

Modelo Digital de Elevação como Apoio à Navegação Aérea

**Camilo José Martins Gomes
Cristiane de Barros Pereira
Cart Ralf von Lasperg
Maira Kronember Lima
Leonardo Marini Pereira**

Instituto de Cartografia Aeronáutica
20.021-130 Rio de Janeiro RJ
(asdir-ica, adjdcar-ica, car5-ica, car2-ica, car4-ica, car3-ica)@decea.gov.br

Resumo: Este trabalho tem por finalidade apresentar à Comunidade Cartográfica alguns aspectos técnicos do novo desafio tecnológico que se apresenta para o ICA. O capítulo 10 do Anexo 15 da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) preconiza que os 137 (cento e trinta e sete) aeroportos brasileiros que operam IFR (Instrument Flight Rules) deverão possuir modelo digital de elevação (MDE) e dados eletrônicos de terreno, segundo especificações do documento 9881 e os padrões de qualidade da série ISO 19000. Esta é uma tarefa grandiosa que necessitará significativos recursos humanos e financeiros. Consciente da responsabilidade que lhe cabe como organização do Comando da Aeronáutica que tem como missão “Planejar, Gerenciar, Controlar e Executar as atividades relativas à Cartografia e as Informações Aeronáuticas”, o ICA começou a dar os primeiros passos para viabilizar este projeto. Entre as atividades previstas estão incluídas a aquisição de equipamentos de fotogrametria digital (ERDAS e LPS) e treinamento da equipe envolvida. Além disto, está sendo realizado um projeto piloto no aeroporto de Jacarepaguá-RJ, que tem por finalidade consolidar a experiência nesta área do conhecimento. Científico/tecnológico.

Palavras chaves: Anexo 15 da OACI, modelo digital de elevação e dados eletrônicos de terreno (MDE), ISO 19000, SAR, LIDAR, SRTM.

Abstract: The present paper aims at presenting to the Cartographic Community certain aspects of the new technological challenge that the Aeronautical Cartographic Institute (ICA) is facing. Chapter 10 of Annex 15 to the Convention of International Civil Aviation (ICAO), establishes that the 137 (a hundred thirty seven) Brazilian airports operating IFR (Instrument Flight Rules) should count on Digital Elevation Models (DEM) and electronic terrain data, according to 9881Doc specifications and to the Quality Standards prescribed in ISO 19000 Series. This is a huge task that will demand significant amounts of economics and human resources. Conscious of its responsibility as a branch of the Aeronautical Command and of its mission which comprises “Planning, Managing, Controlling and Execution of the activities related to Cartography and Aeronautical Information”, ICA started up the first steps in view of turning this project workable. Amongst the established activities one might mention acquisition of Digital Photogrametric Devices (ERDAS and LPS) and training programs for the personnel involved. Besides that, a Pilot Project is being carried out in Jacarepaguá Airport aiming at consolidating all the scientific/technological knowledge acquired in this field.

Keywords: Annex 15 ICAO, digital elevation model and electronic terrain data, ISO 19000., SAR, LIDAR, SRTM

1 Introdução

O conhecimento da forma e das variações do relevo sempre constituiu um dado de grande valia para as mais diversas aplicações. A altimetria do terreno se faz bastante útil na hidrologia, possibilitando a detecção de linhas de drenagem e divisores de água (Quinn et al, 1991; Tarboton, 1997), bem como a identificação de áreas de risco de inundação (Mosquera-Machado e Ahmad, 2007). Tal dado pode também auxiliar na caracterização geológica de uma região (Fonseca et al., 2007), ser utilizado como fator ponderante na estimativa de potencial agrícola (Costa et al., 2005) e ainda servir de subsídio para o planejamento da ocupação urbana (Araújo et al., 2003).

Na aviação, o uso da informação altimétrica decorre do risco que o relevo e as edificações sobre o mesmo podem oferecer como obstáculos à navegação aérea. O conhecimento da altimetria do terreno pode apoiar os pilotos que planejam e executam os vôos visuais, bem como os elaboradores de procedimentos para o estabelecimento de níveis de vôo seguros em cartas aeronáuticas.

As cartas para navegação aérea visual (VFR) apresentam informações sobre as construções e o relevo necessárias ao apoio aos vôos visuais, dentre as quais as curvas de nível, as cotas e os obstáculos mais proeminentes. As Cartas de Obstáculos de Aeródromos e as Cartas de Aproximação Visual apresentam as informações do relevo, com um grau de detalhamento maior, por abrangerem áreas nas proximidades dos aeródromos

Diante da preocupação com os obstáculos, a OACI (*International Civil Aviation Organization*) estabeleceu em seu Anexo 15, capítulo 10 a geração de uma base de dados altimétricos do terreno e dos obstáculos sobre o mesmo, denominados de Dados Eletrônicos de Terreno e Obstáculos. A OACI é uma agência da ONU que foi criada em 1944, com objetivo de disciplinar a atividade aeronáutica internacional, no tocante às normas, métodos recomendados e procedimentos internacionais que tratem de: sistemas de comunicações e auxílios para a navegação aérea e sinalização terrestre; características dos aeroportos e áreas de aterrissagem; regras do ar e métodos de controle de tráfego aéreo; outorga de licenças do pessoal de operações e mecânicos; aeronavegabilidade das aeronaves; matrícula e identificação das aeronaves; compilação e intercâmbio de informação meteorológica; diários de bordo; mapas e cartas aeronáuticas; formalidades de alfândega e imigração; aeronaves em perigo; investigação de acidentes; e de outras questões relacionadas com a segurança, regularidade e eficiência da navegação aérea.

O Anexo 15 da OACI normatiza os dados eletrônicos do terreno e apresenta as definições relativas a terreno, relevo e obstáculos e as especificações do Modelo Digital de Elevação para quatro áreas, a saber: Área 1 (todo o território), Área 2 (área da Terminal ou a área contida num círculo de 45km de raio), Área 3 (área do aeródromo) e Área 4 (Para aeródromos Categoria II/III).

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é apresentar o projeto de sistematização de dados eletrônicos sobre o terreno e obstáculos, em atendimento aos requisitos do Anexo 15 da OACI.

2 Definições

2.1 Modelo Numérico ou Digital de Elevação (MNE/MDE)

A palavra “modelo” pode ser entendida, de acordo com Joly (1990), como uma “*representação simplificada da realidade em aparecem algumas de suas propriedades*”. Assim sendo, os Modelos Numéricos de Terreno podem ser definidos como um conjunto de dados numéricos que descrevem a distribuição espacial de uma característica do terreno (Doyle, 1978).

Modelos Numéricos, assim definidos, podem representar qualquer fenômeno que ocorra dentro de uma região da superfície terrestre. Dentre os usos deste tipo de modelo Burrough (1986) cita: armazenamento de dados de altimetria para a geração de mapas topográficos, informações geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, informação meteorológicas, dados geofísicos e geoquímicos etc.

São vários os nomes utilizados para a estrutura de armazenamento deste tipo de dado. Em geral, o nome Modelo Numérico ou Digital do Terreno (MNT ou MDT) é reservado para os modelos que representam um atributo qualquer da superfície terrestre. Quando este atributo é a altitude do terreno, pode-se reservar o nome Modelo Digital de Elevação (MDE) para as altitudes do terreno apenas. Quando o modelo contemplar também as altitudes dos objetos e das edificações presentes no terreno, é possível utilizar o nome Modelo Digital de Superfície (MDS).

Apesar da padronização de nomenclatura utilizada neste trabalho, é importante salientar que não existe até o momento, um consenso na definição de um padrão para se referir a modelos numéricos ou digitais que representem um determinado atributo da superfície terrestre. No caso específico do presente trabalho, o atributo utilizado é a altitude do terreno.

2.2 Formas de Representação

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, que pode ser representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, de

modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno (Felgueiras, 2001). São basicamente três as possíveis formas de representação de Modelos Numéricos do Terreno (Figura 1): pontos cotados com curvas de nível ou isolinhas, rede irregular de triângulos (TIN) e grade regular. A modelagem de dados do software SPRING, desenvolvido pelo INPE (Câmara et al., 1996), sintetiza as três citadas representações para este tipo de dado em uma categoria denominada MNT.

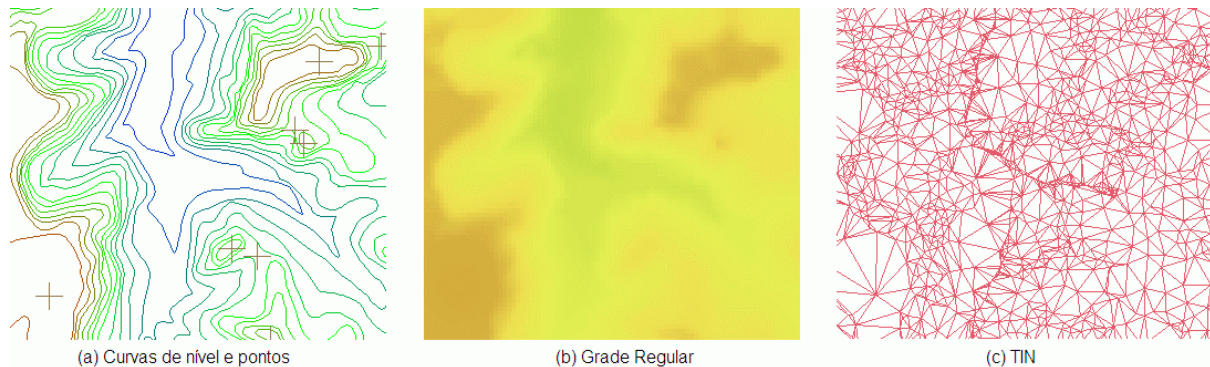


Figura 1 : Formas de representação de um MNT.

No presente trabalho, o atributo da superfície a ser utilizado em um MDE é a altitude. Neste caso, cada representação possui vantagens e desvantagens: As curvas de nível e os pontos cotados constituem amostras consistentes do terreno, porém, não é possível obter diretamente valores de altitude para todos os pontos da área de interesse, além de impossibilitar diretamente a integração matemática com outros tipos de dados geográficos. A estrutura de TIN melhor representa superfícies não homogêneas com variações locais mais acentuadas e todos os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral que originou a rede triangular, porém a estrutura de dados é mais complexa e menos intuitiva sendo necessário armazenar as relações topológicas entre os triângulos. Grades regulares para a representação da altimetria do terreno são mais simples, intuitivas e as relações topológicas entre as células são explícitas, no entanto apresentam problemas na representação de superfícies com variações locais acentuadas.

O MDE exigido pela OACI deve ser apresentado no formato de grade regular a fim de ser utilizado em cartas aeronáuticas eletrônicas (Filho, 2003). Sendo assim, quando não se dispõe de um modelo já pronto neste formato, faz necessário o levantamento de novos dados ou a conversão dos que já existem disponíveis em outro formato.

Uma fonte de dados altimétricos bastante comum são as cartas topográficas. Cartas dessa natureza são organizadas sistematicamente em função da escala de mapeamento. Porém, quando se trata de MDE no formato de grade regular, é comum a utilização do conceito de resolução e não de escala. Sendo assim, faz-se necessário converter uma determinada escala para uma determinada resolução.

Não existe atualmente uma regra específica para tal. O que se costuma, comumente, utilizar como maior resolução permitida para um MDE de grade regular é o valor de $0,5\text{mm} \times \text{Denominador da Escala da Carta (DEC)}$. Sendo assim uma carta topográfica na escala 1:50.000, por exemplo, poderia gerar um MDE com células de até 25 m e maiores. A fundamentação para a justificativa deste valor parte do princípio que a carta topográfica atende ao PEC nacional e apresenta pontos com erros em planimetria menores que $0,5\text{mm} \times \text{DEC}$. Assim estabelecido o erro da carta, as células do MDE devem possuir dimensões maiores que o erro máximo da carta para que não haja células dentro dos limites espaciais do erro.

3 Técnicas de aquisição de dados

Dentre as diversas técnicas de aquisição de dados altimétricos para grandes áreas, pode-se citar: a clássica estereoscopia por meio de fotografias aéreas; o levantamento com dados laser; a estereoscopia com imagens SAR; a interferometria SAR; e a estereoscopia com imagens orbitais de alta resolução. Cada método apresenta diferentes custos e precisões. A seguir uma revisão com as aplicações de cada método será apresentada.

3.1 Fotogrametria

A Fotogrametria é a ciência e tecnologia de se obter informação confiável, através de imagens adquiridas por sensores e também a técnica mais consagrada para aquisição de dados, essenciais para a extração do MDE.

O processo fotogramétrico pode ser subdividido em três fases: orientação interior, que consiste na conversão do sistema digital para o sistema da câmara; orientação exterior, que visa obter a posição tridimensional do centro perspectivo e os ângulos de atitude da câmara em cada imagem adquirida; e a extração dos pontos tridimensionais, que servem para a normalização dos pares estereoscópicos.

Os dados necessários para a elaboração de um MDE são as elevações de pontos no terreno. Estas podem ser obtidas através de curvas de nível digitalizadas, por métodos fotogramétricos, ou ainda através de levantamento de campo. O método mais prático para a geração de um modelo digital de terreno é a extração fotogramétrica digital, pois pode ser realizado em boa parte dentro de gabinete, sendo justificável a ida a campo apenas para coleta de pontos de controle.

3.2 LIDAR

O mapeamento digital a laser (LIDAR - *Light Detection and Ranging*) é capaz de gerar modelos digitais densos e precisos, tanto da topografia do terreno como da estrutura vertical da superfície. Os pontos são levantados diretamente no terreno, o modelo digital do terreno gerado não tem escala, mais sim uma precisão de 50 cm na planimetria e 15 cm na altimetria, no caso do sensor ALTM 2050 (Martins et al., 2004).

As imagens de intensidade e as imagens hipsométricas (intensidade + altitude) geradas pelo laser são totalmente digitais e ortoretificadas, tanto ao nível do solo como ao nível das edificações, com uma resolução de 10 cm até 1 m. Com tamanha precisão, os dados LIDAR conseguem atender o PEC classe A para cartas na escala 1:2.000 (Martins et al., 2004).

Para a obtenção da altimetria em áreas de floresta a partir de dados LIDAR faz-se necessário uma filtragem dos pontos adquiridos (Coelho e Vargas, 2007), uma vez que ocorre uma redução do número de retorno dos pulsos da superfície do terreno. Ainda assim, não se pode garantir que o pulso laser alcance o solo, principalmente em áreas de dosséis mais densos.

3.3 SAR

Dados provenientes de levantamento SAR (*Synthetic Aperture Radar*) constituem uma importante fonte na extração de informações altimétricas. A principal vantagem do radar é a sua capacidade em adquirir imagens independentemente da presença de luz, nuvens ou de fumaça.

Toutin e Gray (2000) apresentam uma revisão das possíveis técnicas para a extração de altimetria com dados SAR. Dentre as possibilidades, destacam-se a interferometria (InSAR) e a estereoscopia de radar, também chamada de radargrametria (Marinelli e Laurere, 1995).

As aquisições de dados terrestres por interferometria são particularmente importantes, pois a metodologia InSAR é capaz de fornecer uma grande quantidade de informações, em qualquer condição atmosférica, como na presença de nuvens e/ou fumaça, mesmo durante a noite. Em áreas de floresta, o MDE obtido pela interferometria da banda P é capaz de fornecer a altitude do terreno ao passo que o produto interferométrico da banda X apresenta valores de altitude para a copa das árvores (Hemerly et al., 2007).

Liporaci et al. (2004) atestam que a produção de informações cartográficas para fins de cadastro técnico multifinalitário, em escala 1:10.000, se dá de maneira mais eficiente e com baixo custo, por meio de radar interferométrico, para a obtenção da altimetria, em conjunto com imagens Ikonos para a identificação e extração das feições. Os autores garantem que o custo da solução Radar/Ikonos é inferior ao da fotogrametria.

Lançando mão da técnica de estereoscopia de radar, Oliveira (2005) verificou ser possível a utilização de dados do RADARSAT-1 para a extração de MDEs que atendam o PEC altimétrico classe B até a escala 1:100.000. A acurácia do MDE radargramétrico está diretamente ligada à declividade do terreno. Para pares estereoscópicos do RADARSAT-1, os erros podem variar entre 20m e 30m em áreas de relevo mais suave até 40m em áreas montanhosas (Toutin, 2002).

3.4 SRTM

SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) é a denominação de uma missão especial liderada pela NASA e NIMA, em parceria com as agências espaciais da Alemanha e da Itália, realizada entre 11 e 22 de fevereiro de 2000, com o objetivo de mapear a superfície da Terra, em três dimensões.

A missão usou um Radar de Abertura Sintética (SAR) a bordo do Ônibus Espacial Endeavour. Foram adquiridos dados em 3D de 80% (entre os paralelos 60° N e 56° S) da superfície terrestre, nas bandas C e X, fazendo uso da técnica de interferometria para obtenção da elevação. A interferometria de radar é um método alternativo ao método estereoscópico tradicional de extração de informações altimétricas, baseado na medição da diferença de fase entre duas imagens radar sobre o mesmo local na Terra.

O ônibus espacial contava com duas antenas de recepção, separadas por um mastro de 60m, o que possibilitou a aquisição de dados em uma mesma órbita. Os dados foram disponibilizados com uma resolução de 3" (SRTM3-90 m) e 1" (SRTM1-30m), processados e distribuídos gratuitamente pela Internet. Para a América do Sul estão disponíveis apenas o modelo SRTM3. A expectativa inicial de precisão era de 16 m de acurácia para a altimetria e 20m para a planimetria.

A primeira versão distribuída apresentou problemas de áreas sem valores de altitude próximo do mar e inexistência de alguns pixels em certas regiões, como por exemplo: o morro do Pão de Açúcar, no Rio de Janeiro. Na versão 2 os MDEs do SRTM foram editados e estes problemas foram minimizados.

Barros e Cruz (2007a) avaliaram o SRTM para uma área do Vale do Paraíba e concluíram que o modelo atende o PEC altimétrico classe A na escala 1:100.000 e menores. A mesma conclusão foi constatada por Santos et al. (2005) com dados da região amazônica.

3.5 Sensores Orbitais Óticos

Entre os sensores remotos orbitais óticos de média e alta resolução espacial que possuem capacidade de gerar MDEs por meio de estereoscopia, destacam-se: ASTER, SPOT-5/HRS, IKONOS-2 e QuickBird (Holland et al., 2006).

O sensor CCD, a bordo do satélite CBERS-2 também é capaz de gerar imagens estereoscópicas a fim de produzir MDEs. Melgaço et al. (2005) encontraram dificuldades em se extrair um MDE com imagens CCD/CBERS em função de erros de deslocamento das imagens. Zanardi et al. (2007) conseguiram extrair e efetuar a avaliação do modelo, encontrando compatibilidade altimétrica apenas para mapeamentos com escala inferior a 1:250.000.

Barros e Cruz (2007b) avaliaram o MDE obtido pela estereoscopia do sensor Aster com 15m de resolução espacial e concluíram que é compatível apenas até o PEC altimétrico classe A da escala 1:100.000. Saldanha e Filho (2007) afirmam que com o mesmo sensor, é possível conseguir resultados a fim de atender o PEC classe C de cartas 1:50.000.

Toutin et al. (2001) avaliaram o MDE extraído por um par de imagens do satélite Ikonos e encontraram erros entre 1 m e 4 m, dependendo do tipo de cobertura do terreno. Luiz et al. (2007) também testaram o produto gerado pelo mesmo sensor e conseguiram erros menores, a fim de satisfazer o PEC brasileiro altimétrico classe A para o mapeamento 1:10.000.

Toutin (2004) comparou os MDE produzidos pelas imagens dos satélites SPOT, Ikonos e QuickBird. Em áreas de solo exposto os erros obtidos para os três sensores respectivamente chegaram a 2,2m, 1,5m, e 1,2m.

4 O projeto Piloto

Com o intuito de dar início às atividades de geração de MDE ao redor dos aeroportos nacionais, o ICA utilizará uma área teste, com o intuito de adquirir experiência em uma atividade até então nunca sistematicamente realizada pelo Instituto. Na área teste será executado um projeto piloto a fim de avaliar as diferentes fontes de dados existentes, testar os softwares disponíveis no ICA e propor metodologias de trabalho a fim de alcançar os resultados exigidos pela OACI.

4.1 Área de levantamento

O MDE exigido pela OACI possui dois parâmetros interdependentes fundamentais: a área de abrangência e a resolução espacial do modelo, além das exigências de metadados e de qualidade da informação, segundo a série ISO (International for Standardization Organization) 19000 de padrões para informações geográficas.

De acordo com o Anexo 15 e o Doc 9881 da OACI, a partir do ponto de referência do aeródromo (ARP), a área que se estende num raio de 45 km ou o limite da área terminal (TMA), o que for menor, é chamada de Área 2. A Área 2 pode ser subdividida em outras duas. A primeira será neste trabalho denominada de Área 2-10 e é composta pela área interna a um raio de 10 km do ponto de referência do aeródromo. A segunda encontra-se entre o raio de 10 km e o raio de 45 km do ARP ou o limite da TMA, o que for menor. Neste trabalho, a referência a esta segunda sub-área será Área 2-45.

A OACI ainda prevê a geração de MDE com maior detalhamento para áreas menores ao redor dos aeroportos limitadas a 90 m da lateral da pista ou ainda 900 m após as cabeceiras, chamadas de Área 3 e Área 4. Todavia, tais áreas estão fora do escopo do trabalho por serem necessárias em poucos aeroportos do país. Por fim, a região mais abrangente na divisão espacial para a geração de MDE é a Área 1 que envolve todo o território nacional nas áreas não abrangidas pela Área 2.

As resoluções requeridas para o MDE variam de acordo com a área. Para a Área 1, o MDE deve possuir uma resolução de 90m. Na Área 2-45 a resolução também deve ser de 90 m, porém, apenas onde o terreno apresentar altitudes inferiores a 120m. Em toda a extensão da Área 2-10 e nas altitudes superiores a 120 m da Área 2-45 a resolução do MDE deve ser de 30m. A figura 2 resume a divisão das Áreas 1 e 2 e a subdivisão da Área 2, bem como a resolução espacial de cada área.

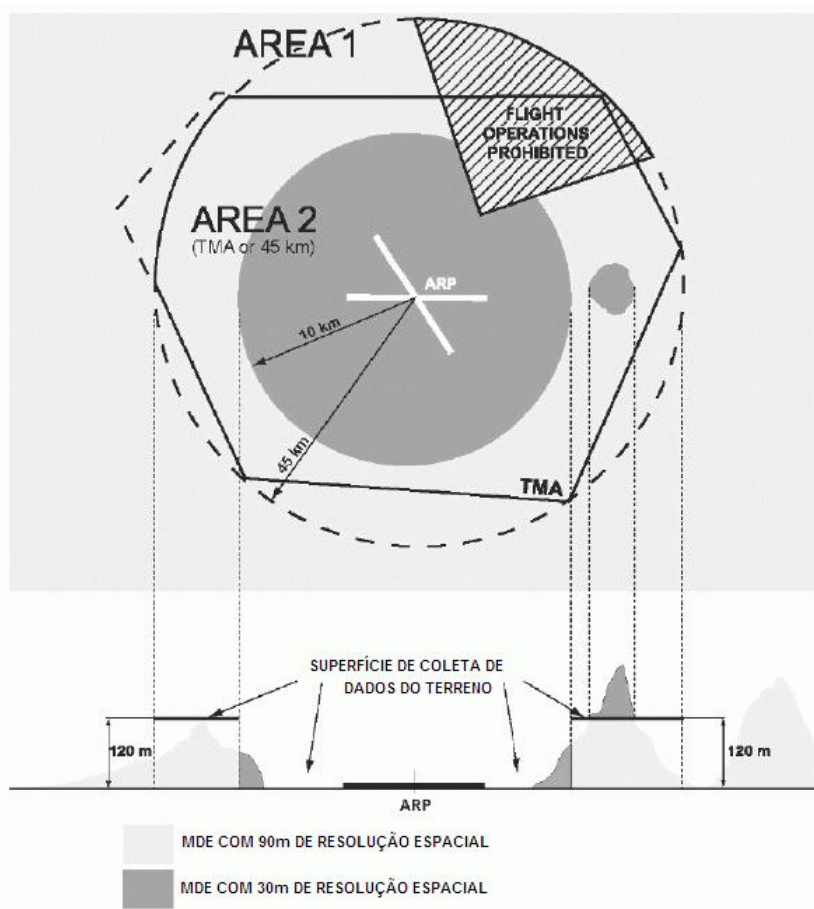


Figura 2 : Áreas 1 e 2
FONTE: Adaptado de OACI (2004)

O local escolhido para a realização do projeto piloto é o aeroporto de Jacarepaguá, no Rio de Janeiro. Tal área foi escolhida pela proximidade espacial com o ICA e pela facilidade de acesso para os trabalhos de campo. Trata-se de uma região próxima ao mar, plana nas proximidades do aeroporto e com cadeias montanhosas ao redor.

4.2 Dados Existentes

Atualmente os dados disponíveis para a execução do MDE de Jacarepaguá são:

- MDE do SRTM com 90m de resolução;
- Cartas topográficas da DSG na escala 1:50.000: Vila Militar, Baía de Guanabara e Cava;
- Mapeamento cadastral do IPP, da prefeitura do Rio de Janeiro da escala 1:10.000;
- Cartas topográficas do PROCAPV, na escala 1:10.000 e 1:2.000;
- Fotografias aéreas digitalizadas na escala 1:15.000 de 2003.

O mapeamento 1:10.000 encontra-se disponível para toda a Área 2-10. As cartas topográficas 1:50.000 abrangem toda a Área 2-10, porém não a totalidade da Área 2-45. Os dados SRTM cobrem boa parte da Área 2, porém algumas regiões não apresentam dados disponíveis, principalmente em áreas com declividade mais acentuada.

Dados SRTM, nas regiões onde o modelo não apresenta falhas (“buracos”) satisfazem os requisitos de MDE exigidos para a Área 1, podendo também ser utilizados para separar as áreas de altitudes superiores a 120 m. A partir de tal separação é possível o conhecimento das zonas na Área 2-45 que devem possuir resolução de 30 m.

A Figura 3 apresenta os dados SRTM com resolução de 90m. As áreas verdes são as mais baixas e as vermelhas as mais altas. O ponto central em cruz representa o aeroporto de Jacarepaguá. O círculo vermelho menor representa o raio de 10 km do ARP e o círculo maior, o raio de 45 km. As zonas brancas são áreas onde o processamento interferométrico do radar da missão SRTM falhou e, portanto não se dispõe de dados.

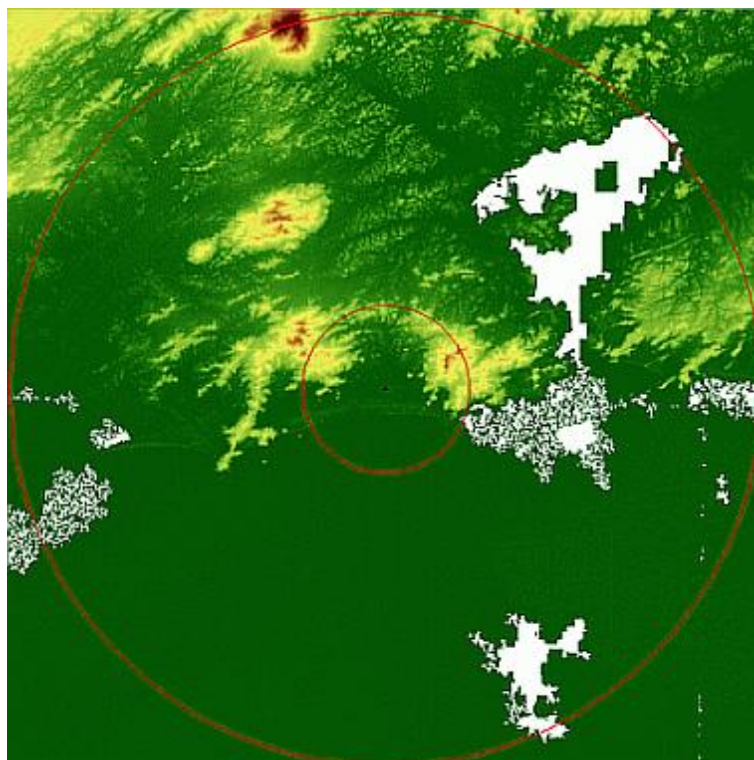


Figura 3 : Dados SRTM nas Áreas 1 e 2.

No caso de Jacarepaguá, os dados SRTM não puderam ser totalmente aproveitados, devido às falhas apresentadas na figura 3. Sendo assim, a melhor fonte de dados altimétricos para o total recobrimento da Área 2 constitui-se das cartas topográficas na escala 1:50.000.

Apesar das regiões com falta de dados do SRTM, foi possível efetuar uma análise preliminar a fim de se ter uma idéia das áreas onde o MDE deve ter resolução de 30m. Utilizando o software Spring, as altitudes do SRTM foram divididas entre aquelas abaixo de 100m e as acima de 100m. O valor de 100m foi utilizado como limiar, tendo em vista que o erro altimétrico do dado, informado pela NASA, é da ordem 16m. A figura 4 mostra as áreas abaixo de 100m em verde e as acima de 100m em vermelho. O círculo preto menor representa o raio de 45km e o maior, o raio de 10km do ARP de Jacarepaguá.

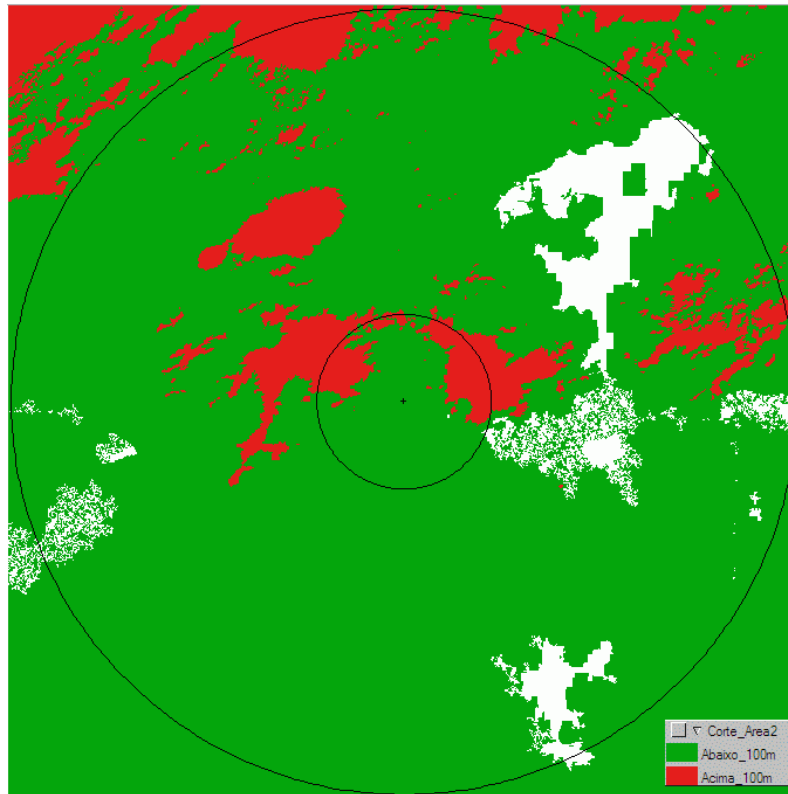


Figura 4 : Limiarização dos dados SRTM com altitudes acima de 100m e abaixo de 100m.

4.3 Trabalhos em desenvolvimento

De posse do mapeamento altimétrico da área na escala 1:10.000 foi possível gerar um MDE com resolução de 30 m para toda a Área 2-10. A partir das curvas de nível e dos pontos cotados, gerou-se um TIN no módulo ArcScene do ArcGIS 8.3. Em seguida, a rede irregular de triângulos foi interpolada para o formato de grade regular. A figura 5 apresenta uma visualização 3D do modelo gerado.

Todo o processo envolveu oito cartas na escala 1:10.000 e não foi efetuada qualquer edição nas curvas de nível ou no modelo gerado, uma vez que ainda se trata de um experimento inicial.

As fotografias aéreas disponíveis cobrem apenas as áreas mais próximas do aeroporto (cerca de 3 km), e serão utilizadas pelo ICA para testar a extração de MDE, por fotogrametria no recém adquirido software ERDAS/LPS. Para isso, pontos de apoio serão selecionados e levantados em campo, de modo a possibilitar a geração de um TIN e posterior interpolação para obtenção da superfície.

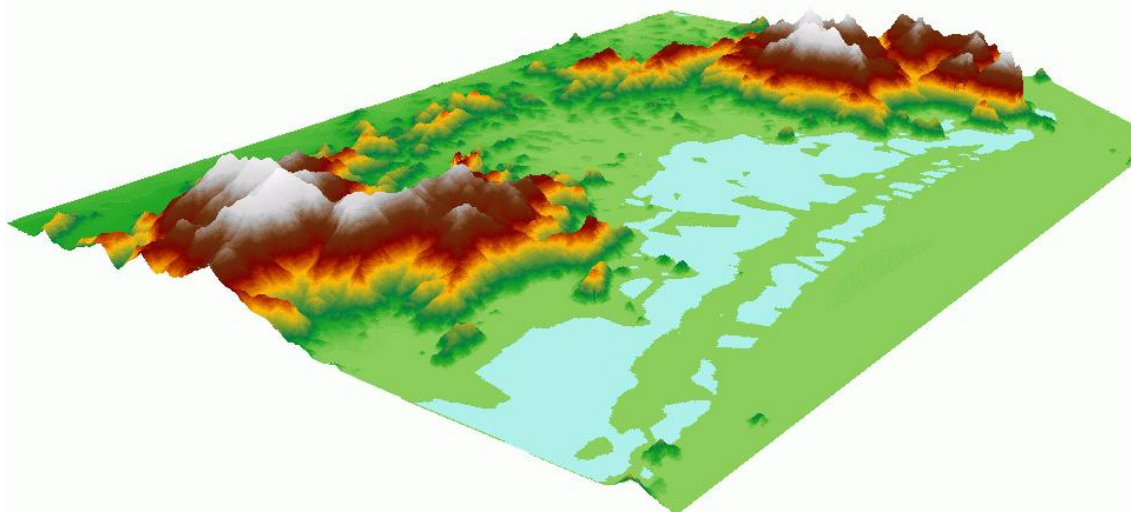


Figura 5 : Visualização 3D do MDE de Jacarepaguá com 30m de resolução gerado a partir de mapeamento na escala 1:10.000.

5 Resultados a alcançar

O desenvolvimento do projeto piloto permitirá que inúmeros requisitos sejam analisados, de modo a permitir o planejamento final para a execução do modelo digital de elevação dos 137 aeroportos brasileiros que operam atualmente com voo por instrumento (IFR).

Ao longo deste planejamento serão discutidas as técnicas de aquisição de dados, visando à otimização de recursos. Além disto, será dimensionada a equipe técnica e elaborado o cronograma para execução das tarefas, de modo a garantir as precisões estabelecidas nos prazos solicitados pela OACI.

A implementação deste novo produto ao conjunto de navegação possibilitará a criação de uma infraestrutura de dados espaciais que poderá ser facilmente atualizada e utilizada para aplicações a bordo das aeronaves, tais como: prevenção de CFIT (Controlled Flight Into Terrain) com TAWS (Terrain Awareness Warning System); aplicações em solo, como por exemplo: CFIT, MSAW (Minimum Safe Altitude Warning); e projeto de procedimentos e simulação de voo. Todas as aplicações requerem um dado confiável, obtido a partir de especificações conhecidas, que propiciem ao usuário plena confiança no sistema.

6 Referências Bibliográficas

Araújo,W.T.; Santos,R.L.; Lage,C.S. *A Modelagem Digital de Elevação como Instrumento de Análise da Ocupação do Sítio Urbano*. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21., 2003, Belo-Horizonte, Anais (CD-ROM), SBC, 2003.

Barros,R.S.; Cruz,C.B.M. *Avaliação da altimetria do modelo digital de Elevação do SRTM*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007a, Florianópolis, Anais (CD-ROM), INPE, 2007a, p.1243-1250.

Barros,R.S.; Cruz,C.B.M. *Avaliação da Altimetria do Modelo Digital de Elevação Gerado a Partir de Imagens ASTER*. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 23., 2007b, Rio de Janeiro, **Anais...** (CD-ROM): SBC, 2007b, p.1180-1186.

Burrough,P.A. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford University Press, Clarendon, 1986.

Câmara,G.; Souza,R.C.M.; Freitas,U.M.; Garrido,J. *SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling*, Computers & Graphics, v.20, n.3, 1996, p.395-403.

Coelho,A.H.; Vargas,R.M.A. *Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados laser scanning aerotransportado em área de floresta usando o software livre GRASS.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis, Anais (CD-ROM), INPE, 2007, p.3653-3660.

Coelho,L.; Brito,J.N. *Fotogrametria digital.* Ed :EDUERJ, Rio de Janeiro, 2007.

Costa,T.C.C.; Ramos,D.P.; Pereira,N.R.; Bueno, M.C.D.; Baca,J.M.; Fidalgo,E.C.C.; Meirelles,M.S.P.; Oliveira,R.P.; Accioly,L.J.O. *Suporte a decisão para qualidade de terras para a agricultura familiar.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, Anais (CD-ROM), INPE, 2005, p.73-82.

Doyle, F.J. *Digital terrain models: an overview. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.44, n.12, 1978, p.1481- 1485.

Filho,V.M.A. *Os novos desafios da Cartografia com relação ao apoio à navegação aérea.* In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005, Rio de Janeiro, Anais (CD-ROM), SBC, 2005.

Filho,V.M.A. *Carta Eletrônica Aeronáutica - Uma meta a ser atingida.* In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21., 2003, Belo-Horizonte, Anais (CD-ROM), SBC, 2003.

Felgueiras, C. A. *Modelagem Numérica de Terreno.* In: Câmara, G.; Davis,C.; Monteiro, A. M.; D'Alge, J. C. [Introdução à Ciência da Geoinformação](#). São José dos Campos, INPE, 2001. 2.v. c.7. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 13 abr. 2008.

Fonseca,B.M.; Carvalho,G.A.; Moura,A.C.M. *O Uso dos Modelos Digitais de Elevação no Mapeamento, Análise e Ensino da Geomorfologia.* In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 23., 2007, Rio de Janeiro, Anais (CD-ROM), SBC, 2007, p.2095-2099.

Hemerly,E.V.; Lourenço,F.R.; Lício,I. *Metodologia de controle de qualidade: Validação e calibração de dados de Radar Interferométrico de Abertura Sintética aerotransportado: estudo de caso, Cia Mineração Rio Norte.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis, Anais (CD-ROM), INPE, 2007, p.4897-4905.

Holland, D. A.; Boyd, D. S.; Marshall, P. *Updating topographic mapping in Great Britain using imagery from high-resolution satellite sensors.* ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v.60, n.3, 2006, p.212-223.

OACI, *Guidelines for Electronic Terrain, Obstacle and Aerodrome Mapping Information*, Documento 9881

Joly, F. *A Cartografia*, Trad. Tânia Pellegrini, Ed. Papirus, Campinas 1990.

Liporaci, S. R.; Moreira, J. R.; Luebeck, D. *Metodologia de baixo custo para cadastro técnico multifinalitário em municípios utilizando-se de produtos obtidos por Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR) e imagens do satélite Ikonos.* In: Congresso Brasileiro de Cadastro Multifinalitário, 6., 2004, Florianópolis, Anais (CD-ROM), UFSC, 2004.

Luiz, S.; Santos, A. R. S.; Brenner, T. L. *Geração de Modelo Digital de Elevação a partir de Imagens Reference Stereo do Satélite IKONOS.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis, Anais (CD-ROM), INPE, 2007, p.581-587.

Marinelli, L.; Laureore,L. *Relief Restitution by Radargrammetry.* In: ERS Applications Workshop, 2.,1995, London. Proceedings, London, ESA, 1996, p.277-281.

Martins, M. A. R.; Felix, D.; Kersting, A. P. B. *Análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para dados provenientes do sistema laser - ALTM 2050.* In: Congresso Brasileiro de Cadastro Multifinalitário, 6., 2004, Florianópolis, Anais (CD-ROM), UFSC, 2004.

Melgaço, L. M.; Filho, C. R. S.; Steinmayer, M. *Comparação entre modelos digitais de elevação gerados por sensores ópticos e por radar.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, Anais (CD-ROM), INPE, 2005, p.1215-1220.

Mosquera-Machado, S.; Ahmad, S. *Flood hazard assessment of Atrato River in Colômbia*. Water Resources Management, v.21, n.3, 2007, p.591-609.

Oliveira, C.G. *Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (Aster) e Radar (RADARSAT-1, SRTM): Um estudo para a região da Serra dos Carajás (PA)*. 2005. 184 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P.; Planchon, O. *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models*. Hydrological Processes, v.5, n.1, 1991, p.59-79.

Saldanha, M. F. S.; Filho, C. A. P. C. *Avaliação de MDE de imagens ASTER na Geração de Bases Cartográficas. Avaliação de MDE de imagens ASTER na Geração de Bases Cartográficas*. In: Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), 23., 2007, Rio de Janeiro, Anais (CD-ROM), SBC, 2007, p.1134-1141.

Santos, P. R. A.; Gaboardi, C.; Oliveira, L. C. *Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. Anais (CD-ROM), INPE, 2005, p.4473-4480.

Tarboton, D. G. *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water Resources Research, v.33, n.2, 1997, p.309-319.

Toutin, T. *Comparison of stereo-extracted DTM from different High Resolution Sensors: SPOT-5, EROS-A, Ikonos-II, and QuickBird*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v.42, n.10, 2004, p.2121-2129.

Toutin, T.; Chénier, R.; Carbonneau, Y. *3D geometric modelling of IKONOS GEO images*. In: Joint ISPRS Workshop “High Resolution Mapping from Space”, 2001, Hannover, Proceedings, Hannover, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001.

Toutin, T.; Gray, L. *State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v.55, n.1, p.13-33, Feb. 2000.

Zanardi, R. P.; Rolim, S. B. A.; Souza, S. F. *Controle de qualidade de MDT gerado a partir de par estereoscópico do satélite CBERS-2*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, Anais (CD-ROM), INPE, 2005. p.1211-1218.