecido que a transmissão de imagens de uma plataforma remota para a estação terrestre pode sofrer erros ou perdas de pacote. Esse fenômeno é bastante presente em missões no espaço profundo, devido às longas distâncias de transmissão, e menos comum na observação da Terra por satélites [3]. Mesmo assim, uma vez que a perda de um único pacote pode tornar o arquivo da imagem comprimida completamente indecodificável, outro requisito recai no fornecimento de algum tipo de resiliência a erros, ou seja, o processo de decodificação não pode ser avariado completamente nem prejudicar os dados excessivamente, devido a ocorrência de erros ocasionais ou perdas de pacotes [3].

Embora haja uma grande quantidade de sofisticadas técnicas disponíveis em termos de resiliência a erros, em compressão de imagens para a observação da Terra, a abordagem mais típica é resetar o algoritmo de compressão de tempos em tempos, de forma a criar um conjunto de unidades de imagem independentemente decodificáveis, como isso limitando o escopo de qualquer perda de informação devido a erros de comunicação [3].

O fluxo de dados em um processo de compressão e armazenamento de uma imagem no contexto de missão espacial pode ser ilustrado pelo esquema da Figura 17.

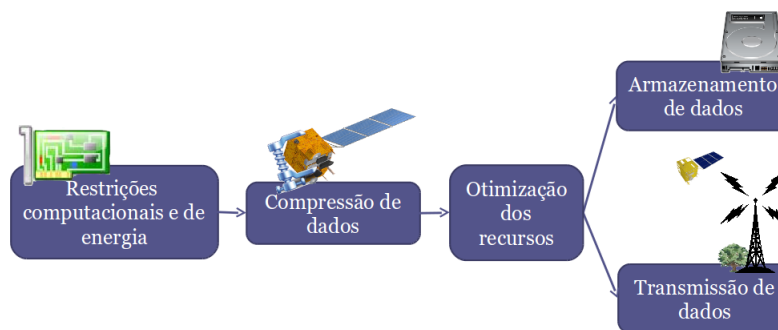


Figura 17. Processo de aquisição/armazenamento de imagens de satélites

4 Compressão em Solo

A compressão em solo tem como principal característica prática, o fato de que as restrições de computação são menos exigentes [4].

Deve-se notar que os requisitos mencionados na seção anterior se aplicam majoritariamente à compressão embarcada, enquanto que outra típica aplicação de algoritmos de compressão é no segmento em solo. Nesse caso, contudo, os requisitos são bastante diferentes, uma vez que já não há limitação significativa de poder computacional e memória para realizar a compressão e o objetivo é também diferente, o de distribuir as imagens ao usuário final [3]. Já que nesse caso a maior parte das comunicações se dá através do protocolo TCP/IP, que realiza retransmissões até que o arquivo de imagem comprimida seja recebido sem erros, a propriedade de resiliência a erros é menos importante [3]. Por outro lado, alguns problemas específicos podem surgir como consequência do modo pelo qual as imagens são acessadas pelos usuários finais. Em particular, esses usuários normalmente se conectam aos mecanismos de busca por navegadores *web* (*web-browsers*) ou algum outro *software* específico, que os permitem buscar por imagens e seus metadados para facilitar a escolha de imagens de interesse [3].

Dada a grande quantidade em bits dessas imagens, esse processo de busca remoto só é possível se um algoritmo de compressão é empregado, evitando o envio do arquivo comprimido completo, uma vez que apresenta um tamanho enorme, mas enviando subunidades desse arquivo, que podem ser empregados no decodificador para reconstruir regiões específicas de interesse que o usuário venha a selecionar arrastando, por exemplo, um *mouse* sobre uma imagem pré-visualizada [3]. Além disso, de maneira a aumentar a velocidade do processo de seleção da imagem [3], é importante que o algoritmo de compressão ofereça escalabilidade, ou seja, permita enviar primeiro uma versão de baixa qualidade da sub-imagem de interesse, e então uma ou mais camadas com qualidade melhorada, de maneira que atrasos possam ser evitados, se o usuário rejeita antecipadamente uma sub-imagem anteriormente escolhida e mova o cursor para outra sub-imagem.

A Figura 18 ilustra todo o processo desde a captação das informações da superfície terrestre pelo satélite até a recepção no segmento em solo e posterior processamento da imagem recebida visando a entrega ao usuário final.

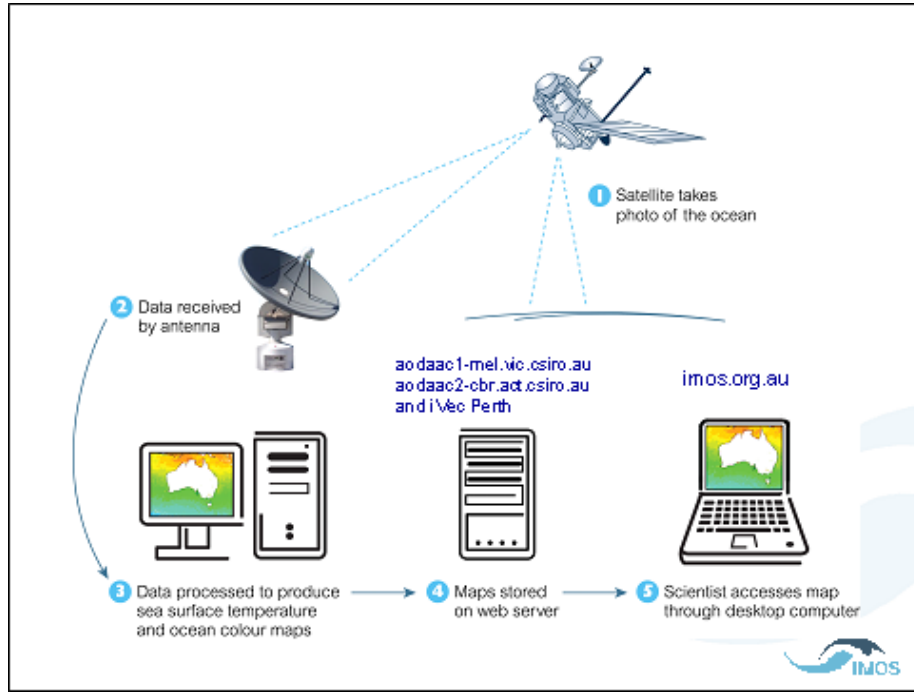


Figura 18. Cenário geral do processo de distribuição de imagens de satélites (uso sob a licença *Creative Commons*)

5 Adendo - Métricas para comparação de técnicas

Uma vez apresentadas algumas técnicas de compressão e seu funcionamento geral, nessa seção discutimos algumas métricas para comparação dos resultados de compressão.

5.1 Taxa de Compressão

É definida como o número de *bits* da imagem original dividido pelo número de *bits* usados para representar a imagem comprimida [5].

Em uma compressão de imagens com perda, uma medida comum para a representação da distorção é dada pelo erro mínimo quadrático (MSE), definido por [5]:

$$MSE = \frac{1}{w.h} \sum_i \sum_j (x_{i,j} - \hat{x}_{i,j})^2 \quad (1)$$

em que $x_{i,j}$ e $\hat{x}_{i,j}$ são o valor do *pixel* original e reconstruído, respectivamente, na i -ésima linha e j -ésima coluna. w e h denotam a largura e a altura, respectivamente. Mais comumente, a qualidade da imagem é avaliada em termos da relação sinal-ruído de pico (PSNR), medida em decibéis (dB) e definida por [5]:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(2^B - 1)^2}{(MSE + 1/12)} \quad (2)$$

em que B é a faixa dinâmica (em *bits*) da imagem original. O termo $1/12$ elimina o valor infinito para o PSNR quando o MSE se aproxima de 0 e representa o MSE associado com a quantização do dado original análogo [5].

Uma vez que sinais de imagem são altamente estruturados, as dependências de *pixels* carregam informação estrutural importante sobre o conteúdo da imagem [5]. Embora o PSNR seja uma medida útil e prática, a informação estrutural pode não ser bem mensurada por ele. Nesse contexto, em [5] *apud* [10] é usada outra métrica de qualidade conhecida por Índice de Similaridade Estrutural (SSIM), definida por:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3)$$

em que μ_x e μ_y são as médias amostrais locais das janelas x e y de tamanho $N \times N$, σ_x e σ_y são os desvios padrões amostrais locais de x e y , e σ_{xy} é a amostra de correlação cruzada de x e y após remover suas médias [5]. As constantes C_1 e C_2 são incluídas para evitar instabilidade quando os valores no denominador da equações são muito próximos de zero [5].

O índice SSIM é computado localmente numa janela deslizante (*sliding window*) (por exemplo janelas 8×8) que se move *pixel* por *pixel* através da imagem, resultando em um mapa SSIM [5]. Essa medida leva em conta a luminância, contraste e informação estrutural na imagem. Também é possível usar o índice SSIM médio para avaliar a qualidade geral da imagem [5]:

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j) \quad (4)$$

em que X e Y são a imagem referência e distorcida, respectivamente. x_j e y_j são os conteúdos da j -ésima janela local e M é o número de janelas locais da imagem [5].

6 Considerações Finais

Neste trabalho buscou-se situar a questão da compressão de imagens no contexto de observação da Terra para uma plataforma orbital, tal como um satélite.

Ficou evidente que a maior atenção tem sido dada às técnicas de compressão a bordo, uma vez que quanto mais informação for possível ser enviada desde a plataforma orbital até à estação terrestre, mais dados novos poderão ser apreciados pelo usuário final.

Uma vasta gama de requisitos para compressão a bordo foram discutidos, o que acreditamos tenha deixado claro as potenciais limitações que podem comprometer uma missão espacial.

Uma vez no contexto da plataforma orbital, exploramos as tecnologias de *hardware* e os modelos de *software*, levantando suas propriedades técnicas tal como o algoritmo utilizado para realizar a compressão e o que se pode esperar da imagem final quando aplicando determinada técnica.

No segmento em solo, o objetivo principal é preparar a imagem para a apreciação do usuário final, como a capacidade computacional e de energia é ilimitada se comparada com contexto a bordo, as melhores técnicas de compressão tendem a ser aplicadas, além do tratamento da imagem contra eventuais artefatos originários de problemas no sensor embarcado ou relacionados com a movimentação do satélite.

Por fim, mencionamos algumas métricas para a avaliação objetiva das técnicas de compressão, o que acreditamos tenha dado um maior *insight* matemático sobre como a comunidade científica trabalha com os *tradeoffs* que as técnicas apresentam em situações específicas.

Referências

1. Consultative committee for space data systems. <http://public.ccsds.org/default.aspx>. Accessed: 2015-09-15.
2. *On-board optical image compression for future high-resolution remote sensing systems*, volume 4115, 2000.
3. I. Blanes, E. Magli, and J. Serra-Sagrista. A tutorial on image compression for optical space imaging systems. *Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE*, 2(3):8–26, Sept 2014.
4. Emmanuel Christophe, Carole Thiebaut, and Christophe Latry. Compression specification for efficient use of high resolution satellite data.
5. Lilian N. de Faria, Leila Maria Garcia Fonseca, and Max H. M. Costa. Performance evaluation of data compression systems applied to satellite imagery. *J. Electrical and Computer Engineering*, 2012:471857:1–471857:15, 2012.
6. Lilian Nogueira de Faria, Leila Maria Garcia Fonseca, and Max Henrique Machado Costa. Métodos para compressão de imagens em satélites de sensoriamento remoto. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16. (SBSR), 2013.
7. F. Dufaux, G.J. Sullivan, and T. Ebrahimi. The jpeg xr image coding standard [standards in a nutshell]. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 26(6):195–199, 204–204, November 2009.
8. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 2006.
9. David Salomon. *Data Compression: The Complete Reference*. 2007. With contributions by Giovanni Motta and David Bryant.
10. Zhou Wang and Alan C. Bovik. Mean squared error: Love it or leave it?, 2009.
11. Pen-Shu Yeh, P. Armbruster, A. Kiely, B. Masschelein, G. Moury, C. Schaefer, and C. Thiebaut. The new ccsds image compression recommendation. In *Aerospace Conference, 2005 IEEE*, pages 4138–4145, March 2005.
12. Guoxia Yu, Tanya Vladimirova, and Martin N Sweeting. Image compression systems on board satellites. *Acta Astronautica*, 64(9):988–1005, 2009.