

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEPSRM  
Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto  
**MESTRADO**

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE  
ALTA RESOLUÇÃO PARA GERENCIAMENTO  
DE ZONAS DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMOS

Autor: Jefferson Luís Ferreira Martins – Engenheiro Cartógrafo  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dejanira Luderitz Saldanha  
Orientador: Prof. Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha

Porto Alegre, RS  
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEPSRM  
Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto  
**MESTRADO**

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA  
GERENCIAMENTO DE ZONAS DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMOS**

Autor: Jefferson Luís Ferreira Martins – Engenheiro Cartógrafo  
Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Dejanira Luderitz Saldanha  
Orientador: Prof. Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Claudia Robbi Sluter (UFPR)

---

Prof. Dr Sergio Florêncio de Souza (IGEO/UFRGS)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andréa Lopes Iescheck (IGEO/ UFRGS)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Sensoriamento Remoto da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
para obtenção do título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto.

Porto Alegre – RS  
JULHO de 2010

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente àquele que colocou tantas pessoas iluminadas em meu caminho. Sem Deus e sem minha fé nele, sei que nada seria possível. Se fosse citar aqui todas as pessoas a quem devo agradecer, certamente o espaço destinado aos agradecimentos nesse trabalho, seria insuficiente. Sendo assim, menciono algumas pessoas às quais não posso deixar de citar: Aos meus pais, Iara e Luís, pela torcida, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e pelo exemplo de caráter, de luta e perseverança. À minha querida irmã Susian, pelo carinho e pela torcida de sempre. À minha esposa Alessandra, pelo amor, pelo ombro amigo, pelo apoio, paciência, compreensão e companheirismo, tendo inclusive me ajudado em atividades de campo. Aos meus amigos, familiares e colegas de trabalho, que acompanharam, torceram, acreditaram e alguns, inclusive, ajudaram em atividades de campo, como os amigos e colegas Lênin Venícius Landa e Jair Paulo Schaparini. Aos Gestores da INFRAERO que me apoiaram por acreditarem no potencial de contribuição deste trabalho para as atividades aeroportuárias, em especial a Will Wilson Furtado e Paulo Tsai Wang. Ao citar Gestores e colegas de trabalho, não posso deixar de fazer aqui uma menção especial ao grande mestre e amigo Vilmar Dias da Silva, Gerente Regional de Navegação Aérea da INFRAERO, que foi um dos maiores incentivadores de meu ingresso no Mestrado e que ensinou-me tudo o que hoje eu sei sobre Zona de Proteção de Aeródromo. Sem esses conhecimentos, não seria possível empreender o trabalho aqui apresentado. Por fim, agradeço aos meus orientadores, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Dejanira Luderitz Saldanha e Prof. Dr. Ronaldo dos Santos da Rocha, e a todos os professores e colegas do CEP SRM que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque assim ele se tornará uma máquina utilizável, mas não uma personalidade. É necessário que um homem adquira sentimento, senso prático daquilo que vale a pena ser compreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto. Deve aprender e compreender as motivações dos homens, seus desejos e suas angústias para determinar seu lugar em relação aos seus próximos e à comunidade a que pertence.”*  
Albert Einstein

## RESUMO

Nos últimos anos, o crescimento desordenado das grandes cidades gerou diversos problemas na infra-estrutura urbana que atingiram também as proximidades dos aeroportos, surgindo obstáculos que afetam a segurança das aeronaves, dos passageiros e da população que vive nesses locais. Além da segurança aeroportuária, a intensa circulação humana junto à Zona de Proteção dos Aeroportos, afeta o desenvolvimento sócio-econômico adequado da região. Visando padronizar as operações aéreas no mundo de forma a torná-las mais seguras, a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) publicou diversos documentos normativos que regulamentam as atividades aeronáuticas, havendo, no entanto, uma grande dificuldade na aplicação das normas de zona de proteção de aeródromos. Devido à precisão necessária as medidas e os levantamentos de obstáculos são realizados com métodos topográficos clássicos, o que demanda um custo alto devendo-se buscar novas alternativas que permitam realizar as medições com a precisão necessária, porém em um tempo menor e maior eficiência. O Sensoriamento Remoto desenvolveu-se de sobremaneira nos últimos anos, passando a contar com sensores capazes de produzir imagens com pixel de tamanho igual ou inferior a 1m. Atualmente, a utilização de imagens de alta resolução apresenta-se como uma moderna alternativa para a solução do problema de gerenciamento de obstáculos, visando o monitoramento contínuo do aumento de implantações irregulares no entorno dos aeroportos. Neste sentido, duas imagens IKONOS II, datadas de 2001 e 2008 foram utilizadas para o levantamento da ocupação do entorno do Aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, com objetivo de propor uma metodologia de fácil compreensão que possibilite o rápido entendimento dos planos de zona de proteção de aeródromo a sua relação com as áreas urbanas do entorno dos aeródromos, a localização e identificação de obstáculos e diversos outros alvos que se localizem nas referidas áreas, por meio da utilização de imagens de alta resolução espacial.

Este estudo revelou que o uso de imagens de alta resolução apresenta-se como uma técnica eficiente para as análises de obstáculos, haja vista que um erro estimado de 2,66 m nas coordenadas da imagem ortorretificada é tolerável na maior parte dos parâmetros estabelecidos pelas superfícies limitadoras de obstáculos.

## ABSTRACT

In recent years, large cities have experienced disordered growth, resulting in many problems of infrastructure that reached the airports neighborhoods, causing many obstacles that affect the safety of aircrafts, passengers and people living near the airports. An other result is the airport's restriction, in such a way to affect the socio-economic development of the region attended by it. In intention of standardize, the aviation operations in the world to make them more safeties, the International Civil Aviation Organization (ICAO) published many documents to normalize and regulates the aviation activities, but there is a great difficulty to obey the rules of obstacles control. Because the necessary precision, the measures and obstacles surveying are made with conventional topography methods, which demand a very high cost, that makes necessary to look for new alternatives for performing measurements with the necessary precision, but in a shorter time and greater efficiency. In the last years, the remote sensing developed in a greater way, such to have sensors capable of producing images with a pixel size equal to or less than 1 m. Nowadays, the use of high-resolution images is presented as a modern alternative to solve the problem of obstacles managing to continuously monitoring the increase in irregular deployments around the airports. In this sense, two IKONOS II images, dated 2001 and 2008 were used to survey the occupation of the area surrounding the Salgado Filho airport in Porto Alegre, Rio Grande do Sul with the objective of propose a methodology of easy comprehension that makes possible to understand quickly the aerodrome obstacles limiting surfaces and its relation to the urban areas that surround the aerodromes, the localization and identification of obstacles and many other implantations that are situated in these areas, by using the high resolution images. This study showed that using high-resolution images is presented as an efficient technique for the analysis of obstacles, given that an estimated error of 2.66 m in the coordinates of the orthorectified image is tolerable in most of the parameters set by the surfaces that limits the obstacles implantation.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1. OBJETIVO.....	13
1.1.1. Objetivos Específicos.....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1. CONVENÇÃO DE CHICAGO .....	16
2.2. ANEXO 14 – ORGANIZAÇÃO DE AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL.....	16
2.3. PORTARIA 1.141/GM5 .....	18
2.4. ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO .....	19
2.5. PLANO BÁSICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO .....	19
2.5.1. Comprimento básico de pista .....	19
2.5.2. Tipo de Operação .....	20
2.5.3. Faixa de Pista.....	21
2.5.4. Rampas .....	22
2.5.5. Área de Aproximação.....	22
2.5.6. Área de Transição .....	24
2.5.7. Área Horizontal Interna.....	25
2.5.8. Área Cônica .....	27
2.5.9. Área Horizontal Externa.....	27
2.6. PLANO ESPECÍFICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO .....	27
2.7. PORTARIA 68/DGCEA/2005 – PLANO ESPECÍFICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DOS AERÓDROMOS DE PORTO ALEGRE E CANOAS .....	29
2.8. SUPERFÍCIE DO SEGMENTO VISUAL – VSS .....	30
2.9. SATÉLITES .....	31
2.10. RESOLUÇÃO .....	32
2.10.1. Resolução Espacial.....	32
2.10.2. Resolução Espectral .....	34
2.10.3. Resolução Radiométrica: .....	35
2.10.4. Resolução Temporal.....	36
2.11. PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	37
2.11.1. Equalização de Histogramas.....	37
2.12. DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS .....	39
2.12.1. Rotação da terra durante a aquisição da imagem:.....	39
2.13. CORREÇÕES GEOMÉTRICAS .....	44
2.13.1. Modelos de correção de erros sistemáticos .....	44
2.13.2. Correção Baseada em Pontos de Controle.....	45
2.13.3. Utilização de Equações Polinomiais Associadas aos Pontos de Controle ....	46
2.13.6. Redistribuição .....	49
2.13.7. Interpoladores .....	49
2.13.8. Ortoretificação .....	50
2.13.9. Definição do número de pontos de controle necessários .....	51
2.14. MODELOS DIGITAIS DO TERRENO .....	52
2.14.1. SRTM.....	52
2.15. EXATIDÃO, ACURÁCIA E PRECISÃO.....	53
2.16. SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA .....	54

2.17. GPS .....	56
2.18. SIG – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS .....	63
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>66</b>
<b>4. MATERIAIS E METODOS.....</b>	<b>69</b>
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS .....	69
4.2. METODOLOGIA.....	70
4.2.1. Definição da área da imagem: .....	71
4.2.2. Especificação Técnica e Aquisição da Imagem:.....	73
4.2.3. Composição Colorida.....	77
4.2.4. Apoio de Campo .....	78
4.2.5. Correções Geométricas .....	83
4.3. ANÁLISE DA QUALIDADE GEOMÉTRICA: .....	85
4.4. INSERÇÃO DE INFORMAÇÕES TEMÁTICAS E GERAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS .....	86
4.4.1. Carta Imagem do Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo do Aeroporto Internacional Salgado Filho:.....	86
4.4.2. Mapa de Conflitos Obstáculos X Ampliação da Pista .....	88
4.4.3. Sistema de Informações Geográficas do Aeroporto Internacional Salgado Filho (SIG-SBPA) .....	90
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>100</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>

## Lista de Tabelas

TABELA 01 – CÓDIGO DA PISTA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO BÁSICO DE PISTA .....	20
TABELA 02 - PARÂMETROS PARA DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DA FAIXA DE PISTA .....	21
TABELA 03 – CONFIGURAÇÃO DA ÁREA DE APROXIMAÇÃO .....	24
TABELA 04 – ÁREA DE TRANSIÇÃO .....	25
TABELA 05 – ÁREA HORIZONTAL INTERNA .....	26
TABELA 06 – CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES .....	33
TABELA 07 - BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM – LANDSAT 5.....	35
TABELA 08 - FONTES DE ERROS ENVOLVIDOS NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS .....	58
TABELA 09 – NÚMERO DE PONTOS DE APOIO – ROCHA 2002 .....	80
TABELA 10 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO EM CAMPO .....	83
TABELA 11 – ESTIMATIVA DE ERROS NAS COORDENADAS DA IMAGEM ....	85
TABELA 12 – LIMITES DE ALTITUDES E RAMPAS.....	96

## Lista de Figuras

FIGURA 01 – SUPERFÍCIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS –.....	17
FIGURA 02 – FAIXA DE PISTA - .....	21
FIGURA 03 – REPRESENTAÇÃO DE RAMPAS - .....	22
FIGURA 04 – ÁREA DE APROXIMAÇÃO - .....	23
FIGURA 05 – ÁREA DE TRANSIÇÃO - .....	24
FIGURA 06 – REPRESENTAÇÃO DA ÁREA HORIZONTAL INTERNA - .....	26
FIGURA 07 – ÁREA HORIZONTAL EXTERNA - .....	27
FIGURA 08 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VSS - .....	31
FIGURA 09 – ÓRBITAS SATELITAIS - .....	32
FIGURA 10 – MENOR ELEMENTO DA IMAGEM - .....	33
FIGURA 11 – ONDA ELETROMAGNÉTICA -.....	34
FIGURA 12 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO - .....	34
FIGURA 13 – DIFERENÇA NO DETALHAMENTO ENTRE IMAGENS COM 2 E 4 NÍVEIS DE CINZA –.....	36
FIGURA 14 – IMAGEM DO SATÉLITE GOES - .....	37
FIGURA 15 – EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMA – .....	38
FIGURA 16 – EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMA – .....	38
FIGURA 17 - EFEITO DE ROTAÇÃO DA TERRA SOBRE A IMAGEM – .....	40
FIGURA 18 – DISTORÇÃO PANORÂMICA .....	40
FIGURA 19 – EFEITO DA VARIAÇÃO DE ALTITUDE DA PLATAFORMA NA IMAGEM –.....	42
FIGURA 20 – EFEITO DA VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DA PLATAFORMA NA IMAGEM – .....	42
FIGURA 21 – EFEITOS DA MUDANÇA DE ATITUDE DA PLATAFORMA –.....	42
FIGURA 22 – PROCESSO CORREÇÃO GEOMÉTRICA BASEADA EM PONTOS DE CONTROLE -.....	46
FIGURA 23 – SRTM – .....	53
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DE ACURÁCIA E PRECISÃO - .....	54
FIGURA 25 – GEOIDE – .....	55

FIGURA 26 – SUPERFÍCIE DA TERRA, GEÓIDE E ELIPSÓIDE - .....	55
FIGURA 27 – DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES RBMC NO BRASIL - .....	63
FIGURA 28 – ILUSTRAÇÃO DOS ACESSOS RODOVIÁRIOS AO AEROPORTO INTERNACIONAL SALGADO FILHO – .....	66
FIGURA 29 – AEROPORTO SALGADO FILHO - DÉCADA DE 50 - .....	67
FIGURA 30 – AEROPORTO SALGADO FILHO - ANO DE 2009 - .....	67
FIGURA 31 – SEQUENCIA DE PROCESSOS – .....	70
FIGURA 32 – ÁREA SELECIONADA - .....	72
FIGURA 33 - RSI – ENVI – COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB – .....	77
FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO DE CAMPO NA IMAGEM - .....	81
FIGURA 35 - PONTO DE CHEQUE DO VOR - .....	82
FIGURA 36 – INS1 – AP110 – .....	82
FIGURA 37 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO UTILIZADO – SRTM – .....	84
FIGURA 38 – CARTA IMAGEM DO PLANO ESPECÍFICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE ZONA DE PROTEÇÃO DO AEROPORTO DE PORTO ALEGRE – .....	88
FIGURA 39 – MAPA DE CONFLITOS OBSTÁCULOS X AMPLIAÇÃO DA PISTA - .....	89
FIGURA 40 – COMPOSIÇÃO DO SIG - .....	91
FIGURA 41 – TABELA DE ATRIBUTOS - .....	92
FIGURA 42 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – DETALHAMENTO DA ÁREA ABRANGIDA PELA IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO - .....	93
FIGURA 43 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – DA ÁREA ABRANGIDA PELO RAIOS DE 20 KM DO AEROPORTO - .....	94
FIGURA 44 - IMAGEM DO ANO DE 2001 - .....	97
FIGURA 45 - IMAGEM DO ANO DE 2008 - .....	98
FIGURA 46 – ABRANGÊNCIA DAS CURVAS DE RUÍDO - .....	99

## **Lista de Anexos**

COORDENADAS DOS MARCOS ESTABELECIDOS PELO ICA NO AEROPORTO INTERNACIONAL SALGADO FILHO - .....	106
---	-----

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países signatários da Convenção de Chicago, que instituiu a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI). Visando padronizar as operações aéreas no mundo, de forma a torná-las mais seguras, a referida Organização publicou diversos documentos normativos, dos quais o ANEXO 14 regula as atividades aeroportuárias. Além do citado ANEXO, em 1987 o Brasil, através do Departamento de Aviação Civil (atualmente Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC), publicou a Portaria 1.141/GM5, que trata especificamente do assunto Zona de Proteção de Aeródromo.

Grande parte dos aeroportos brasileiros foi instalada há décadas em áreas isoladas, sem qualquer problema de interferência por obstáculos. Nos últimos anos, as grandes cidades vivenciaram crescimentos rápidos e desordenados, gerando diversos problemas de infra-estrutura às mesmas. Esses problemas atingiram as proximidades dos aeroportos, fazendo com que surgissem diversos obstáculos que afetam a segurança das aeronaves, dos passageiros e da população que vive nos arredores dos Aeroportos. Além da questão da segurança, as implantações erigidas em desacordo com a legislação nacional e internacional que estabelece os critérios para ocupação no entorno de aeroportos fazem com que os mesmos sejam cada vez mais limitados e restritos, inclusive com possibilidade de redução do tamanho da pista, o que dificulta operação de aeronaves de grande porte com transporte de carga, afetando significativamente o desenvolvimento sócio-econômico das regiões atendidas pelos aeroportos.

O Sensoriamento Remoto vem se desenvolvendo nos últimos anos, passando a contar atualmente com sensores capazes de produzir imagens com pixel de tamanho inferior a 1metro. Essas imagens quando devidamente processadas, analisadas e interpretadas definem dados temáticos que correspondem às superfícies dos obstáculos e aos padrões de uso e ocupação do solo tornando-se modernas e eficientes ferramentas de apoio ao controle de implantações no entorno dos aeroportos.

## 1.1. OBJETIVO

O presente trabalho de dissertação tem como objetivo geral propor uma metodologia, de fácil compreensão e aplicação, que possibilite a localização e a identificação de obstáculos e diversos outros alvos que se localizem nas áreas do entorno de aeroportos por meio da utilização de imagens de alta resolução espacial.

### 1.1.1. Objetivos Específicos

Apresentar as técnicas de processamento e correções geométricas de imagens de alta resolução, associadas às superfícies limitadoras de implantações no entorno de aeroportos como ferramenta de utilidade social. Essa ação objetiva propiciar maior segurança no entorno dos aeroportos e no seu desenvolvimento sócio-econômico.

Apresentar as diversas limitações e critérios impostos por um Plano de Zona de Proteção de Aeródromo através de uma Carta Imagem. Em função de sua portabilidade e simplicidade, a leitura deste documento se faz de forma mais prática e rápida, facilitando a divulgação de informações.

Associar diversas informações temáticas de um aeroporto à imagem de alta resolução, visando à elaboração de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Este sistema, além de ser uma ferramenta de apoio à decisão de gestão de atividades aeroportuárias, permite a análise detalhada dos limites de implantações no entorno dos aeroportos.

Apresentar a seqüência de ações e técnicas necessárias para a correta utilização de imagens de alta resolução para o gerenciamento de zona de proteção de aeródromos. Esta seqüência de ações visa facilitar a elaboração de especificações técnicas e gerar resultados de maior qualidade.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Uma grande dificuldade na aplicação das normas de zona de proteção de aeródromos está na distribuição das responsabilidades que se estabelecem entre o Comando da Aeronáutica, as autoridades municipais e estaduais e os administradores de aeroportos. O Comando da Aeronáutica, representado pelos Comandos Aéreos Regionais (COMAR) tem o poder de fiscalização e embargo de qualquer obstáculo implantado de forma irregular, acima dos limites impostos pelos Planos de Zona de Proteção de aeródromo. As autoridades municipais e estaduais têm a responsabilidade de controlar as implantações, pois através dos planos diretores e das Leis de Uso do Solo, estas autoridades devem ter o controle sobre qualquer tipo de aproveitamento do solo. Os Administradores de Aeroportos, por sua vez, devem controlar as implantações internas aos sítios aeroportuários. No entanto, devido ao tipo de atividade desenvolvida devem ter maior contato com as normas de controle dos obstáculos nos arredores dos aeroportos.

Percebe-se, no entanto, que apesar da existência de todas as autoridades citadas, há uma grande dificuldade na gestão e controle do crescimento urbano e das implantações no entorno dos aeroportos.

Os COMAR jurisdicionam grandes regiões do país, e dessa forma, têm a responsabilidade de fiscalizar as implantações em todos os aeroportos contidos nas suas áreas de jurisdição. No entanto, as prefeituras e as respectivas Secretarias de Planejamento periodicamente mudam seus gestores e possuem diversas outras atribuições para fazerem com que os municípios progridam. Este progresso, muitas vezes, não permite o estudo e a avaliação dos ângulos verticais e horizontais que delimitam os Planos de Zona de Proteção de Aeródromo e os aeroportos sendo complexos exigem dos seus administradores atenção para as outras múltiplas atividades, não se limitando ao assunto aqui abordado.

Portanto, em função de toda essa dificuldade na aplicação das normas e restrições de uso e da fiscalização das implantações no entorno de aeroportos, entende-se que a utilização de Imagens de Alta Resolução espacial para Gerenciamento de Zonas de

Proteção de Aeródromo torna-se uma ferramenta com grande potencial para o gerenciamento mais qualificado e eficiente deste espaço.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo apresenta os principais conceitos sobre Zona de Proteção de Aeródromos, abordando desde o histórico da legislação que regula o assunto, até os aspectos técnicos que definem as superfícies limitadoras de obstáculos. Além da abordagem do assunto citado, são apresentados os principais conceitos sobre Sensoriamento Remoto envolvidos no desenvolvimento deste trabalho.

### **2.1. CONVENÇÃO DE CHICAGO**

Em 07 de dezembro de 1944, em Chicago, foi criada, através da Convenção de Aviação Civil Internacional, a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), que passou a integrar a Organização das Nações Unidas (ONU). A referida convenção contou com a assinatura de 190 países, que, como membros da OACI, seguem suas normas e regulamentações, as quais possuem como premissa básica, o desenvolvimento da aviação civil de maneira segura e sistemática.

A regulamentação básica fundamental estabelecida pela referida convenção compõe-se em 18 volumes, chamados *Anexos*. Cada Anexo possui a finalidade de padronizar uma das diversas atividades envolvidas no âmbito da Aviação Civil. O Anexo de interesse a ser abordado neste trabalho é o de número 14 – Projeto e Operação de Aeródromos.

### **2.2. ANEXO 14 – ORGANIZAÇÃO DE AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL**

Assim como os outros 17 Anexos reguladores publicados pela Organização de Aviação Civil Internacional, este Anexo 14 é composto de diversos critérios a serem adotados pelos países assinantes visando à operação segura das aeronaves enfocando os

aeroportos e suas imediações. O referido Anexo trata de todos os critérios, desde a construção até a operação de aeroportos.

Em seu Capítulo 4, o Anexo 14 trata da restrição e remoção de obstáculos com o objetivo de definir as especificações do espaço aéreo ao redor dos aeródromos a ser mantido livre dos mesmos. Esta restrição visa permitir que as operações das aeronaves nos aeródromos sejam realizadas de forma segura e evitar que os aeródromos se tornem inoperantes pelo crescimento de obstáculos em seu entorno. Isto se consegue estabelecendo-se uma série de superfícies limitadoras de obstáculos que definem os limites para os quais os objetos podem se projetar no espaço aéreo.

Neste capítulo constam os principais conceitos e parâmetros que estabelecem os Planos de Zona de Proteção de Aeródromos. Além dos conceitos estabelecidos no Anexo 14, os critérios para avaliação de obstáculos em relação a Procedimentos de Aproximação de Aeronaves estão contidos no DOC 8168 (Procedimentos para Serviços de Navegação Aérea - Operações de Aeronaves (PANS-OPS)).

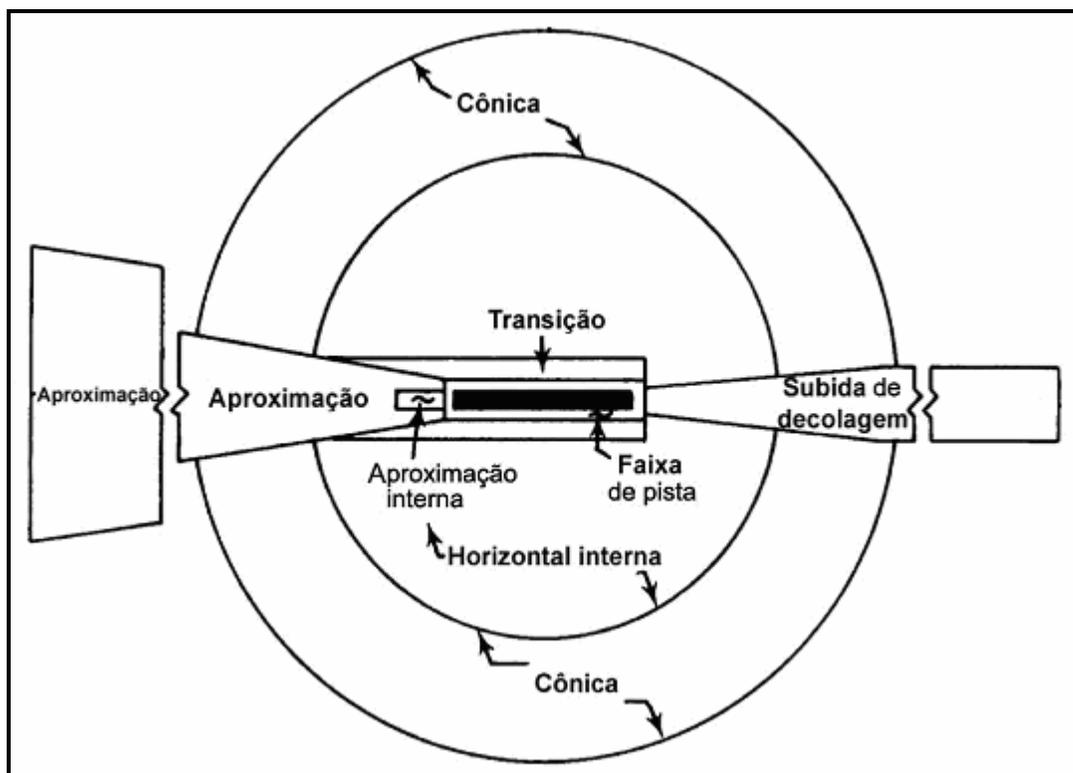


FIGURA 01 – SUPERFÍCIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS

Adaptada de INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (2009)

Os conceitos e parâmetros estabelecidos para cada área representada pela Figura 01 serão melhor detalhados no item 2.3.

### 2.3. PORTARIA 1.141/GM5

Conforme BRASIL (1946), o Brasil é membro da OACI, desde a década de 40 e assim, possui a obrigação de cumprir os critérios e limitações de implantações no entorno dos seus aeroportos. Na situação atual, há diversos aeroportos situados em cidades de médio a grande porte, que possuem problemas de interferência de obstáculos acima dos gabaritos estabelecidos pelas superfícies limitadoras.

Conforme consta em BRASIL (1987), no ano de 1987, foi publicada a legislação de regula os assuntos sobre Zona de Proteção de Aeródromo e Zoneamento de Ruído, podendo ser considerada um grande marco para os referidos assuntos. A Portaria 1.141/GM5 detalhou os níveis de responsabilidade de cada autoridade envolvida no controle de obstáculos e abordou de forma sistemática os parâmetros e critérios para estabelecimento das superfícies limitadoras de obstáculos em função das características operacionais de cada aeroporto.

Na referida Portaria, estabelece-se que os Comandos Aéreos Regionais (COMAR) são responsáveis pela fiscalização e pelo embargo de qualquer obra que esteja em desacordo com os gabaritos nela estabelecidos. Além do embargo de obras, estabelece-se à referida autoridade, o poder de determinar a eliminação de obstáculos já erigidos. Às autoridades municipais determina-se a responsabilidade de controle de implantações nas áreas externas aos aeroportos e, sempre que houver situações em que as solicitações de autorização de construção estejam acima dos limites estabelecidos pelos planos de Zona de Proteção, deverão encaminhar as mesmas para análise e instruções dos COMAR. Aos administradores de aeroportos cabe o controle para que as implantações nos sítios aeroportuários não estejam em desacordo com os limites estabelecidos pela Portaria 1.141/GM5.

## 2.4. ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO

Conforme BRASIL (1987), pode-se definir Zona de Proteção de Aeródromo como o conjunto de critérios e superfícies limitadoras que determinam a localização e altura permitidas para implantações nas proximidades da pista de um aeroporto. A Zona de Proteção de um Aeródromo pode ser descrita através de Planos Básicos ou Planos Específicos, conforme as características do local e decisão da Autoridade Aeronáutica.

## 2.5. PLANO BÁSICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO

Conforme BRASIL (1987), por definição, onde não houver situações que levem a Autoridade Aeronáutica a decidir por publicar um Plano Específico de Zona de Proteção, as superfícies limitadoras de obstáculos nos aeroportos serão definidas por Planos Básicos de Zona de Proteção de Aeródromo. Os parâmetros dos Planos Básicos de Zonas de Proteção dos aeroportos são determinados em função das seguintes variáveis:

### 2.5.1. Comprimento básico de pista

De acordo com BRASIL (1987), o comprimento básico de pista leva em consideração a temperatura de referência do aeródromo (média das temperaturas do mês mais quente do ano), a altitude do aeródromo, o comprimento real da pista e o gradiente de pista (diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da pista). Dessa forma, o comprimento real de pista e o comprimento básico de pista possuem valores diferentes.

A intenção da redução do comprimento de pista para fins de zona de proteção de aeródromo é de equivaler às influências físicas que uma aeronave sofre em função da variação de temperatura em relação a uma temperatura de referência e também da

elevação de altitude em relação ao nível médio do mar. A quantidade de pista necessária para a decolagem de uma aeronave está diretamente relacionada com a temperatura, densidade e pressão atmosférica, que exercem influência direta em sua sustentação.

Em função do comprimento básico de pista, para fins de zona de proteção de aeródromo, uma pista é classificada com os códigos de pista definidos na Tabela 01:

CÓDIGO DA PISTA	1	2	3	4
COMPRIMENTO DA PISTA	Menor que 800 m	De 800 m a 1.200 m Exclusive	De 1.200 m até 1.800 m Exclusive	1.800 m ou Maior

TABELA 01 – CÓDIGO DA PISTA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO BÁSICO DE PISTA - BRASIL (1987)

### 2.5.2. Tipo de Operação

Conforme BRASIL (1987), uma pista pode ser classificada quanto ao seu tipo de operação da seguinte forma:

VFR: Não possui auxílios à navegação aérea e conseqüentemente não possui procedimentos de Saída ou de Chegada por instrumentos. Neste tipo de caso é possível apenas operação por regra de vôo visual.

IFR-NÃO PRECISÃO: Operação com procedimentos baseados em equipamentos de auxílio à navegação aérea, mas que não possuem equipamentos que possibilitem a indicação eletrônica de trajetória de planeio.

IFR-PRECISÃO: Operação com procedimentos baseados em equipamentos que possibilitam a indicação eletrônica de trajetória de planeio.

Baseando-se nesses dois critérios (código de pista e tipo de operação), é possível estabelecer-se os parâmetros que definem as dimensões e as restrições impostas por cada superfície limitadora. As superfícies limitadoras e seus parâmetros estão apresentados nos itens 2.5.3 a 2.5.9.

### 2.5.3. Faixa de Pista

Conforme BRASIL (1987), o gabarito da Faixa de Pista envolve a pista de pouso e tem, em cada ponto, a altitude do eixo da pista ou no seu prolongamento. A configuração e as medidas constam na Figura 02 e Tabela 02.

Para cálculo das dimensões da Faixa de Pista, considera-se também as dimensões das Zonas de Parada. As Zonas de Parada são trechos pavimentados que se estendem além das cabeceiras, que têm como finalidade proporcionar melhores condições de parada em caso de necessidade.



FIGURA 02 - FAIXA DE PISTA - PORTARIA 1.141/GM-5 (1987)

A tabela abaixo apresenta as configurações das faixas de pista em função do código de pista e do tipo de operação.

PARÂMETRO	CLASSE DO AERÓDROMO						
	VFR			IFR – NÃO PRECISÃO		IFR - PRECISÃO	
	CÓDIGO DE PISTA			CÓDIGO DE PISTA		CÓDIGO DE PISTA	
	1	2	3 e 4	1 e 2	3 e 4	1 e 2	3 e 4
A(m)	60	80	150	300	300	150	300
B(m)	30	60	60	60	60	60	60

TABELA 02 – PARÂMETROS PARA DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DA FAIXA DE PISTA - BRASIL (1987)

Não é permitido qualquer tipo de implantação acima do nível da pista na área delimitada pela faixa de pista. A única exceção refere-se aos auxílios à navegação aérea que necessariamente tenham que ser instalados na referida área.

Apesar de a faixa de pista ser uma área sensível a ser preservada em função de sua proximidade com a pista, em alguns aeroportos esta área está violada, inclusive por ocupação urbana. Isso ocorre, por exemplo, no Aeroporto Internacional Salgado Filho, conforme pode ser constatado em BRASIL (2005).

#### 2.5.4. Rampas

A expressão “rampa” é utilizada para definir o ângulo vertical de uma superfície limitadora da altitude de obstáculos. A rampa é expressa em forma de fração, cujo numerador é 1 e o denominador, o número definidor. Assim, uma rampa 1/50 indica que a cada 50 m na horizontal, a superfície limitadora eleva-se 1 metro. Esta rampa é mais restritiva que uma rampa 1/30, pois indica que uma determinada altura (p.ex. 10m) só poderá se situar a partir de 500m enquanto uma rampa 1/30 o obstáculo de 10m poderia estar a 300m. A Figura 03 demonstra a distância que um obstáculo cujo topo esteja a 10 m acima da altitude da pista, deverá estar em relação ao início de uma superfície em rampa.

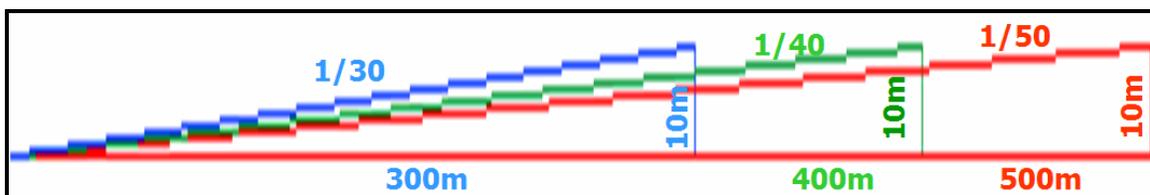


FIGURA 03 - REPRESENTAÇÃO DE RAMPAS

#### 2.5.5. Área de Aproximação

Conforme BRASIL (1987), a maior incidência de acidentes aeronáuticos ocorre durante as fases de pouso e decolagem, pois nessas situações as aeronaves estão mais baixas e com menos sustentação que na fase de vôo de cruzeiro. Sendo assim, pode-se considerar que as áreas de aproximação e de decolagem são de extrema importância nos

planos de zona de proteção de aeródromo. Essas duas áreas se sobrepõem, sendo a área de aproximação mais restritiva que a de decolagem, motivo pelo qual definiremos abaixo apenas a área de aproximação.

O artigo nº 7 da Portaria 1.141/GM5 estabelece que a área de aproximação estende-se em rampa (ângulo vertical positivo) a partir da faixa de pista, seguindo a orientação do prolongamento do eixo da pista. O que a referida Portaria não descreve neste artigo, apresentando apenas nas figuras e tabelas, é que a área de aproximação não considera as zonas de parada, de tal maneira que ela inicia-se, em quase todos os casos, a 60 m da cabeceira da pista. Outro aspecto interessante da área de aproximação é que a abertura angular aumenta de acordo com a distância da cabeceira.

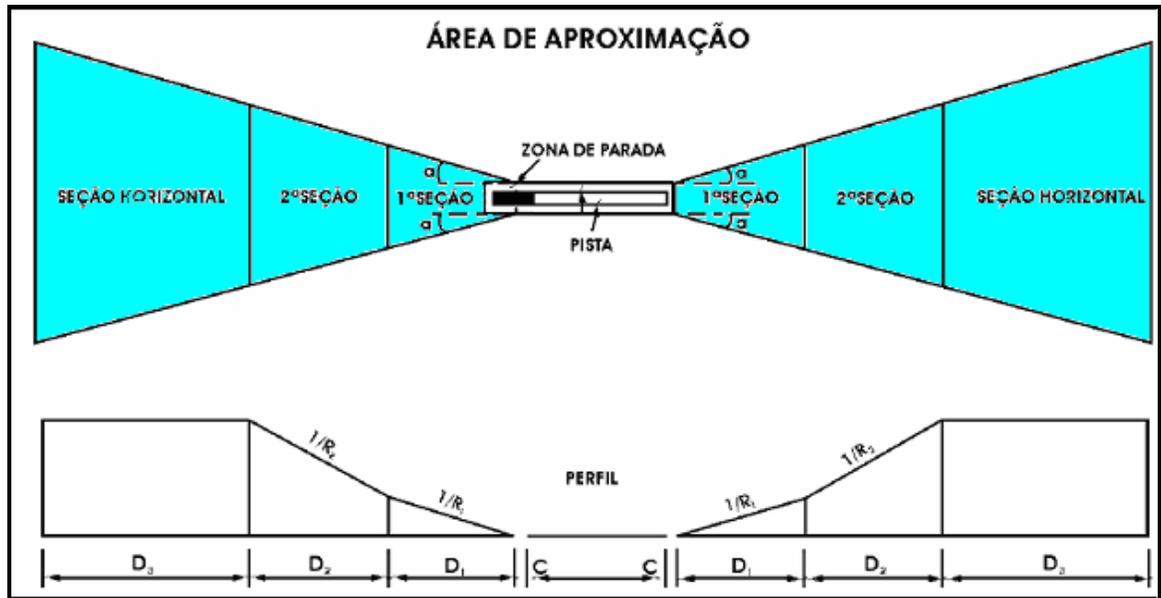


FIGURA 04 - ÁREA DE APROXIMAÇÃO- PORTARIA 1.141/GM-5 (1987)

A Figura 04 representa as vistas em perfil e em planta de uma zona de proteção de aeródromo. A Tabela 03 define os parâmetros e dimensões, conforme as características do aeródromo.

PARÂMETRO	CLASSE DO AERÓDROMO							
	VFR				IFR – NÃO PRECISÃO		IFR - PRECISÃO	
	CÓDIGO DE PISTA				CÓDIGO DE PISTA		CÓDIGO DE PISTA	
	1	2	3	4	1 e 2	3 e 4	1 e 2	3 e 4
°	6°	6°	6°	6°	9°	9°	9°	9°
R <sub>1</sub> (m)	20	25	30	40	40	50	50	50
R <sub>2</sub> (m)	-	-	-	-	-	40	40	40
C (m)	30	60	60	60	60	60	60	60
D <sub>1</sub> (m)	1600	2500	3000	3000	2500	3000	3000	3000
D <sub>2</sub> (m)	-	-	-	-	-	3600	3600	3600
D <sub>3</sub> (m)	-	-	-	-	-	8400	8400	8400

TABELA 03 – CONFIGURAÇÃO DA ÁREA DE APROXIMAÇÃO - BRASIL (1987)

### 2.5.6. Área de Transição

De acordo com BRASIL (1987), a área de transição possui gabarito menos restritivo em relação aos limites de altitudes dos obstáculos que a área de aproximação. Ela estende-se lateralmente entre o limite da faixa de pista e o limite da área de aproximação, com aumento da rampa no sentido do deslocamento transversal em relação ao eixo da pista, conforme a Figura 05.

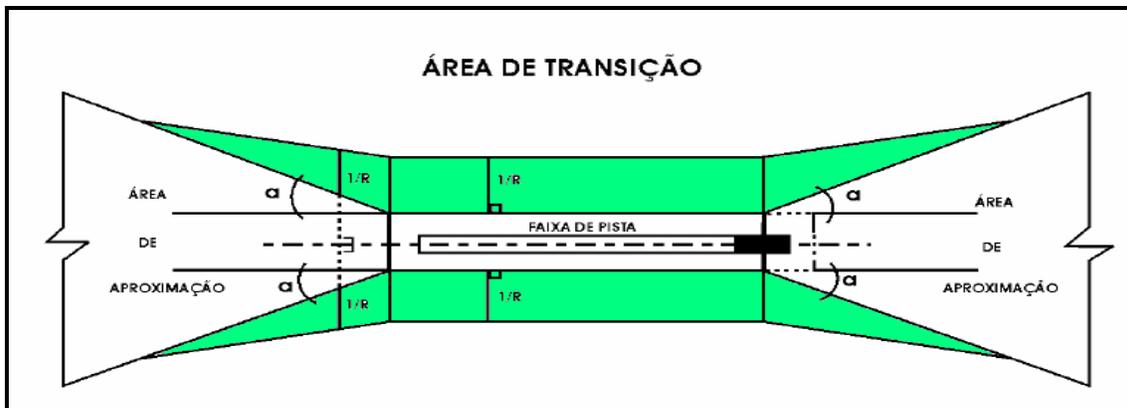


FIGURA 05 - ÁREA DE TRANSIÇÃO - PORTARIA 1.141/GM-5 (1987)

Os parâmetros de dimensionamento das áreas de transição estão definidos na Tabela 04, onde “a” é o ângulo de abertura da aérea de aproximação em relação ao prolongamento do limite lateral da faixa de pista e “R” é o denominador da rampa estabelecida para a área de transição em cada caso. A referida tabela considera como critérios, o tipo de operação e o código de pista, que é estabelecido a partir do comprimento básico de pista.

PARÂMETRO	CLASSE DO AERÓDROMO				
	VFR		IFR – NÃO PRECISÃO		IFR - PRECISÃO
	CÓDIGO DE PISTA		CÓDIGO DE PISTA		CÓDIGO DE PISTA
	1 e 2	3 e 4	1 e 2	3 e 4	1, 2, 3 e 4
A	6°	6°	9°	9°	9°
R	5	7	5	7	7

TABELA 04 – ÁREA DE TRANSIÇÃO - BRASIL (1987)

#### 2.5.7. Área Horizontal Interna

Conforme BRASIL (1987), Artigo 10, o gabarito da Área Horizontal Interna estende-se para além dos limites das Áreas de Aproximação e Transição, com desnível de 45m (quarenta e cinco metros) em relação à altitude do Aeródromo. Seus limites externos são semicírculos, com centros nas cabeceiras das pistas, conforme ilustrado na Figura 06.

Sendo assim, mesmo que um obstáculo não esteja violando os gabaritos da área de aproximação ou área de transição, e estando o mesmo dentro dos limites da área horizontal interna, e seu topo estiver em um desnível superior a 45 m acima da altitude da pista, ele estará violando o gabarito desta última área citada. Essa área, conforme o tipo de operação e código de pista, pode atingir o limite de 4000 m em relação à pista.

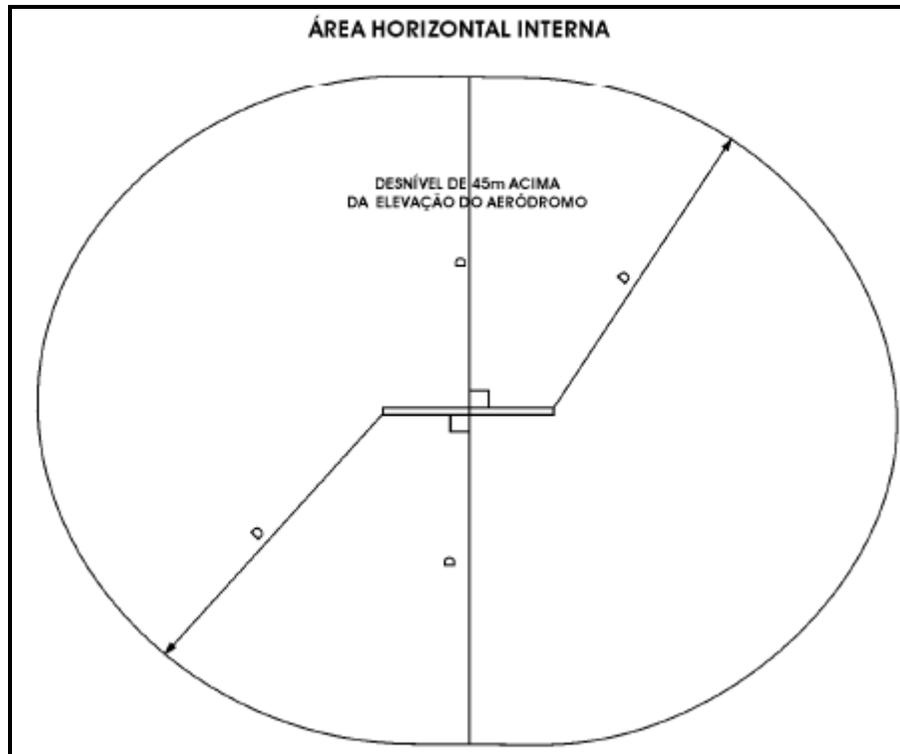


FIGURA 06 – REPRESENTAÇÃO DA ÁREA HORIZONTAL INTERNA -  
PORTARIA 1.141/GM-5 (1987)

A tabela 05 define, conforme as características físicas e operacionais do aeródromo, as distâncias limites, representadas pela letra “D”:

PARÂMETRO	CLASSE DO AERÓDROMO						
	VFR			IFR – NÃO PRECISÃO		IFR - PRECISÃO	
	CÓDIGO DE PISTA			CÓDIGO DE PISTA		CÓDIGO DE PISTA	
	1	2	3 e 4	1 e 2	3 e 4	1 e 2	3 e 4
D (m)	2000	2500	4000	3500	4000	3500	4000

TABELA 05 – ÁREA HORIZONTAL INTERNA - BRASIL (1987)

### 2.5.8. Área Cônica

Conforme BRASIL (1987), A área cônica localiza-se entre a área horizontal interna e a área horizontal externa, e estende-se em rampa (1/20) do limite da área horizontal interna (45 m) até o limite da área horizontal externa (60 m). Dessa forma, a Área Cônica possui a largura de apenas 300 m.

### 2.5.9. Área Horizontal Externa

BRASIL (1987) estabelece que a área horizontal externa estende-se a partir do limite da área cônica, limitando o desnível em relação a cabeceira em 60 m. A Figura 07 demonstra as características da área horizontal externa.

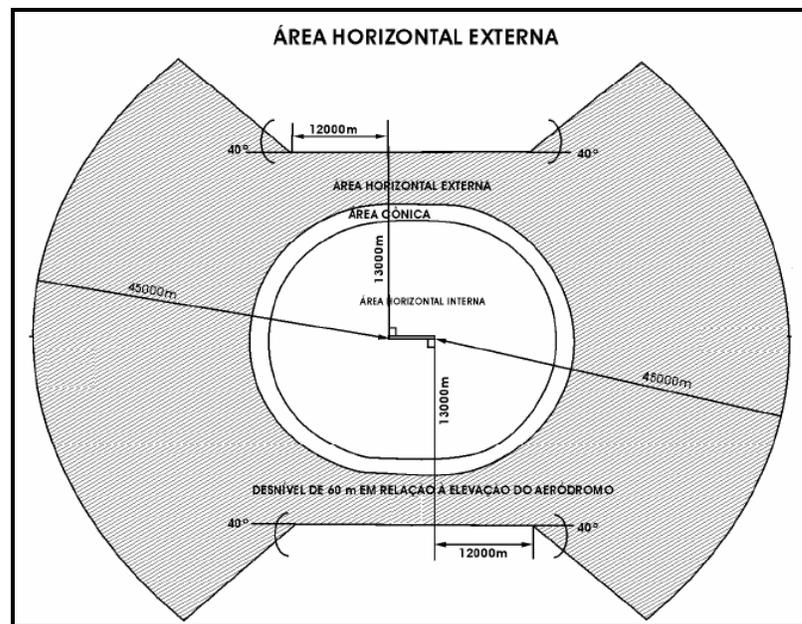


FIGURA 07 – ÁREA HORIZONTAL EXTERNA - PORTARIA 1.141/GM-5 (1987)

## 2.6. PLANO ESPECÍFICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO

Conforme BRASIL (1987), o Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromos, organizado com características especiais e fundamentado nos

procedimentos de Tráfego Aéreo, na Zona de Auxílios à Navegação Aérea, na Zona de Proteção dos Helipontos, nos acidentes naturais e artificiais existentes e no desenvolvimento da região, é publicado pelo Comando da Aeronáutica para substituir, em determinado aeródromo, o Plano Básico de Zona de Proteção, devendo conter dados sobre localização e nome(s) do(s) aeródromo(s), ato oficial que aprovou o respectivo Plano Específico, gabaritos, restrições a serem observadas, referência aos obstáculos que devam ser sinalizados ou retirados, referência aos pontos proeminentes, localizados na Zona de Proteção e considerados perigosos à navegação, para efeito de sinalização e outros esclarecimentos e informações julgados necessários. O Plano Específico de Zona de Proteção é caráter definitivo, devendo incluir todas as possibilidades de evolução futura, prevista pela autoridade aeronáutica e após sua aprovação, não caberá consulta sobre qualquer aproveitamento que ultrapasse o gabarito nele fixado e assim, um Plano Específico de Zona de Proteção somente poderá ser substituído por outro em virtude de determinação do Comandante da Aeronáutica.

Os Planos Específicos de Zona de Proteção de Aeródromo são baseados em estudos que levam em consideração os procedimentos locais, os auxílios à navegação aérea dos quais o aeródromo dispõe, acidentes geográficos e os obstáculos existentes. Em regiões onde há mais de um aeródromo próximo, apenas um Plano Específico pode ser publicado para os aeródromos envolvidos, como é o caso do Plano Específico de Zona de Proteção do Aeroporto de Porto Alegre e Base Aérea de Canoas, conforme BRASIL (2005).

Os planos Específicos são mais complexos e difíceis de se compreender que os planos básicos. Isso pode gerar uma dificuldade maior no seu cumprimento por parte das autoridades municipais em relação ao Plano Básico.

## 2.7. PORTARIA 68/DGCEA/2005 – PLANO ESPECÍFICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DOS AERÓDROMOS DE PORTO ALEGRE E CANOAS

Conforme BRASIL (2005), o Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo de Porto Alegre e Canoas abrange 2 aeródromos e 37 municípios. Além das faixas de pista, áreas de aproximação e de transição, este documento especifica 35 áreas intermediárias (em rampa) e 31 áreas horizontais.

BRASIL (2005), estabelece que não seja permitido qualquer tipo de aproveitamento que ultrapasse os gabaritos da faixa de pista, áreas de aproximação e áreas de transição nela estabelecidos. No entanto, nas áreas horizontais e intermediárias poderão ser autorizados aproveitamentos, sem penalização para os Aeródromos deste plano, desde que um estudo aeronáutico específico, realizado pelo Comando da Aeronáutica, comprove que não irão interferir nas operações dos Auxílios à Navegação Aérea e na circulação operacional das aeronaves.

Ainda na referida Portaria, constam que as obrigações da autoridade aeronáutica local (COMAR) são fiscalizar o cumprimento das restrições nela estabelecidas, com a colaboração das autoridades municipais, estaduais, federais e outras entidades diretamente envolvidas no controle de obstáculos no entorno dos aeroportos.

O Plano Específico de Zona de Proteção de Porto Alegre foi publicado, considerando-se a futura ampliação da pista do Aeroporto Internacional Salgado Filho, de 2.280 m para 2.800 m, porém o projeto prevê a ampliação para 3.200 m. A citada Portaria lista uma série de obstáculos que, na medida do possível, deveriam ser eliminados. Além disso, esses obstáculos, em hipótese alguma, poderiam servir de referência para o surgimento de novos obstáculos, mesmo que mais baixos.

Conforme BRASIL (2008), houve a necessidade de regularização da situação dos obstáculos implantados até dezembro de 2007. Isso demonstra que apesar da existência e divulgação do Plano Específico de Zona de Proteção do Aeroporto Internacional Salgado Filho em 2005, os obstáculos continuaram surgindo.

## 2.8. SUPERFÍCIE DO SEGMENTO VISUAL – VSS

Conforme INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, DOC 8168 – PANS-OPS (2006), não é permitida a publicação de nenhum novo procedimento de aproximação por instrumentos caso haja obstáculos na Superfície do Segmento Visual – (*Visual Segment Surface –VSS*) da pista para a qual aquele procedimento for elaborado. Além disso, até o mês de março de 2012, os possíveis obstáculos existentes à referida superfície deverão ser eliminados, ou deverão ser adotadas medidas mitigadoras, sob pena de cancelamento de todos os procedimentos de aproximação por instrumentos para a pista cuja VSS estiver violada por obstáculos. Essas medidas mitigadoras normalmente referem-se a deslocamento de cabeceira, o que causa redução no comprimento da pista e conseqüentemente diminuição da capacidade do aeródromo além da diminuição nos índices de segurança.

A Superfície do Segmento Visual possui configuração e objetivos diferenciados dos gabaritos de Zonas de Proteção de Aeródromos, pois a Portaria de Zona de Proteção de Aeródromo prevê a publicação de Planos Específicos e através deles, a convivência com alguns obstáculos por meio da flexibilização de critérios baseada em estudos aeronáuticos. Já no caso da VSS, não há a possibilidade de convivência com obstáculos.

Dentre os parâmetros que estabelecem os limites da Superfície do Segmento Visual, destacam-se os representados na Figura 08 e descritos a seguir:

- Obstáculos com até 15 metros de desnível em relação à cabeceira não são considerados;
- A VSS inicia-se a partir de um retângulo definido a 60 m da cabeceira e com 150 m para cada lado do eixo de pistas códigos 3 e 4 e 75 metros para cada lado do eixo de pistas códigos 1 e 2. A partir deste ponto inicia-se uma abertura de 15% que equivale a um ângulo de  $8,53^{\circ}$ .
- Considerando-se que o ângulo de descida projetado para a maioria dos procedimentos de aproximação por instrumentos igual a 3 graus, estabelece-se uma rampa de  $3 - 1.12 = 1.88$  graus, que resulta em uma rampa de 1/30.24 m.
- Deslocamento angular da área abrangida pela VSS caso o segmento de aproximação final não seja alinhado com o eixo da pista.

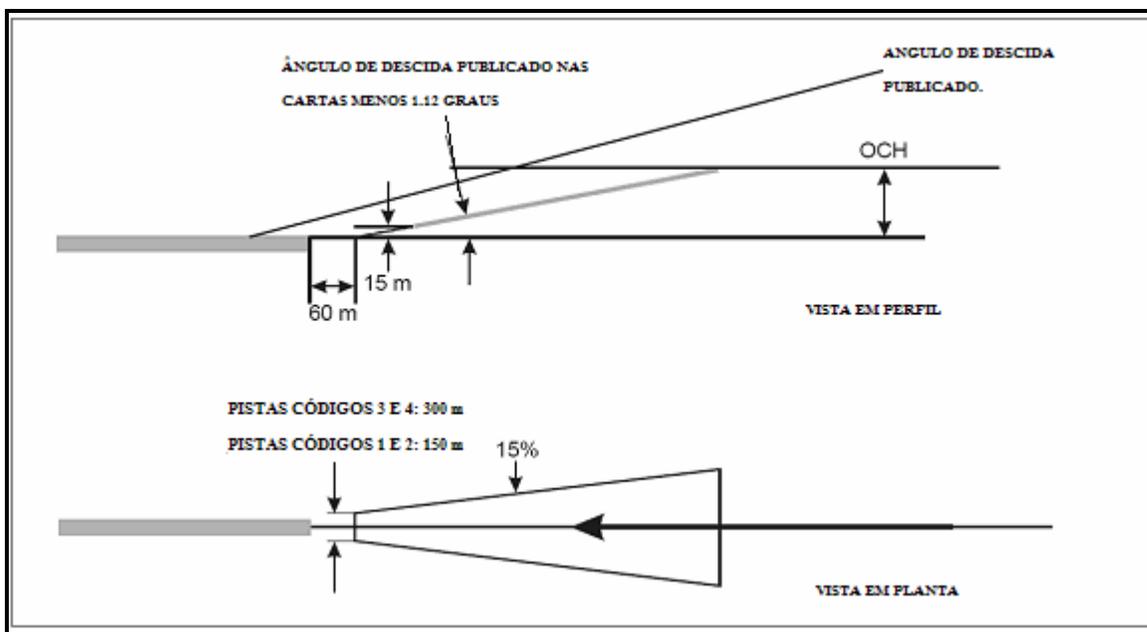


FIGURA 08 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VSS  
ADAPTADO DE INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION ,  
DOC 8168 – PANS-OPS (2006)

É fundamental que, além do cumprimento das limitações impostas pela Zona de Proteção de Aeródromos, tenha-se o máximo rigor em relação às implantações na Superfície do Segmento Visual, sob pena de, em situações críticas, tornar-se um aeródromo inviável para a aviação comercial. Essa situação que deverá causar sérios prejuízos à população da região atendida pelo aeroporto cuja VSS for violada.

## 2.9. SATÉLITES

O caminho seguido por um satélite é definido por sua órbita. A definição da órbita varia em função da sua altitude, da sua orientação e da sua rotação em relação à Terra. Os satélites em altas altitudes, normalmente realizam órbitas geoestacionárias e captam informações da mesma porção do globo terrestre realizando suas órbitas em velocidades que correspondem à rotação da Terra. Isso permite que eles colem informações constantemente sobre áreas específicas. Esse tipo de satélites é utilizado para meteorologia e telecomunicações. Outros satélites são projetados para seguir uma órbita

norte-sul. Essas órbitas são projetadas de maneira que cubram uma faixa da superfície terrestre sempre no mesmo horário do dia. A Figura 09 representa a órbita de satélites em relação à rotação terrestre.

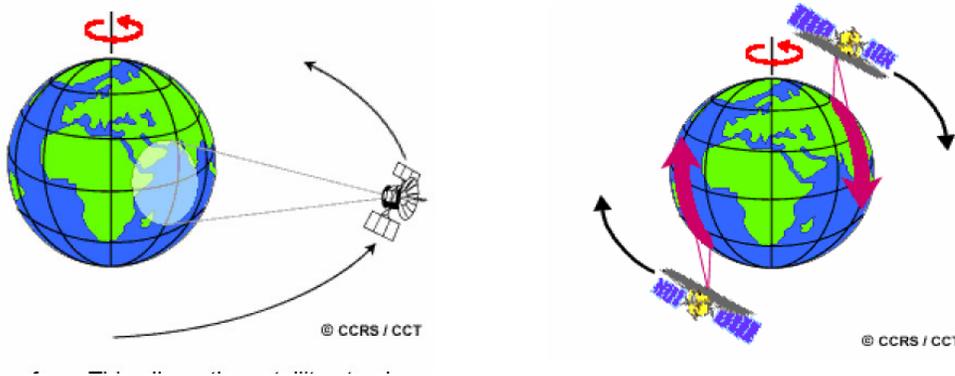


FIGURA 09 – ÓRBITAS SATELITAIS. (Fundamentals of Remote Sensing)

## 2.10. RESOLUÇÃO

As imagens multiespectrais de sensoriamento remoto são definidas por 4 (quatro) tipos de resolução, sendo elas a Resolução Espacial, Resolução Espectral, Resolução Radiométrica e Resolução Temporal.

### 2.10.1. Resolução Espacial

De acordo com a CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (2005), a resolução espacial de uma imagem adquirida por um sensor de varredura refere-se ao tamanho da menor feição no terreno possível de ser distinguida nas imagens geradas. Quanto menor o objeto reconhecível, melhor é a resolução espacial. A resolução espacial de um sensor depende primariamente de seu IFOV (*Instantaneous Field Of View – Campo de visão instantâneo*), que é o cone de visibilidade do sensor e determina a área na superfície da Terra que é “vista” a uma dada altitude em um momento particular. O

tamanho da área vista é determinado pela multiplicação do IFOV pela distância entre o sensor e o solo. Esta área no solo é chamada de célula de resolução e determina a máxima resolução espacial de um sensor.

A Figura 10 apresenta a definição, (no quadro inferior direito) de um pixel de 1 m<sup>2</sup> (menor elemento da figura), na fuselagem de um avião.

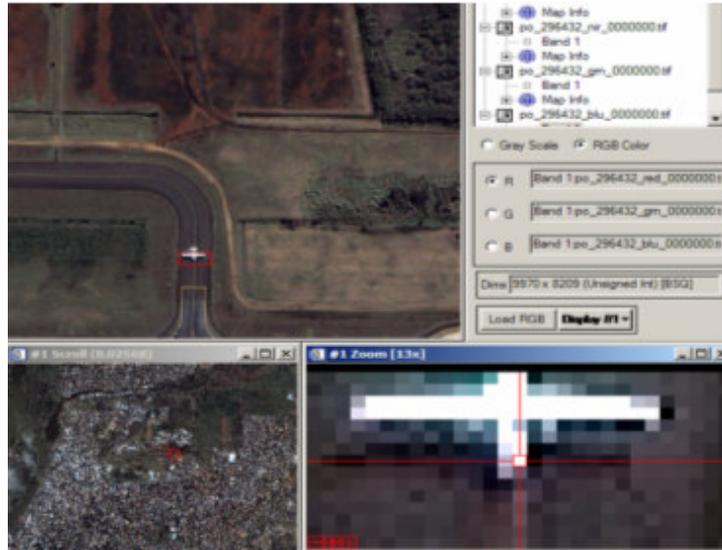


FIGURA 10 – MENOR ELEMENTO DA IMAGEM

Entre os satélites comerciais de alta resolução espacial mais comuns, pode-se citar o IKONOS II, QUICK BIRD e GEOEYE-1. A Tabela 06 apresenta a descrição de algumas das suas principais características:

CARACTERÍSTICA:	IKONOS	QUICK BIRD	GEOEYE-1
ALTITUDE ORBITAL	681 Km	450 Km	681 Km
TEMPO DE REVISITA	APROXIMADAMENTE 3 DIAS	1 A 3,5 DIAS, DEPENDENDO DA LATITUDE	MENOS DE 3 DIAS
RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA	11 BITS	11 BITS	11 BITS
RESOLUÇÃO ESPACIAL	0,82 M (PANCROMÁTICA) 3,2 M (MULTIESPECTRAL)	0,61 M A 0,72 M (PANCROMÁTICA) 2,44 M A 2,88 M (MULTI ESPECTRAL)	0,41 M (PANCROMÁTICA) 1,65 M (MULTI ESPECTRAL)
FAIXA ESPECTRAL	PANCROMÁTICO: 450-900 nm AZUL: 450-520 nm VERDE: 520-600 nm VERMELHO: 630-690 nm INFRA VERMELHO PRÓX: 760-900 nm	PANCROMÁTICO: 450-900 nm AZUL: 450-520 nm VERDE: 520-600 nm VERMELHO: 630-690 nm INFRA VERMELHO PROXIMO: 760-900 nm	PANCROMÁTICO: 450-800 nm AZUL: 450-510 nm VERDE: 510-580 nm VERMELHO: 655-690 nm INFRA VERMELHO PROX: 780-920 nm

TABELA 06 – CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES

### 2.10.2. Resolução Espectral

Conforme já definido, o imageamento em sensoriamento remoto ocorre pelo registro da energia eletromagnética emitida pelo Sol e refletida pela superfície da Terra. Uma das características da energia eletromagnética é o comprimento de onda (Fig. 11) e o conjunto dos diversos comprimentos de onda gera o espectro eletromagnético (Fig. 12).

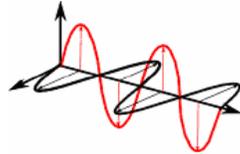


FIGURA 11 – ONDA ELETROMAGNÉTICA

O espectro eletromagnético cobre um intervalo de comprimentos de onda, que varia de comprimentos pequenos, como os Raios Gama a comprimentos grandes, como as ondas de rádio e ondas longas. A Figura 12 representa a distribuição dos comprimentos de onda e frequência no espectro eletromagnético.

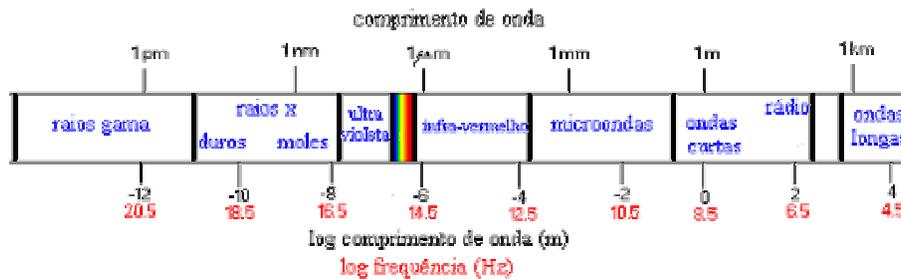


FIGURA 12 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A única região do espectro para a qual nossos olhos são sensíveis é a região do "visível", identificada pelas cores abaixo especificadas. Essas próprias cores têm suas características específicas, que também podem ser distintas por seu comprimento de onda.

MOREIRA (2001) define que a resolução espectral refere-se à melhor ou à pior caracterização dos alvos, nas imagens, em função da largura das bandas espectrais em que o sensor opera. Quanto menor a largura das faixas que um determinado sensor opera, melhor é sua resolução espectral. Por outro lado se um sistema sensor possui detectores operando em mais de uma faixa espectral, o sistema é dito multiespectral ou hiperespectral pois registra a radiação eletromagnética proveniente dos alvos em várias

faixas espectrais. Como exemplo, a Tabela 07 descreve o sistema sensor a bordo dos satélites Landsat (sensor TM) que possui 07 (sete) bandas espectrais e que são listadas abaixo:

Banda	Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )
1	(0,45 – 0,52)
2	(0,52 – 0,60)
3	(0,63 – 0,69)
4	(0,76 – 0,90)
5	(1,55 – 1,75)
6	(10,4 – 12,5)
7	(2,08 – 2,35)

TABELA 07 – BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM – LANDSAT 5

A resolução espectral possui papel fundamental na análise de uso do solo, pois através das composições coloridas de diferentes bandas espectrais no sistema RGB, consegue-se definir informações distintas. Este tipo de análise é aplicado aos estudos ambientais e até mesmo para auxílio nas lavouras de produção de cana-de-açúcar e soja.

### 2.10.3. Resolução Radiométrica:

A resolução radiométrica de um sensor é determinada pela sua sensibilidade à magnitude da energia eletromagnética. A resolução radiométrica de um sistema de imagem descreve a sua capacidade de discriminar diferenças mínimas de quantidades de energia. Quanto melhor a resolução radiométrica de um sensor, mais sensível ele é para detectar pequenas diferenças de energia refletida ou emitida.

Segundo Moreira (2001) os valores de intensidade da energia eletromagnética registrada por um sensor são especificados em níveis de cinza que variam de preto, para o valor de intensidade igual a zero e branco para a máxima intensidade. Os níveis

intermediários são descritos como níveis de cinza. Assim, a quantidade de níveis de cinza de uma imagem determina o seu nível de detalhamento. O número de níveis de cinza binário e é representado por bits, que, numericamente é expresso na forma de potência do número 2: ( $2^n$ ), onde n é o número de bits. O resultado da potência ( $2^n$ ) representa o número de níveis de cinza de uma imagem.

Uma imagem de 2 bits possui 4 níveis de cinza enquanto uma imagem de 8 bits possui 256 níveis de cinza. Assim, uma imagem 2 bits com alvos de diversas reflectâncias serão agrupados em somente 4 níveis de cinza. Assim, quanto maior o número de níveis de cinza, melhor a resolução radiométrica e maior a capacidade de distinção de detalhes entre diferentes alvos nas imagens, conforme ilustrado na Figura 13.

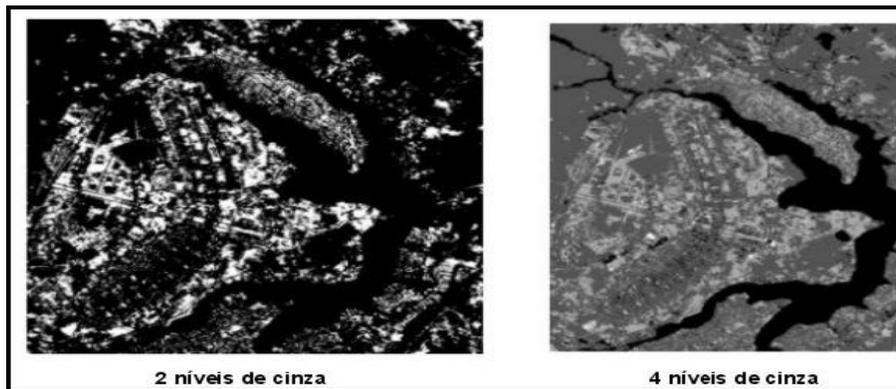


FIGURA 13 – DIFERENÇA NO DETALHAMENTO ENTRE IMAGENS COM 2 E 4 NÍVEIS DE CINZA (MOREIRA 2001)

#### 2.10.4. Resolução Temporal

Este tipo de resolução define a periodicidade na qual um sensor consegue obter imagens do mesmo local. Essa característica varia em função do tempo de revisita e do tamanho da faixa imageada.

Alguns satélites geoestacionários, produzem imagens do mesmo local diversas vezes ao dia. Esse tipo de qualidade é fundamental para o acompanhamento da evolução de fenômenos meteorológicos. Isto está exemplificado na Figura 14, na qual o Satélite GOES identificou um importante fenômeno meteorológico.



FIGURA 14 – IMAGEM DO SATÉLITE GOES –  
CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (2005)

A maioria dos satélites comerciais que produzem imagens com pixel inferior a 1 m possuem tempo de revisita inferior a 7 dias. No entanto há que ressaltar que o fornecimento de imagens dependerá da cobertura de nuvens na área de interesse no momento da passagem do satélite. Assim, o processo de aquisição de imagens pode demorar bem mais que o tempo de passagem do satélite.

## 2.11. PROCESSAMENTO DE IMAGENS

### 2.11.1. Equalização de Histogramas

Para a análise visual de imagens de sensoriamento remoto é necessário que sejam adequados os valores de brilho para produzir o contraste entre os alvos. Este procedimento é realizado através de transformações na distribuição dos níveis de cinza executadas nos histogramas que representam esses valores.

SILVA (2001), aborda o histograma como uma das formas mais comuns de se representar a distribuição dos níveis de cinza de uma imagem, e possivelmente a mais útil em processamento digital de imagens. Ele fornece a informação sobre quantos pixels na imagem possuem cada possível nível de cinza (que, no caso das imagens de 8 bits, variam de 0 a 255), ou, de forma equivalente, qual a proporção da imagem que corresponde a cada nível de cinza. Os histogramas são também conhecidos como distribuição de intensidades e função de densidade de probabilidade (FDP). Esse último termo advém do

fato de que, estatisticamente, o histograma representa, neste caso, a probabilidade de se achar um nível de cinza de um dado valor dentro de uma imagem.

De acordo com RICHARDS & JIA (2006), um histograma deve representar de forma adequada todos os valores de brilho e contraste de uma imagem. O método de produção de um histograma uniforme é geralmente conhecido como equalização de histograma. A Figura 15 demonstra a imagem utilizada no estudo com o seu histograma equalizado.

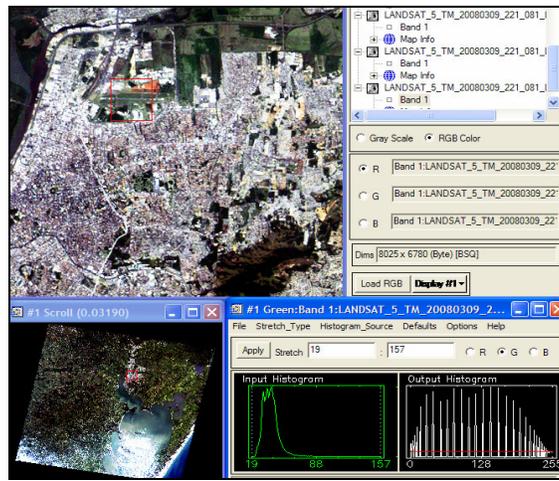


FIGURA 15 – EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMA

Se considerarmos os histogramas como curvas contínuas, como representado na Figura 16.

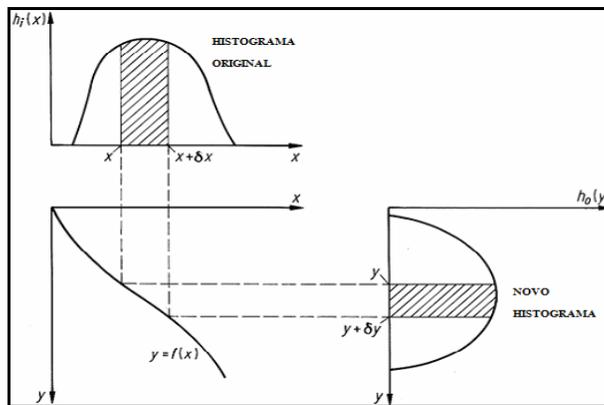


FIGURA 16 – EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMA – ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (2006)

Na Figura 16,  $h_i(x)$  representa o histograma da imagem original e  $h_o(y)$  representa Histograma da imagem após sua modificação de contraste. O número de pixels representado pelo intervalo  $y$  a  $y + \delta Y$  no histograma modificado deve, por definição, ser

igual ao número de pixels representados no intervalo modificado de  $x + \delta x$  no histograma original.

## 2.12. DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS

Segundo CRÓSTA (1992) as imagens geradas por sensores remotos, estão sujeitas a uma série de distorções espaciais. Sendo assim, não possuem precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados.

Conforme a CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (2005), muitas das distorções são sistemáticas, ou previsíveis na natureza e podem ser quantificadas por modelos matemáticos precisos do movimento do sensor e da geometria posicional da plataforma em relação à Terra. Outros erros, os não sistemáticos, ou randômicos não podem ser modelados ou corrigidos dessa forma. Para esses casos o registro geométrico da imagem em um sistema de coordenadas conhecido pode ser aplicado.

De acordo com RICHARDS & JIA (2006), há potencialmente mais distorções geométricas que distorções radiométricas nas imagens e seus efeitos são mais severos. Eles ocorrem por diversos fatores, incluindo:

### 2.12.1. Rotação da terra durante a aquisição da imagem:

Durante o tempo de aquisição da faixa imageada, a Terra realiza seu movimento de rotação, de oeste para leste, e a área imageada no final da faixa gera um ponto que está deslocado mais para oeste. Dessa forma, se as linhas de dados da imagem fossem organizadas em uma grade de pixels, as linhas finais seriam erroneamente deslocadas para o leste em relação ao terreno que elas representam, conforme ilustrado na Figura 17. Assim, para dar aos pixels suas corretas posições relativas ao solo é necessário deslocar a

borda inferior da imagem para o oeste na proporção do movimento da Terra durante a aquisição da imagem.



FIGURA 17 - EFEITO DE ROTAÇÃO DA TERRA SOBRE A IMAGEM –  
ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (2006)

### 2.12.2. Distorção panorâmica:

Para sensores utilizados em plataformas orbitais e aeronaves o IFOV (*Instantaneous Field of View*) é constante. Como resultado, a área efetiva dos pixels, no solo, é maior nas extremidades da varredura do que aquelas localizadas no centro da imagem. No entanto, nas imagens essas áreas aparecem distorcidas e menores (figura 18). Esses efeitos panorâmicos ocorrem em maior escala na geometria de sensores com IFOV com grandes campos de visada.

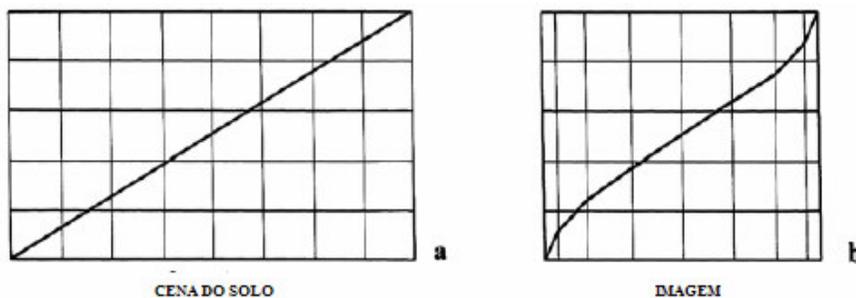


FIGURA 18 – DISTORÇÃO PANORÂMICA  
ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (2006)

A figura “18 a” representa a região no solo sendo imageada. Para simplificar, as células na matriz podem ser consideradas como alvos no terreno. Na figura “18 b”

observa-se que os pixels gravados nas bordas da imagem são menores que aqueles localizados no seu centro.

### 2.12.3. Curvatura Terrestre:

Devido à baixa altitude, imagens produzidas por sensores à bordo de aeronaves não são afetadas pelo efeito da curvatura terrestre. O mesmo ocorre com imagens de sensores à bordo de satélites que produzem faixas estreitas de imageamento, como é o caso do LANDSAT, SPOT, QUICK BIRD e IKONOS II.

Já as imagens produzidas por sensores a bordo de satélites que produzem faixas de imageamento largas, são afetadas pelo efeito da curvatura terrestre. Esse efeito é semelhante à distorção panorâmica. Os pixels ao centro da imagem não possuem distorções, porém, os pixels mais próximos das bordas da imagem serão afetados pela distorção devido à curvatura terrestre.

### 2.12.4. Tempo de Varredura em uma Posição:

Sensores que realizam varreduras de forma mecânica como LANDSAT (MSS e TM) requerem um tempo finito para rastrear ao longo de determinada faixa. Como exemplo deste efeito, o tempo requerido para a gravação de uma linha da imagem do sensor MSS é de aproximadamente 33 ms. Durante este tempo, o satélite desloca-se 213 m, pois sua velocidade equivalente é de 6.467 Km/s. Como resultado desse efeito, os pixels finais de uma linha de varredura avançam no terreno se comparados aos pixels do início desta mesma linha.

#### 2.12.5. Variações na velocidade, altitude e atitude da plataforma:

Variações na elevação ou altitude de uma plataforma de sensoriamento remoto resultam em uma modificação de escala, conforme ilustrado na Figura 19. O aumento de altitude no deslocamento do sensor é pequeno em comparação com o tempo de aquisição da imagem.



FIGURA 19 – EFEITO DA VARIAÇÃO DE ALTITUDE DA PLATAFORMA NA IMAGEM – ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (2006)

De forma similar, se a plataforma do sensor modifica sua velocidade, a modificação de escala ocorre no sentido do deslocamento da faixa de imageamento. Para plataformas satelitais, as variações de órbita podem resultar de uma excentricidade na órbita e pela não esfericidade da Terra. A deformação da imagem em função da variação da velocidade na plataforma do sensor é exemplificada na Figura 20:



FIGURA 20 – EFEITO DA VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DA PLATAFORMA NA IMAGEM – ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (2006)

Os efeitos causados pelas mudanças na atitude das plataformas podem ser corrigidos pelos dados denominados “yaw, pitch e roll” durante o deslocamento da plataforma orbital. Eles causam a rotação da imagem, com deslocamento longitudinal e transversal à varredura, conforme demonstrado na Figura 21:

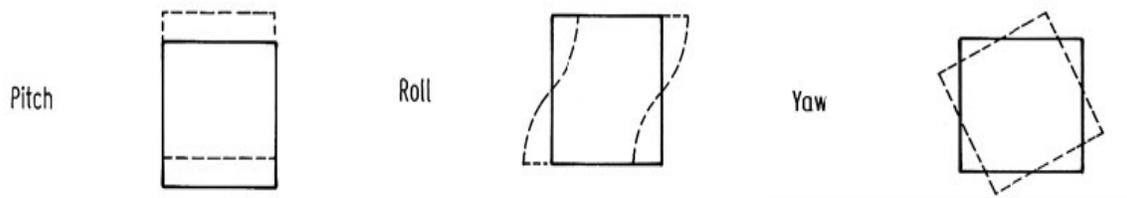


FIGURA 21 – EFEITOS DA MUDANÇA DE ATITUDE DA PLATAFORMA –  
ADAPTADO DE RICHARDS & JIA (2006)

As informações para as correções matemáticas dessas distorções causadas pelas variações de atitude são informadas através de dados de efemérides dos satélites.

#### 2.12.6. Distorções de Proporção:

As distorções de proporção em uma imagem referem-se à escala vertical comparada com escala horizontal. Pode-se citar como exemplo uma imagem multiespectral LANDSAT, na qual ocorre a distorção de pixel com 56 x 79 m. Neste caso, a distorção atinge a proporção de  $79/56 = 1.411$ .

#### 2.12.7. Sistema Geodésico de Referência e Projeção Cartográfica:

Conforme PATROCÍNIO (2004), os dados orbitais, quando utilizados para o estudo de recursos terrestres devem estar registrados em um sistema de projeção cartográfica específico. Há necessidade de compatibilização do sistema de projeção e do sistema geodésico de referência originais da imagem aos sistemas a serem utilizados nas análises e produções cartográficas. Embora não constitua um erro geométrico, exige uma transformação geométrica nos dados orbitais e isso pode ser executado pelas operações de correção geométrica para compensar as distorções nos dados.

## 2.13. CORREÇÕES GEOMÉTRICAS

A CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (2005) define que as correções geométricas têm o propósito de compensar as distorções das imagens para que o imageamento represente da melhor forma possível o mundo real. Segundo BERNSTEIN (1983) uma imagem será considerada geometricamente corrigida, se possuir um sistema de coordenadas cartográficas da área a qual está representando.

CRÓSTA (1992) afirma que a relação entre os sistemas de coordenadas (mapas X imagem), chamada de modelo de geometria orbital, pode ser calculada através do conhecimento dos parâmetros geométricos da órbita do satélite e de outras variáveis ou através da definição de pontos de controle no terreno. Tais pontos de controle devem ser reconhecíveis tanto no mapa (ou no terreno) como na imagem.

RICHARDS & JIA (2006) apresentam duas técnicas, que podem ser utilizadas para corrigir os vários tipos de distorções geométricas presentes nos dados de imagens digitais. Um deles trata da modelação da natureza e da magnitude das fontes de distorção e por meio desses modelos, estabelecer a fórmula de correção. Esta técnica é efetiva quando os tipos de distorção são bem caracterizados, como os causados pela rotação da Terra. A segunda técnica depende de estabelecer as relações entre endereços de pixels em uma imagem e as coordenadas correspondentes desses pontos no solo. Essas relações podem ser utilizadas para corrigir a geometria da imagem, independentemente do conhecimento das fontes de distorção por parte do analista. Este procedimento é o mais comumente utilizado e independe da plataforma utilizada para aquisição de dados.

### 2.13.1. Modelos de correção de erros sistemáticos

Este tipo de correção é aplicado pelos operadores dos satélites, com base em informações técnicas dos mesmos, como atitude, altitude e velocidade da plataforma. Esses dados não são disponibilizados para o usuário das imagens e normalmente as mesmas já foram submetidas à essa correção quando fornecidas pelos operadores dos

satélites. Porém, como as distorções envolvidas no imageamento não envolvem o sistema de projeção de interesse do usuário, não possuem precisão cartográfica. Conforme ISHIKAWA (2001), em função dessa baixa precisão há necessidade de fazer uma correção mais refinada, o que comumente é realizado pelo uso de pontos de controle.

### 2.13.2. Correção Baseada em Pontos de Controle

Esta técnica envolve a identificação de coordenadas de pontos de controle (*ground control points – GCPs*) bem distinguíveis na imagem (linha e coluna), e a transposição deles para suas verdadeiras posições em relação a coordenadas geográficas (latitude e longitude). As coordenadas geográficas devem ser coletadas e sua exatidão varia em função do tamanho do pixel e da acurácia da imagem desejada. Para imagens de alta resolução, visando atingir-se a melhor acurácia possível, devem-se coletar as coordenadas com receptores GPS topográficos ou geodésicos. Já em imagens com pixels maiores de média e baixa resolução espacial, pode-se utilizar mapas com escalas correspondentes ao tipo de trabalho desejado para a coleta das coordenadas dos pontos de controle. Deve-se, no entanto, atentar para a compatibilidade entre o tamanho do pixel, a escala do mapa e a escala desejada na imagem corrigida.

Conforme a CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (2005), uma vez que vários pontos de controle bem distribuídos forem identificados, as correções geométricas são procedidas através de polinômios estabelecidos em função dos parâmetros de transformação entre as coordenadas de origem e as coordenadas de destino. A Figura 22 representa a correlação entre sistemas de coordenadas de origem e de destino.

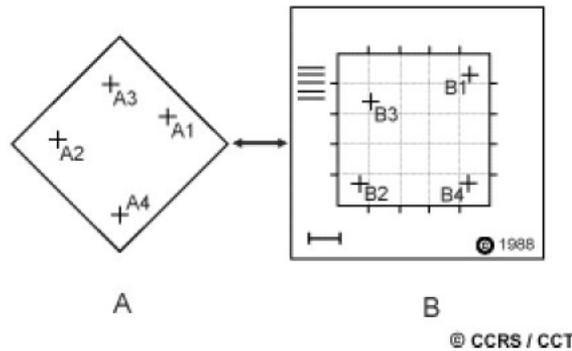


FIGURA 22 – PROCESSO CORREÇÃO GEOMÉTRICA BASEADA EM PONTOS DE CONTROLE  
 FONTE: CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (2005)

### 2.13.3. Utilização de Equações Polinomiais Associadas aos Pontos de Controle

Neste procedimento, é necessário definir-se dois sistemas de coordenadas cartesianas. Um dos sistemas descreve a localização dos pontos em um mapa que represente a área imageada (x, y) e que é geometricamente correto e o outro sistema de coordenadas define a localização dos pixels na imagem (u, v). Então se assume que os dois sistemas de coordenadas se relacionam através de um par de funções de mapeamento f e g:

$$u = f(x, y) \quad (1a)$$

$$v = g(x, y) \quad (1b)$$

Dadas as funções de mapeamento, os parâmetros, que ainda não são conhecidos, são estabelecidos genericamente como simples polinômios de primeiro, segundo ou terceiro grau:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (2a)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (2b)$$

Os coeficientes  $a_i$  e  $b_i$  são desconhecidos. Os valores podem ser estimados identificando-se feições no mapa ou no terreno reconhecíveis na imagem, que são os pontos de controle de solo. Após a escolha desses pontos, os coeficientes polinomiais podem ser estimados, através da inserção das coordenadas dos pontos de controle nas equações. Para aplicação deste método polinomial, há necessidade de redundância nas observações, ou seja, um número de pontos observados superior ao número de parâmetros das equações. Assim, por exemplo, um número mínimo de 3 observações é necessário para um polinômio de primeira ordem. Na prática, entretanto, um número superior à quantidade de pontos de controle necessários é utilizado e os coeficientes são avaliados utilizando-se o método dos mínimos quadrados. Dessa forma, qualquer ponto de controle que contenha erros significativos de localização no mapa ou na imagem não terá influência nos coeficientes polinomiais.

#### 2.13.4. Método dos Mínimos Quadrados

O princípio utilizado pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) determina que os parâmetros de conversão entre sistemas de referência são aqueles cuja soma dos quadrados dos resíduos é mínima. A distribuição e o valor dos resíduos indicam se houve erro na coleta das coordenadas ou no processamento e também indica qual das coordenadas está mais propensa a estar causando erros. Após a exclusão da coordenada que possivelmente esteja errada, analisa-se novamente o gráfico de dispersão dos resíduos até que os vetores estejam distribuídos homoganeamente, sem tenderem mais para um determinado quadrante do gráfico.

Segundo GEMAEL (1994), uma das formas de aplicação do Método dos Mínimos Quadrados é o método paramétrico. No referido método, as observações podem ser descritas em função dos parâmetros, na forma explícita, conforme descrito no item 2.15.2.

GEMAEL (1994) adotou a seguinte notação para o método paramétrico:

Dado o polinômio

$$X_n = ax_n + by_n + Cx \quad (3)$$

$$Y_n = cx_n + dy_n + Cy \quad (4)$$

Estabelece-se que:

$$L_a = F(X)_a \quad (5)$$

Onde  $L_a$  é o vetor das observações ajustadas e  $X_a$  é o vetor dos parâmetros ajustados.

Dado que:

$$L_a = L_b + V \quad (6)$$

Sendo  $L_b$  o vetor das observações e  $V$  o vetor dos resíduos. O vetor dos parâmetros ajustados é composto pela soma do vetor dos parâmetros aproximados ( $X_0$ ) com o vetor das correções aos parâmetros ( $X$ ), ou seja:

$$X_a = X_0 + X \quad (7)$$

Pode-se estabelecer que o vetor das correções aos parâmetros seja dado por:

$$X = - (A^t P A)^{-1} A^t P L \quad (8)$$

Onde  $P$  é a Matriz Peso.

Define-se  $A$  como sendo a Matriz Jacobiana, ou Matriz dos Coeficientes, dada por:

$$A = \begin{matrix} & & \begin{matrix} a & b & c & d & Cx & Cy \end{matrix} \\ \begin{matrix} X1 \\ Y1 \\ X2 \\ Y2 \\ X3 \\ Y3 \\ X4 \\ Y4 \\ X5 \\ Y5 \\ Xn \\ Yn \end{matrix} & \left| \begin{matrix} \delta X_1 / \delta a & \delta X_1 / \delta b & \delta X_1 / \delta c & \delta X_1 / \delta d & \delta X_1 / \delta Cx & \delta X_1 / \delta Cy \\ \delta Y_1 / \delta a & \delta Y_1 / \delta b & \delta Y_1 / \delta c & \delta Y_1 / \delta d & \delta Y_1 / \delta Cx & \delta Y_1 / \delta Cy \\ \delta X_2 / \delta a & \delta X_2 / \delta b & \delta X_2 / \delta c & \delta X_2 / \delta d & \delta X_2 / \delta Cx & \delta X_2 / \delta Cy \\ \delta Y_2 / \delta a & \delta Y_2 / \delta b & \delta Y_2 / \delta c & \delta Y_2 / \delta d & \delta Y_2 / \delta Cx & \delta Y_2 / \delta Cy \\ \delta X_3 / \delta a & \delta X_3 / \delta b & \delta X_3 / \delta c & \delta X_3 / \delta d & \delta X_3 / \delta Cx & \delta X_3 / \delta Cy \\ \delta Y_3 / \delta a & \delta Y_3 / \delta b & \delta Y_3 / \delta c & \delta Y_3 / \delta d & \delta Y_3 / \delta Cx & \delta Y_3 / \delta Cy \\ \delta X_4 / \delta a & \delta X_4 / \delta b & \delta X_4 / \delta c & \delta X_4 / \delta d & \delta X_4 / \delta Cx & \delta X_4 / \delta Cy \\ \delta Y_4 / \delta a & \delta Y_4 / \delta b & \delta Y_4 / \delta c & \delta Y_4 / \delta d & \delta Y_4 / \delta Cx & \delta Y_4 / \delta Cy \\ \delta X_5 / \delta a & \delta X_5 / \delta b & \delta X_5 / \delta c & \delta X_5 / \delta d & \delta X_5 / \delta Cx & \delta X_5 / \delta Cy \\ \delta Y_5 / \delta a & \delta Y_5 / \delta b & \delta Y_5 / \delta c & \delta Y_5 / \delta d & \delta Y_5 / \delta Cx & \delta Y_5 / \delta Cy \\ \delta X_n / \delta a & \delta X_n / \delta b & \delta X_n / \delta c & \delta X_n / \delta d & \delta X_n / \delta Cx & \delta X_n / \delta Cy \\ \delta Y_n / \delta a & \delta Y_n / \delta b & \delta Y_n / \delta c & \delta Y_n / \delta d & \delta Y_n / \delta Cx & \delta Y_n / \delta Cy \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

Sendo:

$$L = L_0 - L_b \quad (7)$$

E finalmente,

$$L_0 = F(X_0) \quad (8)$$

Assim, estabelece-se os parâmetros de transformação das equações 3 e 4 apresentadas no início deste item.

#### 2.13.5. Georreferenciamento:

Conforme CELESTINO (2007), o georreferenciamento é uma correção geométrica que integra o sensoriamento remoto com as ciências geodésicas e as tecnologias da geoinformação para transformar um sistema raster (linhas, colunas) para um sistema raster (referenciado a Terra - coordenadas E, N). Neste sentido, é necessário o conhecimento da relação matemática existente entre a imagem e o terreno. Essa relação é dada através de parâmetros de transformação que podem ser determinados por meio de pontos de controle. Nesse sentido, pode-se afirmar que o georreferenciamento é a etapa do processo de correções geométricas através do qual se estabelece um sistema de coordenadas referenciado a Terra, sendo realizado pelos processos de correções geométricas, descritos nos itens anteriores.

#### 2.13.6. Redistribuição

De acordo com RICHARDS & JIA (2006), após determinar os polinômios estabelecidos pelo uso de pontos de apoio no solo, o próximo passo é encontrar os pontos na imagem que correspondem a cada localização na tabela de pixels previamente definidos sobre o sistema de referência. O espaçamento desta grade de pixels é escolhido de acordo com o tamanho do pixel correspondente na imagem corrigida. Neste caso, supõe-se que os pontos locados na imagem correspondem exatamente aos pixels centrais. Assim, esses pixels são transferidos para os locais apropriados na nova grade de pixels para constituírem a imagem retificada.

#### 2.13.7. Interpoladores

RICHARDS & JIA (2006) afirmam que os centros das tabelas de pixels de uma imagem registrada, normalmente não coincidirão exatamente com os pixels centrais da

imagem original e algumas decisões devem ser adotadas sobre qual valor de brilho de pixel deve ser escolhido para ser posicionado na nova planilha. Há três técnicas de interpolação que são utilizadas nestes casos, sendo elas o Método do Vizinho Mais Próximo, Bilinear e Convoluções Cúbicas.

#### 2.13.8. Ortorretificação

Conforme D'ALGE (2006), orrorretificação é um processo de correção geométrica baseada em modelo fotogramétrico e em modelo de elevação do terreno. Segundo ZANARDI (2006), o processo de orrorretificação é responsável por transformar imagens com perspectiva central (com os raios de luz dos diferentes pontos imageados, passando por um só ponto: o centro de perspectiva) em imagens em perspectiva ortogonal (com os raios ortogonais projetados a partir da região imageada). É através desse processo que a distorção radial e os efeitos relativos ao relevo na região imageada são eliminados.

Conforme SILVA (2007), a melhor e mais eficiente maneira de se orrorretificar uma imagem de satélite é incluir um Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT) no processo de correção geométrica. As operadoras dos satélites oferecem esta possibilidade, mas o custo do processo é elevado, dificultando a aquisição deste tipo de produto. Além disso, a qualidade final da imagem depende da qualidade do MDT e dos pontos de controle, que na grande maioria dos casos, devem ser fornecidos pelo cliente (comprador da imagem). Os operadores dos satélites fornecem junto com as imagens, parâmetros que permitem a orrorretificação pelo próprio cliente. Ao invés de abrir o modelo de geometria do sensor e fornecer os parâmetros orbitais (efemérides e atitude), os operadores fornecem coeficientes de polinômios racionais (RPC – *Rational Polynomial Coefficients*).

SILVA (2007), descreve o modelo de orrorretificação por polinômios racionais, definindo que o mesmo representa o mapeamento inverso no processo de correção geométrica de imagens de satélite. Este modelo relaciona cada ponto da imagem orrorretificada com um ponto da imagem geometricamente corrigida, por meio dos RPC's.

### 2.13.9. Definição do número de pontos de controle necessários

ROCHA (2002) estabeleceu, baseado em PEREIRA (1978), através de equação estatística, critérios para o cálculo de número de pontos de controle necessários para o georreferenciamento de imagens de satélite, levando –se em consideração o tamanho do pixel, o tamanho da área imageada, erro amostral e intervalo de confiança (distribuição normal). Através dessa equação, ROCHA (2002) estabeleceu que o erro amostral é o erro máximo que pode ser aceito quando é utilizada uma média amostral ao invés de média populacional.

$$n := \frac{(Z^2 \cdot \gamma^2 \cdot N)}{\left[ (N - 1) \cdot (\text{er})^2 + (Z^2 \cdot \gamma^2) \right]}$$

$$\text{er} := \frac{\varepsilon}{\mu}$$

$$\gamma := \frac{\sigma}{\mu}$$

Onde:

n = tamanho da amostra (número de pontos de controle necessários)

N = tamanho da população (número de pixels na imagem)

er = erro amostral relativo

$\sigma$  = desvio padrão amostral em metros

$\mu$  = media amostral

Z = intervalo de confiança da tabela de Distribuição Normal

$\gamma$  = Relação entre o desvio padrão e a media amostral

Assim, estabelece-se normalmente, intervalos de confiança de 90% ou 95%, erros amostrais entre 10% e 15% e relação entre o desvio padrão e a média amostral de 1/3.

## 2.14. MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) são representações de informações específicas que acompanham os dados sobre localização da informação representada. Segundo a definição de Rocha (2000), um Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional da ocorrência de um determinado fenômeno espacialmente distribuído numa região limitada da superfície terrestre.

Podem ser utilizados para demonstração de eventos, como ocorrências de dados climatológicos ou informações sobre elevação do terreno. No caso dos dados de elevação, esses modelos chamam-se também Modelos Digitais de Elevação do Terreno (MDET). Segundo BURROUGH (1986), dentre as diversas utilidades para os Modelos Digitais de Elevação do Terreno, está o processo de ortorretificação de imagens.

A aquisição dos dados para a elaboração do Modelo Digital de Elevação do Terreno, pode ser pelos seguintes métodos:

- levantamentos de campo;
- digitalização de mapas;
- medidas fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos; e
- dados altimétricos adquiridos de GPS, aviões, satélites e radares.

Na maioria dos casos, os aeroportos estão localizados em regiões planas. A maioria dos processos citados acima envolve tempo e recursos econômicos para aquisição. Sendo assim, neste trabalho serão utilizados os dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) como Modelo Digital de Elevação do Terreno.

### 2.14.1.SRTM

Conforme consta no Sítio de Internet da NASA/SRTM, o SRTM é uma missão espacial liderada pela NASA, em parceria com as agencias espaciais da Alemanha (DLR) e Itália (ASI). O sensor utilizado foi um radar (SAR) a bordo de um ônibus espacial, representado pela Figura 23, que adquiriu dados sobre mais de 80% da superfície terrestre,

nas bandas C e X, fazendo uso da técnica de interferometria. Nesta técnica, a altitude de pontos no terreno é obtida através da medição da diferença de fase entre duas imagens radar sobre um mesmo local na Terra.

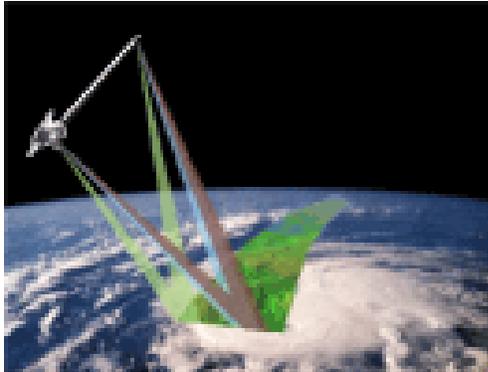


FIGURA 23 – SRTM – FONTE: NASA

Os dados, adquiridos com resolução de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 metros no equador), foram processados para a geração de MDTs da área coberta. Os modelos relativos à banda C são distribuídos gratuitamente pela NASA para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 metros.

O uso da Interferometria destaca positivamente o SRTM, pois esta técnica, possui maior acurácia em relação à técnica da estereoscopia.

Segundo o Sítio de Internet do SRTM – NASA, o erro vertical estimado antes do início da missão seria de 16 m. Conforme Reis (2005), alguns trabalhos indicam que podem ser atingidas precisões melhores do que as estimadas antes do início da missão, algumas, por exemplo, estimam em até 6 metros o erro vertical. Para atingir tais metas, os dados devem ser processados a fim de se eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes a áreas de sombra ao sinal.

## 2.15. EXATIDÃO, ACURÁCIA E PRECISÃO

Os termos exatidão e acurácia são sinônimos, e referem-se ao quanto uma determinada informação aproxima-se do valor dado como correto. Já a precisão refere-se

ao grau de dispersão dos valores de uma mesma medida. Assim, pode-se ter um alto grau de precisão, porém, baixa acurácia, ou exatidão.

Um alvo é uma boa forma de se exemplificar os conceitos aqui abordados, conforme a Figura 24:

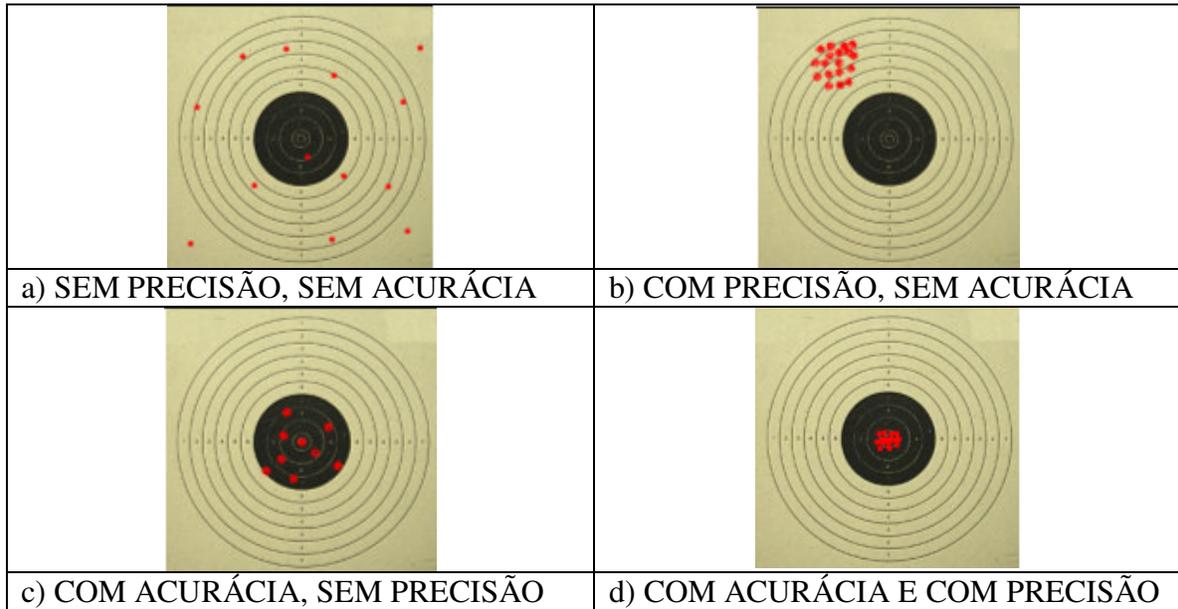


FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DE ACURÁCIA E PRECISÃO

Conforme CAMARGO (2000), acurácia refere-se ao grau de aproximação de uma estimativa do seu valor considerado verdadeiro e está vinculado aos efeitos aleatórios e sistemáticos. A precisão expressa o grau de proximidade da observação com sua média, vinculando-se apenas aos efeitos aleatórios.

## 2.16. SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA

GEMAEL (1987), aborda três superfícies fundamentais para o entendimento do que é um sistema geodésico de referência, representadas na Figura 26. A Superfície física da terra, ao longo da qual são realizadas as medidas topográficas. A superfície do modelo geométrico, por vezes denominada superfície de referência, sobre a qual são efetuados os

cálculos geodésicos, que na grande maioria das vezes é o elipsóide de revolução. E o Geóide, que é uma superfície equipotencial do campo da gravidade, especificamente, aquele que mais se aproxima do “nível médio dos oceanos”. A Figura 25 representa o GEÓIDE determinado a partir de dados da missão GOCE.

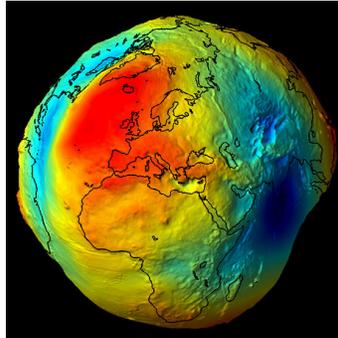


FIGURA 25 – GEOIDE - FONTE: AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA 2010

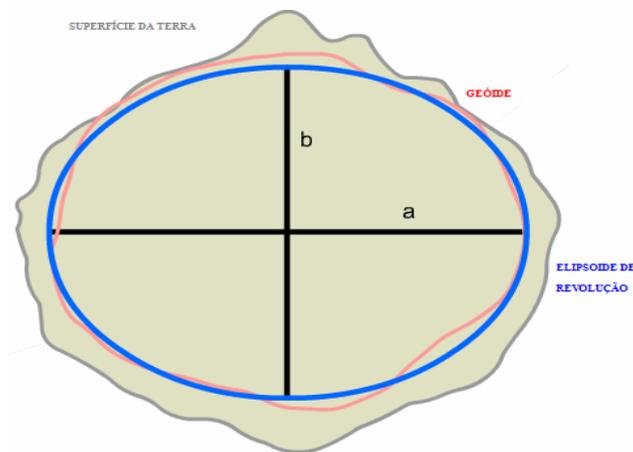


FIGURA 26 – SUPERFÍCIE DA TERRA, GEÓIDE E ELIPSÓIDE  
FONTE: SÍTIO DE INTERNET DO IBGE - 2010

A humanidade passou por diversas fases tentando determinar as formas e dimensões da Terra. O Geóide, em função de suas deformações, não é reproduzido simplesmente em função de uma fórmula matemática. A fórmula matemática que mais aproxima-se das formas e dimensões da Terra é o Elipsóide de Revolução. Assim, estabeleceram-se diversos elipsóides, relacionados a países e regiões, com definições distintas, que naquelas regiões, o elipsóide aproxima-se do geóide. Cada país ou região,

padronizou seu sistema de coordenadas referido a um elipsóide, definindo assim, seu Sistema Geodésico de Referência.

Além do elipsóide de revolução, os Sistemas Geodésicos de Referência materializam-se através de pontos que determinam a sua orientação, chamado DATUM. Quando este ponto localiza-se na superfície da Terra, os Sistemas Geodésicos de Referência são chamados Topocêntricos. Como exemplo, pode-se citar o SAD-69 (South American Datum 1969).

Os Sistemas Geodésicos de Referência modernos possuem sua orientação no centro de massa da Terra. Eles são comumente utilizados pelos Sistemas Globais de Navegação Por Satélite – GNSS (Global Navigation Satellite System). Como exemplo, pode-se citar o WGS84 e o SIRGAS 2000.

## 2.17. GPS

MONICO (2007) definiu que a concepção do GPS permite que um usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a esta, tenha à sua disposição no mínimo quatro satélites para serem rastreados. Esse número de satélites permite que se faça o posicionamento em tempo real. Para os usuários que desejam realizar levantamentos de precisão, uma vantagem importante dessa tecnologia em relação aos métodos de levantamentos convencionais é que não há necessidade de intervisibilidade entre as estações. Além disso, o GPS pode ser utilizado em quaisquer condições climáticas.

O princípio básico de funcionamento do GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário e quatro satélites. Conhecendo-se as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes.

Nesse caso, o problema se reduziria à solução de um sistema de três equações com três incógnitas. Assim, definem-se as pseudodistâncias, que são as equações de distâncias entre receptor do usuário e os satélites, sem a correção do não sincronismo

entre o relógio do satélite e o relógio do receptor do usuário. Assim, adiciona-se uma quarta incógnita ao problema.

O GPS foi declarado operacional em 27 de abril de 1985, com 24 satélites e em junho de 2007, havia 30 satélites.

#### 2.17.1. Características dos Sinais do GPS:

De acordo com MONICO (2007), atualmente cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras, chamadas L1 e L2. Elas são geradas na frequência fundamental de 10,23 MHz, a qual é multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Assim, as frequências (L) e os correspondentes comprimentos de onda são:

L1 = 1575,42 MHz e  $\lambda = 19$  cm;

L2 = 1227,60 MHz e  $\lambda = 24$  cm.

Essas duas frequências são geradas simultaneamente, permitindo aos usuários, corrigir grande parte dos efeitos provocados pela ionosfera.

O código C/A (Coarse Acquisition), com comprimento de onda por volta de 300 m, é transmitido em uma razão de 1,023 MHz. Ele é modulado apenas sobre a onda portadora L1. Esse é o código a partir do qual os usuários civis obtêm as medidas de distâncias que permitem obter acurácia. Ele não é criptografado, embora possa ter sua precisão degradada.

O código P (*Precise ou Protected* – Preciso ou Protegido) tem sido reservado para uso dos militares norte-americanos e usuários autorizados. Sua frequência de 10,23 MHz, 10 vezes maior que a do código C/A, faz que medidas resultantes do código P sejam mais precisas.

### 2.17.2. Erros envolvidos nas observáveis GPS:

Segundo MONICO (2007) as observáveis GPS estão sujeitas a erros sistemáticos, aleatórios e grosseiros, assim como todas as observáveis envolvidas nos processos de medidas. Para obter resultados confiáveis, deve-se desenvolver modelos matemáticos que representem a realidade física que se tenta descrever .

Erros sistemáticos podem ser parametrizados ou reduzidos, até mesmo eliminados por técnicas apropriadas de observação. Erros aleatórios, por sua vez, não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e são, em geral, as discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros grosseiros e sistemáticos forem eliminados. MONICO (2007) apresenta os diversos erros envolvidos no posicionamento pelo GPS de acordo com suas fontes, que são os satélites, a propagação do sinal, o receptor/antena e a própria estação, conforme demonstrado na Tabela 08.

FONTES:	ERROS
SATÉLITE	Erro da Órbita
	Erro do Relógio
	Relatividade
	Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite
	Centro de fase da antena do satélite
PROPAGAÇÃO DO SINAL	Fase <i>wind-up</i>
	Refração troposférica
	Refração ionosférica
	Perdas de ciclos
	Multicaminho ou sinais refletidos
RECEPTOR/ANTENA	Rotação da Terra
	Erro do relógio
	Erro entre os canais
	Centro de fase da antena do receptor
	Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor
ESTAÇÃO – (alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos).	Fase <i>wind-up</i>
	Erro nas coordenadas
	Multicaminho ou sinais refletidos
	Marés terrestres
	Movimento do polo
	Carga oceânica
	Pressão da atmosfera

TABELA 08 - FONTES DE ERROS ENVOLVIDOS NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS - FONTE: MONICO (2007)

O efeito combinado dos erros, quando projetado sobre a linha que liga o usuário e o satélite, é denominado Erro Equivalente de Distância (*UERE - User Equivalent Range Error*).

### 2.17.3. Métodos de Posicionamento

MONICO (2007) apresenta o termo posicionamento que está relacionado à determinação de posição de objetos com relação a um referencial específico. No caso do GPS, ou mesmo do GNSS, pode ser classificado em posicionamento absoluto, quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro, e relativo, quando as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas. O objeto pode estar em repouso ou em movimento, o que gera um complemento à classificação com respeito ao referencial adotado. No primeiro caso, trata-se de posicionamento estático, enquanto o segundo diz respeito ao posicionamento cinemático.

No posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação à de outros, cujas coordenadas são conhecidas. As coordenadas dos pontos conhecidos devem estar referenciadas ao WGS84, ou em um sistema compatível com esse (SIRGAS2000, ITRF2000, ITRF2005 ou IGS 05). Neste caso, os elementos que compõem a linha base (linha que liga a estação de referência à estação de interesse), ou seja,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ , são estimados e, ao serem acrescidos às coordenadas da estação-base ou de referência, proporcionam as coordenadas da estação desejada.

Segundo MONICO (2007), para realizar o posicionamento relativo, o usuário deve dispor de dois ou mais receptores. No entanto, com o advento dos chamados Sistemas de Controle Ativos (SCA), como é o exemplo da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC, que será apresentada com maiores detalhes mais adiante, essa realidade mudou. Dispondo de apenas um receptor ele poderá realizar o processamento relativo. Deverá, para tanto, acessar os dados de uma ou mais estações pertencentes ao SCA. Nesse caso, o sistema de referência do SCA será introduzido na solução do usuário via coordenadas das estações usadas como referência.

O Posicionamento Relativo pode ser estático, estático-rápido, semicinemático e cinemático. Os mesmos são realizados, adotando-se uma das seguintes observáveis observáveis originais:

- Pseudodistância;
- Fase da onda portadora; e
- Fase da onda portadora e pseudodistância.

O conceito fundamental do posicionamento relativo é que os dois ou mais receptores envolvidos rastreiem, simultaneamente, pelo menos dois satélites comuns. Segundo MONICO (2007), a observável normalmente adotada no posicionamento relativo estático é a diferença de fase de batimento da onda portadora, muito embora possa também se utilizar a diferença da pseudodistância, ou ambas. Nos casos em que se tem as duas observáveis os resultados são melhores em termos de acurácia. Nesse tipo de posicionamento, dois ou mais receptores rastreiam, simultaneamente, os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de dezenas de minutos (20 minutos no mínimo) até algumas horas. Os casos envolvendo períodos curtos de ocupação, até 20 minutos, são considerados como posicionamento estático rápido. O posicionamento relativo estático permite obter precisão da ordem de 1,0 a 0,1 ppm, ou mesmo melhor do que isso. No entanto, nas redes geodésicas em que as linhas-base envolvidas forem longas (maiores que 15 Km) e a precisão requerida for melhor que 1 ppm, é imprescindível o uso de receptores de dupla frequência (L1 e L2).

Como neste trabalho objetiva-se a máxima acurácia, será adotado este tipo de posicionamento, com ocupação mínima de 30 minutos em cada estação, tendo duas estações de referência, uma L1/L2, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e outra, com Receptor L1, instalado sobre Marco Geodésico estabelecido pelo ICA – Instituto de Cartografia Aeronáutica. Os dados dos Marcos Geodésicos implantados pelo ICA estão apresentados em lista de marcos geodésicos daquele Instituto no Aeroporto utilizado para estudo, constante do ANEXO.

#### 2.17.5. RINEX

Visando a interface entre os dados coletados por vários modelos e marcas de receptores, padronizou-se o modelo de arquivo RINEX (Receiver Independent Exchange

Format). Assim, utilizando-se qualquer receptor que colete, armazene e permita a extração de dados GPS registrados, deverá possibilitar a gravação desses dados no formato RINEX e assim, todos os softwares de processamento de dados GPS devem estar capacitados para interpretar esse tipo de arquivos.

De acordo com GURTNER (2007), a primeira proposta para o formato RINEX foi desenvolvida pelo Instituto de Astronomia da Universidade de Berne. O objetivo dessa proposta foi o fácil intercâmbio dos dados GPS a serem registrados durante a primeira grande campanha Européia de GPS – EUREF 89, que envolveu mais de 60 receptores GPS de 4 diferentes fabricantes.

#### 2.17.6. Ajustamento de Redes GPS

Segundo DA SILVA & MONICO (2007), o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) pode ser efetuado aplicando-se o método paramétrico, através do modelo das equações de observações, o método dos correlatos, através do modelo das equações de condição ou o método combinado. O método paramétrico é um dos métodos comumente utilizados para o ajustamento de redes GPS.

De posse das observações  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ , obtidas a partir do processamento das linhas de base, é realizado o ajustamento de redes GPS utilizando o método paramétrico. O modelo matemático para um levantamento de redes GPS é dado por:

$$\begin{aligned}\Delta X_{ij} &= X_j - X_i \\ \Delta Y_{ij} &= Y_j - Y_i \\ \Delta Z_{ij} &= Z_j - Z_i\end{aligned}$$

onde,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$  são as observações advindas do processamento GPS e  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , as incógnitas.

O modelo matemático das observáveis na forma linearizada pode ser escrito como (MONICO, 2007):

$$\begin{aligned}E\{L_b\} &= AX \\ D\{L\} &= \Sigma L_b\end{aligned}$$

onde:

$L_b$  – vetor das observações;

A – Matriz Jacobiana (formada pelas derivadas parciais das equações de observação em relação às incógnitas que são os parâmetros);

De forma complementar, aplica-se o modelo acima apresentado ao método paramétrico conforme GEMAEL (1994), sendo:

X – vetor parâmetros incógnitos;

D{L} – operador de dispersão;

$\Sigma L_b$  – a matriz variância-covariância (MVC) das observações.

O vetor dos parâmetros ajustados é representado por:

$$X_a = (A^T P A)^{-1} (A^T P L_b)$$

#### 2.17.6 RBMC

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, estabelecida e mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística é composta por receptores de dupla frequência (L1/L2) que realizam rastreamento contínuo sobre marcos geodésicos de coordenadas bem definidas. Conforme o IBGE, em seu Sítio de Internet, antes da RBMC, o usuário interessado em obter, com GPS, as coordenadas geodésicas de um ponto qualquer em território nacional era obrigado a trabalhar com dois receptores, ocupando o ponto de seu interesse e um marco do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) próximo.

As estações da RBMC desempenham justamente o papel do ponto de coordenadas conhecidas, eliminando a necessidade de o usuário imobilizar um receptor em um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso. Além disso, os receptores que equipam as estações da RBMC são de alto desempenho, proporcionando observações de grande qualidade e confiabilidade. A Figura 27 ilustra a distribuição das estações da RBMC no território brasileiro.

Para obter-se os dados da RBMC, que são o memorial descritivo de cada estação e os arquivos RINEX referentes ao(s) dia(s) escolhido(s), basta acessar cadastrar-se no

Sítio de Internet do IBGE, através do seguinte endereço:  
[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/download/tela\\_inicial.php?tipo=8](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/download/tela_inicial.php?tipo=8).

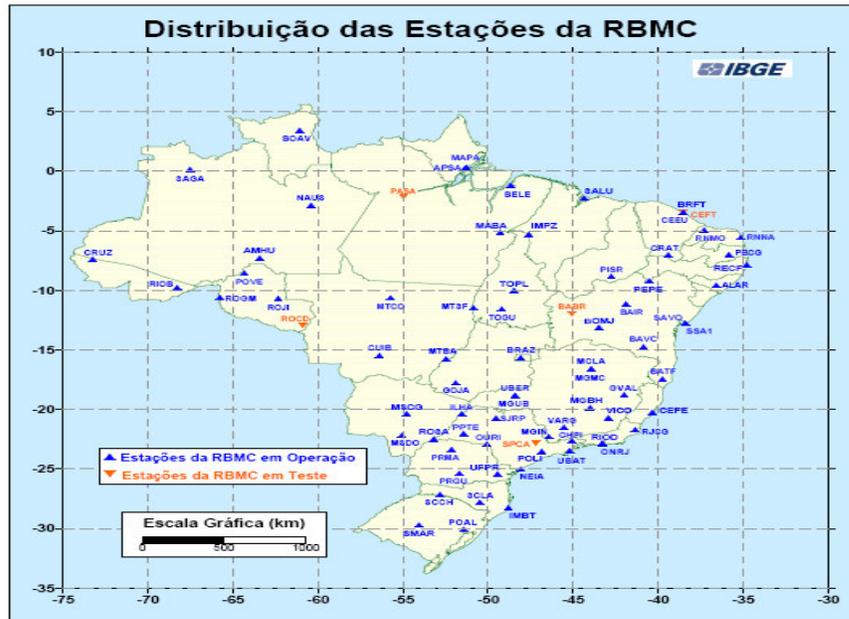


FIGURA 27 – DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES RBMC NO BRASIL

FONTE: IBGE (2010)

## 2.18. SIG – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

MEIRA ET AL (2001) apresentam os processos de concepção e desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas criado para apoiar o processo de fiscalização de obras civis nas proximidades da área reservada ao aeroporto da cidade de Cachoeiro de Itapemirim no Estado do Espírito Santo (Brasil). Conforme os autores, foram utilizadas técnicas de posicionamento global por satélite (GPS), sensoriamento remoto e SIG (Sistema de Informações Geográficas) para levantamento e tratamento das bases de dados digitais (mapeamento urbano básico, uso do solo, relevo e áreas verdes, por exemplo). O sistema desenvolvido apresentou como resultado uma avaliação da intervenção (obra civil) em função das exigências da Portaria No. 1.141/GM5 de 8 de dezembro de 1987 que dispõe sobre os Planos Básicos de Zona de Proteção de

Aeródromos e de Zoneamento de Ruído. As atividades foram desenvolvidas em conjunto pela Fundação Arthur Bernardes (Universidade Federal de Viçosa) e a Prefeitura Municipal (Departamento de Fiscalização) no contexto do projeto Geomunicipal (Geoprocessamento aplicado aos Planos Municipais de Gestão Integrada).

O referido artigo indica o uso de SIG para o gerenciamento de Zonas de Proteção de Aeródromo, não aprofundando, no entanto, todos os conceitos dessas zonas aqui abordados. Por vezes há confusão com relação ao termo “Área de Segurança Aeroportuária” com Zona de Proteção de Aeródromo. A expressão “Área de Segurança Aeroportuária – ASA” é estritamente associada ao raio de 20 Km em torno de aeroportos que possuem operações por instrumentos, ou 13 Km em torno de aeroportos que possuem apenas operação por regras de vôo visuais. Nestas áreas, de acordo com BRASIL, RESOLUÇÃO No. 4 (1995), não pode haver qualquer tipo de implantação que seja foco atrativo de pássaro. Apesar disso, este artigo pode ser considerado uma referência para a demonstração da potencialidade do uso dos Sistemas de Informações Geográficas para a gestão de atividades aeroportuárias.

CÂMARA & QUEIROZ (2001) definem que o termo *Sistemas de Informação Geográfica* (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial; oferecem ao administrador (urbanista, planejador, engenheiro) uma visão inédita de seu ambiente de trabalho, em que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão ao seu alcance, interrelacionadas com base no que é fundamentalmente comum – a localização geográfica. Para que isto seja possível, a geometria e os atributos dos dados num SIG devem estar *georreferenciados*, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica.

MOURA (2003) define que um SIG completo deve ser capaz de trabalhar com relações topológicas, ou seja, com estruturas geométricas que manipulam relações como vizinhança, conexão e pertinência. Pode-se resumir topologia como uma “inteligência gráfica” associada ao sistema. Esta autora, em 1993 observa que há uma grande difusão do SIG na produção de inventários e apoio à prática do planejamento, uma vez que ele permite a definição física e a análise quantitativa dos componentes sócio-econômicos,

além de análises qualitativas, atribuindo pesos às características identificadas dentro de uma escala de valores estabelecida. Tem-se tornado o principal instrumento de planejamento urbano por possibilitar um retrato mais fiel de sua complexidade e permitir a integração de análises por disciplinas diversas.

Conforme CÂMARA & QUEIROZ (2001) Há pelo menos três grandes maneiras de utilizar um SIG:

- como ferramenta para produção de mapas;
- como suporte para análise espacial de fenômenos;
- como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Os SIG's, ao trabalharem com relações espaciais ou lógicas, tendem a evoluir do descritivo para o prognóstico. Em lugar de simplesmente descrever elementos ou fatos, podem traçar cenários, simulações de fenômenos, com base em tendências observadas ou julgamentos de condições estabelecidas (MOURA 2003).

A associação de informações técnicas, temáticas e cadastrais, integradas a bases cartográficas, imagens de satélite e/ou dados de vôos fotogramétricos, agregados a tabelas de atributos e bancos de dados geográficos, possibilitam análises avançadas, que tornam os Sistemas de Informações Geográficas poderosas ferramentas de apoio à decisão. Atualmente diversos setores da sociedade fazem uso dos SIG para obterem um planejamento eficiente, como, por exemplo, algumas Prefeituras, que utilizam os SIG desde a atualização de informações para a cobrança do IPTU até as decisões que definirão a localização de novas escolas, postos de saúde, linhas de ônibus e pavimentação de vias.

Os Sistemas de Informações Geográficas fazem parte do dia-a-dia da sociedade. As bases de dados de GPS de navegação utilizados em veículos, que trazem informações verbais sobre os caminhos a serem seguidos para chegar-se de um lugar a outro são fundamentadas em Sistemas de Informações Geográficas, onde estão inseridas diversas informações temáticas, como nomes de ruas, sentidos permitidos e proibidos, localização de bares, restaurantes, escolas, cinemas e outras informações diversas que possam ser de interesse dos usuários desses equipamentos veiculares.



Atualmente o Aeroporto Internacional Salgado Filho passa por diversos desafios no sentido de continuar acompanhando a evolução da aviação e o desenvolvimento sócio-econômico do país. Conforme listado no Anexo D de BRASIL (2005), há diversos obstáculos acima dos gabaritos da faixa de pista, áreas de aproximação, decolagem, áreas de transição, áreas internas e áreas horizontais do Aeroporto, refletindo o crescimento urbano rápido e desordenado no município. Outra situação peculiar é o planejamento de ampliação da pista, que atualmente possui 2.280 m para 3.200 m e que envolverá uma ação conjunta entre Governo Federal, Governo Estadual e Município, para a remoção de famílias e indenização de proprietários de terrenos regularizados situados nas áreas necessárias às obras de ampliação. O aumento do comprimento da pista visa proporcionar à região servida pelo Aeroporto, uma pista com a possibilidade de importar e exportar cargas de Porto Alegre diretamente para mercados até então não atingidos por via aérea, como, por exemplo, países da África e Europa. Para ilustrar o crescimento urbano ocorrido no entorno do Aeroporto de Porto Alegre, pode-se observar uma fotografia da década de 50 (Figura 29), comparada a outra, do ano de 2009 (Figura 30).



FIGURA 29 – DÉCADA DE 50

Fonte: Acervo INFRAERO – Aeroporto Internacional Salgado Filho



FIGURA 30 – ANO DE 2009

Fonte: Google Earth

Em função de o Aeroporto Internacional Salgado Filho possuir Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo, uma situação complexa gerada por um grande número de obstáculos em seu entorno e também em função do planejamento de ampliação da Pista e suas conseqüências, selecionou-se o referido aeroporto como área de estudo. Outro aspecto favorável à escolha da área de estudo foi a proximidade em relação ao CEPSRM, o que permitiu, inclusive o uso de softwares e equipamentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para o desenvolvimento dos trabalhos.

## 4. MATERIAIS E METODOS

Para o desenvolvimento da metodologia descrita no item 4.2 foram utilizados equipamentos e softwares. Através dos mesmos foram associados trabalhos de campo a processamentos e análises em laboratório.

### 4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados um par de imagens de satélite de alta resolução, 02 (dois) GPS L1 e respectivos acessórios, softwares de processamento de dados GPS, ajustamento de redes, processamento digital de imagens, cartografia digital e de elaboração de Sistemas de Informações Geográficas, além de um notebook para integração e processamento dos dados e veículo para deslocamento entre os locais selecionados como pontos de controle. Os materiais utilizados estão listados detalhadamente abaixo:

- a) 01 (uma) Imagem de Satélite IKONOS II, do ano de 2001;
- b) 01 (uma) Imagem de Satélite IKONOS II, datada de 05 de junho de 2008;
- c) 01 (um) Notebook dual core, com 2 GB de memória RAM e 120 GB de HD;
- d) Aplicativo RSI ENVI;
- e) Aplicativo Autocad Map;
- f) Aplicativo ESRI – Arc GIS;
- g) Aplicativo GPSURVAY;
- h) Aplicativo AJURGPS;
- i) 01 (um) Par de receptores GPS L1 – ASTECH com antena;
- j) 01 (um) Tripé;
- k) 01 (uma) Base nivelante para tripé;
- l) 01 (um) Bipé com haste metálica;
- m) 01 (uma) Trena;
- n) 01 (uma) Máquina fotográfica;
- o) 01 (um) Automóvel.

## 4.2. METODOLOGIA

A execução do trabalho seguiu a seqüência de eventos relacionada na Figura 31. A referida figura é um fluxograma que visa a representação simplificada de uma série de passos fundamentais para a correta aplicação das técnicas aqui abordadas. A seqüência de atividades apresenta a definição dos critérios para a seleção da área da imagem a ser adquirida, descrição de requisitos através de uma especificação técnica, o processo de aquisição da imagem em bandas espectrais separadas, análise , seleção e coleta de coordenadas de pontos de apoio de campo, o processo de correções geométricas, através do qual realiza-se o georreferenciamento e a ortorrefiticação, a análise de qualidade geométrica da imagem, visando o seu uso como ferramenta de precisão, até a elaboração e inserção de informações temáticas que serão utilizadas para a elaboração de produtos cartográficos:

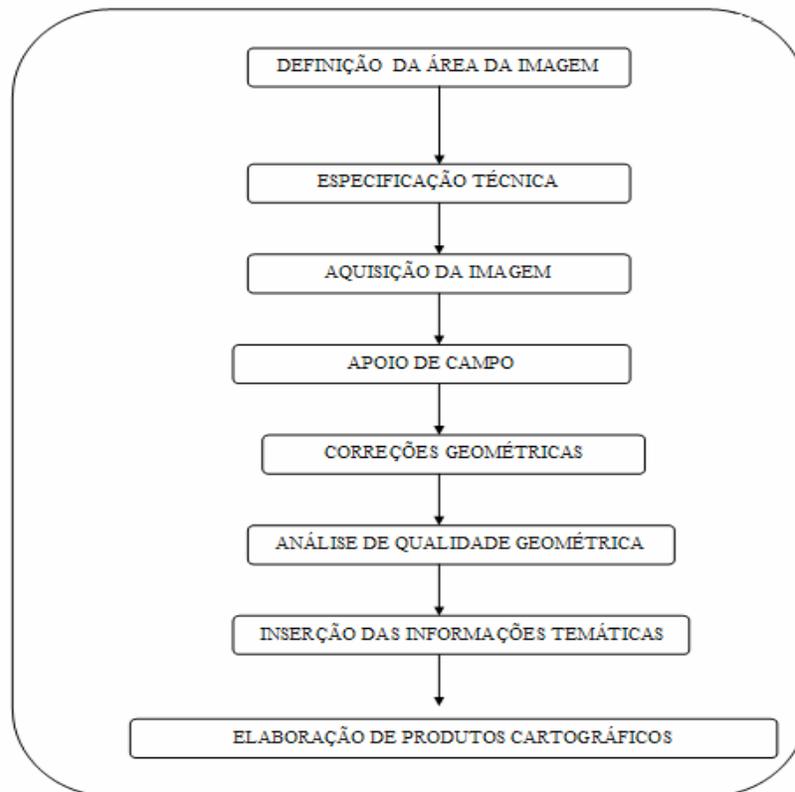


FIGURA 31 – SEQUENCIA DE PROCESSOS

#### 4.2.1. Definição da área da imagem:

Após a definição do Aeroporto Salgado Filho como o local para o desenvolvimento deste trabalho seguiu-se a definição do tamanho da imagem a ser adquirida. Levando-se em consideração que este trabalho tem por objetivo gerar uma ferramenta de baixo custo de investimento e de fácil e ágil aplicação para a utilização de imagens de alta resolução no gerenciamento de zonas de proteção de aeródromos, definiu-se a abrangência da área de estudo em função do critério das necessidades operacionais e que ao mesmo tempo não represente desperdício de recursos. Essa preocupação está presente, tendo em vista que o valor de uma imagem de satélite de alta resolução varia conforme a área da mesma.

A definição da área, que está representada pela Figura 32, levou em consideração a distância em que em média os aviões já iniciaram sua preparação para o pouso, reduzindo suas velocidades e conseqüentemente diminuindo a sustentação e aproximam-se da superfície decidindo ou não por dar prosseguimento ao procedimento de descida ao atingirem o último trecho de suas trajetórias de descida, chamado MAPT (Missed Approach Point). Conseqüentemente nestas situações, os aviões estão mais sujeitos aos riscos causados por obstáculos. Já os aviões em Regras de Vôo Visual devem executar uma trajetória paralela à pista, chamada “perna do vento”, na qual não há auxílio de qualquer procedimento para sua separação em relação a obstáculos. Sendo assim, estabeleceu-se as dimensões de 2 (duas) Milhas Náuticas em afastamento transversal ao eixo da pista e 2 (duas) Milhas Náuticas em afastamento longitudinal, a partir de cada cabeceira. Uma Milha Náutica equivale a 1.852 m. Dessa forma, foi estabelecido o parâmetro da área crítica do Plano de Zona de Proteção de Aeródromo. No caso da área em estudo, foi considerada a futura cabeceira da pista, após a sua ampliação de 920 m, prevista para iniciar-se em 2011.

É importante registrar que, apesar de haver uma área crítica, todas as limitações impostas pelos planos de zona de proteção de aeródromos devem ser respeitadas. A área selecionada compreende a faixa de pista, áreas de aproximação, transição e áreas

horizontais do Plano Específico de Zona de Proteção do Aeroporto Internacional Salgado Filho.



FIGURA 32 – ÁREA SELECIONADA

#### 4.2.2. Especificação Técnica e Aquisição da Imagem:

Devido ao fato de a Empresa que administra os 67 principais aeroportos brasileiros ser pública, seus processos de compras e aquisições são regidos pela Lei 8.666/1993 e rigorosamente fiscalizados pelo Tribunal de Contas da União (TCU). Pelo que estabelece a referida lei, será considerado habilitado a fornecer determinado material ou prestar determinado serviço, entre outros critérios, aquele que atender aos requisitos especificados pelo contratante apresentando a proposta de menor preço. Daí a fundamental importância da riqueza de detalhes no momento de se elaborar uma especificação técnica.

Para a definição da modalidade de compra, foram solicitados três orçamentos, e verificando-se que o valor da compra não atingiria o montante que exigisse a execução de licitação. Procedeu-se a compra pela modalidade de Dispensa de Licitação, com base nos três orçamentos.

Dentre os principais itens constantes da especificação técnica, destaca-se:

Área abrangida pela imagem: Área de 78,4 Km<sup>2</sup>, delimitada pelo polígono formado pelos quatro vértices abaixo especificados, em coordenadas geográficas, no Sistema Geodésico de Referência WGS84:

- 1) 29° 57' 27,11193"S 51° 13' 09,72172"W
- 2) 29° 57' 34,41066"S 51° 07' 04,17690"W
- 3) 30° 01' 46,94894"S 51° 13' 16,67477"W
- 4) 30° 01' 54,25388"S 51° 07' 10,86557"W

Características exigidas para o fornecimento da imagem:

##### A) Tamanho máximo de pixel:

Em função da disponibilidade de diversos satélites que fornecem imagens com pixels de tamanho inferior a um metro, como IKONOS (1 m), QUICK BIRD (61 cm), World View (50 cm) e visando a melhor qualidade geométrica na imagem, estabeleceu-se o limite máximo de tamanho de pixel em 1 m. Deve-se considerar que a resolução espacial (tamanho de pixel) não deve ser o único fator a ser

considerado, sendo que os critérios relacionados abaixo têm fundamental importância para a qualidade da imagem.

B) Resolução radiométrica mínima:

8 Bits – A resolução radiométrica é um dos aspectos que define a quantidade de informações que uma imagem de satélite possui. Quanto maior o número de bits, maior será a riqueza de detalhes e facilidade de coleta de informações. Atualmente os satélites comerciais de alta resolução disponibilizam imagens de 8 e 11 bits, sendo que 8 bits representam 256 níveis de cinza, o que influencia diretamente no nível de detalhamento das imagens. À medida em que se diminui o número de bits, diminui-se também o nível de detalhamento e dessa forma, limitou-se ao mínimo de 8 bits.

C) Bandas espectrais:

Multiespectrais e pancromática, separadas - A função primária da cartografia é comunicar, fazer com que o usuário de determinado produto cartográfico consiga, com facilidade, compreender aquilo que se deseja informar. Dessa forma, uma imagem colorida torna-se mais atraente e conseqüentemente mais comunicativa que uma imagem monocromática. A definição das bandas espectrais separadas, possibilita, através de diferentes composições em aplicativos de processamento digital de imagens, destacar determinadas feições no terreno, o que pode ser uma grande ferramenta, por exemplo, para análises ambientais, como, por exemplo, a identificação de implantações que sejam focos atrativos de pássaros, como determinados tipos de culturas agrícolas, lixões, curtumes, etc.

D) Cobertura de nuvens

Até 5% - As nuvens refletem boa parte da radiação eletromagnética que incide sobre elas, o que impede a identificação dos alvos abaixo delas. Dessa forma, para um trabalho que envolve gerenciamento de informações, muitas delas identificadas visualmente sobre as imagens, a situação ideal é a ausência total de nuvens, porém, não é possível prever se no momento da passagem dos sensores haverá ou não nuvens sobre a área de interesse. Os operadores de alguns sensores delimitam para até 20% cobertura de nuvens o critério para a comercialização das

imagens de alta resolução. Visando a aquisição de imagens de alta resolução de tal forma que o sítio aeroportuário não seja prejudicado e que pelo menos 95% do total da imagem seja preservado de obstruções à identificação dos obstáculos, estabeleceu-se que a cobertura de nuvens deve ser inferior a 5% não podendo haver nuvens sobre a área do aeroporto. É importante ressaltar que uma pequena nuvem sobre uma pista de pouso e decolagem pode inviabilizar o trabalho de utilização da imagem para gestão de atividades aeroportuárias.

E) Arquivo RPC –

O arquivo RPC – (*Rational Polynomial Coefficient*)- Coeficientes dos Polinômios Racionais, é fornecido pelos operadores de satélites de alta resolução. Estes dados, unidos a modelos digitais de elevação e pontos de controle levantados no terreno, com suas respectivas altitudes, possibilitam o processo de ortorretificação. Para o processo de ortorretificação, é fundamental que este arquivo acompanhe a imagem no momento da aquisição.

F) Sistema Geodésico de Referência –

SIRGAS 2000 - O Sistema Geodésico de Referência WGS84 é um sistema Geocêntrico (possui sua origem no centro de massa do seu elipsóide). Em função disso, este sistema é o mais utilizado no mundo e também utilizado nos receptores GPS. Por ser um sistema que possa ser utilizado no mundo inteiro, este foi selecionado pela Organização de Aviação Civil Internacional para ser utilizado na aviação mundial. O conhecimento do Sistema Geodésico de Referência é fundamental para a integração de informações de diferentes fontes. É muito importante que todos os dados estejam referenciados ao mesmo Sistema de Referência. Para os levantamentos topográficos no Brasil, o IBGE padronizou o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, que também é Geocêntrico. O DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), instituição do Comando da Aeronáutica à qual o ICA (Instituto de Cartografia Aeronáutica) pertence, padronizou o uso do Sistema Geodésico de Referência WGS 84 na aviação brasileira, porém, em função da necessidade de integração dos dados com os dados cadastrais dos municípios envolvidos, quando trata-se do assunto de Zona

de Proteção de Aeródromo, o ICA utilizava há alguns anos o Sistema Geodésico de Referência SAD 69 e atualmente está utilizando o SIRGAS 2000.

- G) Imageamento ocorrido em período igual ou inferior a 04 (quatro) meses da data do contrato de compra -

Em função da possibilidade de demora em se obter um novo imageamento da área de interesse, sem cobertura de nuvens, é importante considerar-se a possibilidade de adquirir imagens já existentes, porém, em função da alta velocidade do crescimento urbano desordenado das grandes cidades, deve-se limitar em alguns meses o tempo de existência da imagem, sob pena adquirir-se a imagem desatualizada. Esse parâmetro pode variar bastante em função do tamanho do município, da velocidade de crescimento na região do entorno do aeroporto ou em função de alguma obra específica, como foi o caso do presente estudo, pois a construção de um viaduto na área de interesse havia sido concluída há 04 (quatro) meses, no período em que foi elaborado o Termo de Referência para a aquisição da Imagem de Satélite utilizada no presente trabalho.

- H) Fornecimento da imagem em mídia, (CD ou DVD), no formato GEOTIFF -

O fornecimento da imagem em mídia é necessário para que seja possível o seu processamento e sua utilização para o gerenciamento de obstáculos e outras atividades de apoio à gestão aeroportuária. O formato GEOTIFF é uma variação do formato TIFF, que carrega consigo dados geográficos (coordenadas dos pixels na imagem). Esse formato é utilizado por softwares de processamento digital de imagens e de elaboração de Sistemas de Informações Geográficas.

A correta verificação do material no momento da entrega é uma forma de fiscalização necessária e faz parte do processo de aquisição da imagem.

Após especificação técnica e processo de Dispensa de Licitação, foi adquirida uma Imagem IKONOS II, datada de 05 de junho de 2008. Foram entregues 04 (quatro) bandas espectrais, fusionadas com a banda pancromática, com pixel de 01 (um) metro (vermelho, verde, azul e infra-vermelho próximo).

#### 4.2.3. Composição Colorida

O processamento da imagem foi realizado com o uso do aplicativo RSI ENVI 4.3, através do qual foram , foram selecionadas as 03 (três) bandas espectrais utilizadas para a composição colorida, sendo elas a banda do vermelho, verde e azul. A imagem resultante está representada pela Figura 33:

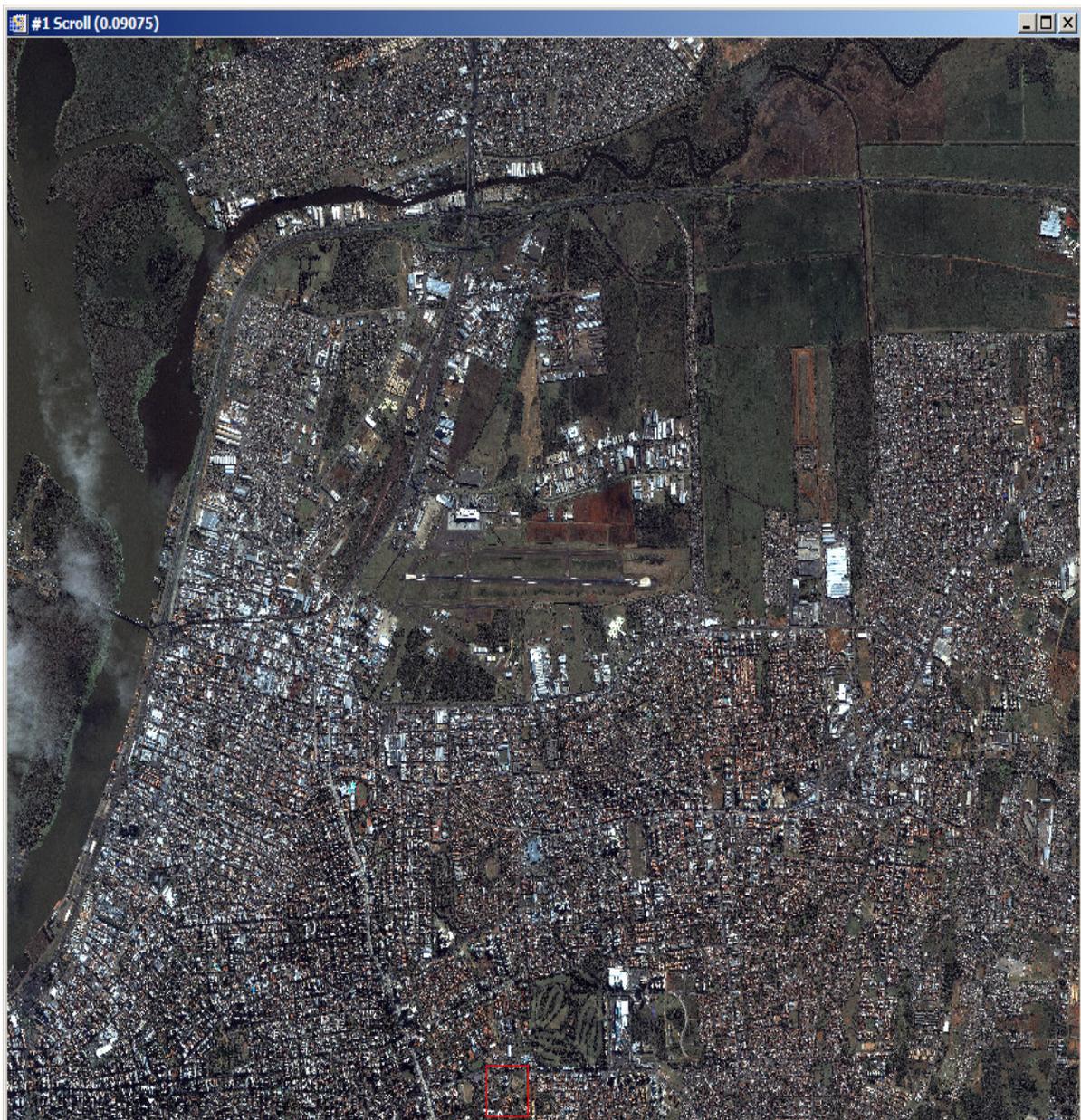


FIGURA 33 - COMPOSIÇÃO COLORIDA – RGB 321

Para que seja possível a melhor definição na imagem, pode ser necessário que se aplique os processos de filtragem e equalização. No caso em tela não houve necessidade.

#### 4.2.4. Apoio de Campo

Considerando-se que qualquer técnica de levantamento e medição envolve erros, sejam eles erros aleatórios, sistemáticos ou grosseiros e considerando-se que este trabalho objetiva a implantação de um modelo 2D, analisou-se o erro horizontal máximo a ser considerado aceitável em função de sua influência na análise de rampas e conseqüentemente na determinação da altitude máxima permitida para implantações nas superfícies limitadoras de obstáculos. Dessa forma, considerou-se a menor rampa estabelecida em BRASIL (1987), sendo ela 1/5, pois sendo esta rampa a de menor denominador, ela será a que sofrerá maior influência em função do valor de um erro inserido no denominador. Sendo assim, levando-se em consideração essa rampa, a menos restritiva e aquela cujo erro horizontal resultará em maior erro vertical na determinação da altura do obstáculo e considerando-se que qualquer levantamento envolve erros, estabeleceu-se um erro vertical limite de 0,6 m e a partir dele, chegou-se ao valor de 3 m de erro horizontal ( $0,6 = X/50 \Rightarrow X = 3 \text{ m}$ ), o que representa a proporção de 3 vezes o tamanho do pixel da imagem adquirida. Em função dos denominadores maiores, as outras rampas estabelecidas em BRASIL (1987) são afetadas com erros verticais menores, por exemplo, em uma Rampa 1/50, o mesmo erro horizontal de 3 m resultará em um erro vertical na determinação da altura máxima de apenas 6 cm. Ressalta-se que o erro de 3 m é o máximo estipulado e que este trabalho busca o menor erro possível.

Visando atingir-se a melhor acurácia possível nas coordenadas e medidas em uma imagem de alta resolução, são necessárias as correções geométricas. Para trabalhos com imagens de alta resolução, os processos de georreferenciamento e ortorretificação terão melhor qualidade tanto quanto for melhor a qualidade das coordenadas dos pontos de apoio no terreno. Sendo assim, os pontos de apoio em campo devem ser escolhidos pela sua facilidade de identificação no terreno e os mesmos devem ser coletados com

receptores GPS, visando a máxima acurácia nas coordenadas. A técnica de coleta com receptores GPS e processamento dos dados coletados define a qualidade das coordenadas dos pontos de apoio de campo.

Sendo assim, adotou-se a técnica de coleta de coordenadas através do posicionamento relativo, utilizando-se como base a estação POAL da RBMC e um marco geodésico implantado pelo Instituto de Cartografia Aeronáutica – ICA no Sítio Aeroportuário do Aeroporto Internacional Salgado Filho. Para cada ponto coletado, foi instalado um GPS L1 como base sobre o marco geodésico estabelecido pelo ICA e outro sobre o ponto de interesse, com tempo de rastreamento de 30 minutos.

Aplicando-se a equação adaptada de Pereira (1978), por Rocha (2002), foram inseridos os valores de tamanho de pixel e tamanho da área da imagem, estabeleceu-se o parâmetro de  $\gamma = 1/3$  vezes o valor do pixel, ou seja, uma proporção entre desvio padrão e média amostral de  $1/3$  do tamanho do pixel e um erro amostral relativo de 12%. Considerando-se uma expectativa de um intervalo de confiança de 90%, chegou-se ao valor de 20,46 pontos, que arredondados para o valor superior mais próximo, foi determinada a quantidade de 21 pontos de apoio em campo para o georreferenciamento da imagem, conforme destacado na Tabela 09. Esses valores de erro amostral, proporção entre valor de desvio padrão e média amostral e intervalo de confiança foram estabelecidos em função da técnica de coleta de pontos de controle a ser aplicada e em função da disponibilidade de tempo e do custo envolvido na coleta de pontos de controle, considerando-se por exemplo, que a variação do intervalo de confiança de 90% para 95% representaria o dobro do número de pontos de controle, ou seja, 42 pontos, com coletas de coordenadas por período mínimo de 30 minutos, considerando-se o tempo de deslocamento entre um ponto e outro e também a dificuldade de localização de pontos identificáveis no terreno situados em locais seguros, em áreas privadas, o que envolveria também o tempo de obtenção de autorização para ingresso nas áreas a serem utilizadas para coleta de coordenadas de 42 pontos de controle, por apenas 5% de variação no intervalo de confiança.

CALCULO DO NÚMERO DE PIXELS PARA CADA CENA:					
SENSOR	IMAGEM				
	TAM.PIXEL (m)	LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	AREA (m)	N
LANDSAT	30	7800	10000	78000000	86666,66667
SPOT	20	7800	10000	78000000	195000
IKONOS	1	7800	10000	78000000	78000000
QUICKBIRD	0,61	7800	10000	78000000	209621069,6
CBERS HRC	2,5	7800	10000	78000000	12480000
$\gamma$	0,33				
Z = 90%	1,6449				
		$\epsilon = 10\%$		$\epsilon = 12\%$	$\epsilon = 15\%$
SENSOR	N		0,1	0,12	0,15
LANDSAT	86666,66667	n	29,45535515	20,45723221	13,09374127
SPOT	195000	n	29,46072903	20,4597841	13,09475644
IKONOS	78000000	n	29,4650188	<b>20,46182097</b>	13,09556666
QUICKBIRD	209621069,6	n	29,46502555	20,46182418	13,09556793
CBERS HRC	12480000	n	29,46496234	20,46179417	13,095556

TABELA 09 – NÚMERO DE PONTOS DE APOIO – ROCHA 2002

Onde:

$$n := \frac{(Z^2 \cdot \gamma^2 \cdot N)}{\left[ (N - 1) \cdot (\epsilon)^2 + (Z^2 \cdot \gamma^2) \right]}$$

$$\epsilon := \frac{\sigma}{\mu}$$

$$\gamma := \frac{\sigma}{\mu}$$

Onde:

n = tamanho da amostra (número de pontos de controle necessários)

N = tamanho da população (número de pixels na imagem)

$\epsilon$  = erro amostral relativo

$\sigma$  = desvio padrão amostral em metros

$\mu$  = media amostral

Z = intervalo de confiança da tabela de Distribuição Normal

$\gamma$  = Relação entre o desvio padrão e a media amostral

Definido o número de pontos necessários, visando a distribuição o mais homogênea possível de pontos de apoio sobre a imagem, a mesma foi dividida em quatro quadrantes e cada um deles foi subdividido em mais seis quadrantes. A partir desses

quadrantes, os referidos pontos foram selecionados, procurando-se dentro do possível, concentrar um número maior de pontos nas proximidades do aeroporto. Conforme pode ser verificado na figura 34, nem todos os quadrantes foram abrangidos por pontos de controle, o que pode ter afetado a qualidade das correções geométricas na região dos referidos quadrantes.



FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO DE CAMPO NA IMAGEM

Um aspecto importante a ser destacado aqui é a necessidade de escolha de locais seguros, preferencialmente não instalar o GPS em locais de livre circulação, em função do risco de assaltos. Na região onde o trabalho foi realizado, há inúmeras ocorrências de assaltos e roubo de equipamentos de levantamentos topográficos. Essa limitação torna o trabalho mais demorado, inclusive diminuí significativamente o número de pontos no terreno identificáveis na imagem que possam ser utilizados. A demora ocorreu em função

de, além do tempo de deslocamento e coleta de coordenadas, ainda haver necessidade de obtenção de autorização para ingresso em áreas privadas para a realização dos trabalhos, a fim de prover a segurança necessária.

O levantamento dos pontos de apoio foi realizado nos dias 27/06/2009 (manhã e tarde), 12/08/2009 (tarde), 13/08/2009 (manhã e tarde), 14/08/2009 (tarde – erro na coleta de dados), 15/08/2009 (tarde), 24/08/2009 (manhã e tarde) e 28/08/2009 (manhã e tarde). No dia 27/06/2009 foi utilizado como base para o posicionamento relativo, além da estação POAL da RBMC, o marco geodésico implantado pelo ICA no “Ponto de Cheque do VOR”, representado pela Figura 35 nos outros dias, foi utilizado como base o marco geodésico “INS 1 – AP 110”, representado pela Figura 36.



FIGURA 35 - PONTO DE CHEQUE DO VOR



FIGURA 36 – INS1 – AP110

Os receptores GPS foram configurados para realizar registros a cada 5 segundos e foi adotado o Sistema Geodésico de Referência WGS84. Após a coleta dos dados, foram extraídos os arquivos de registros de dados de coleta, chamados “RINEX”, para o processamento.

O processamento dos dados coletados com GPS foi realizado através do Software GPSurvey. Através do referido aplicativo, foram definidas as linhas base, considerando-se sempre uma linha base ligando o ponto coletado à estação POAL da RBMC e outra

linha base ligando o ponto coletado ao outro ponto base instalado sobre um marco geodésico do Instituto de Cartografia Aeronáutica.

Após o processamento dos dados, foi realizado o ajustamento das redes, associando-se os pontos coletados às estações base, para cada dia e turno de levantamento. Os dados do processamento dos pontos com GPS extraídos dos arquivos de sumário de processamento do GPSurvey “BLSUM.txt”, foram inseridos como injunções, no aplicativo AJURGPS.

Na Tabela 10 estão listados os dados dos pontos de apoio em campo após o processamento e ajustamento de rede GPS:

COORDENADAS UTM:								
Ponto	E(m)	Sigma E(m)	N(m)	Sigma N(m)	FUSO	MC	h(m)	Sigma h(m)
POAL	488457,5445	5,70E-10	6673004,057	5,6977E-10	22	-51		
A0001	483969,3843	5,70E-10	6681664,273	5,6974E-10	22	-51	7,1248	2,3877E-05
1	483098,8187	5,70E-10	6681522,827	5,6986E-10	22	-51	4,0675	2,3877E-05
2	482448,0089	5,70E-10	6682302,726	5,6984E-10	22	-51	3,8731	2,3877E-05
3	482186,1044	5,70E-10	6682039,569	5,6983E-10	22	-51	4,3999	2,3877E-05
4	483197,2668	1,02E-10	6682311,149	1,0187E-10	22	-51	10,0949	1,0095E-05
5	479061,4132	1,27E-08	6681824,665	1,2680E-08	22	-51	4,7151	1,1264E-04
6	480372,6199	1,27E-08	6681601,497	1,2681E-08	22	-51	3,3781	1,1264E-04
7	481491,4884	1,27E-08	6683066,149	1,2682E-08	22	-51	4,4439	1,1264E-04
8	482267,1977	3,66E-10	6685002,468	3,6559E-10	22	-51	2,9582	1,9094E-05
9	481420,678	3,66E-10	6683940,585	3,6559E-10	22	-51	3,9491	1,9094E-05
10	480157,3174	6,00E-10	6682331,963	5,9918E-10	22	-51	3,2652	2,4484E-05
11	484684,7075	5,99E-10	6682582,479	5,9887E-10	22	-51	3,7181	2,4484E-05
12	486243,1196	2,09E-09	6682059,721	2,0863E-09	22	-51	5,3254	4,5690E-05
13	486376,6658	2,09E-09	6681482,755	2,0864E-09	22	-51	7,1011	4,5690E-05
14	483829,3165	2,09E-09	6683910,537	2,0863E-09	22	-51	4,3927	4,5690E-05
15	478885,8783	2,48E-09	6678884,027	2,4785E-09	22	-51	3,4973	4,9804E-05
16	486175,2964	7,66E-09	6680265,761	7,6588E-09	22	-51	18,8862	8,7525E-05
17	483471,1259	7,65E-09	6679771,535	7,6362E-09	22	-51	15,7294	8,7525E-05
18	481841,4699	7,01E-09	6680235,412	7,0104E-09	22	-51	21,1199	8,3746E-05
19	482757,8337	1,81E-09	6681310,811	1,8112E-09	22	-51	3,1663	4,2573E-05
20	483416,2634	1,81E-09	6681596,05	1,8110E-09	22	-51	3,0097	4,2573E-05

TABELA 10 – COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO EM CAMPO

#### 4.2.5. Correções Geométricas

Em função da dificuldade de obtenção de modelos digitais de elevação com equidistância vertical das curvas de nível de um metro e visando utilizar uma solução

gratuita e também considerando-se que, por questão de segurança operacional, as áreas das proximidades dos aeroportos são planas e assim não sofrem grandes distorções radiais devido ao relevo, optou-se pela utilização do modelo digital de elevação do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Assim, foi realizado o download dos arquivos “.hgt”, no Sítio de INTERNET da NASA, para que, após integração dos mesmos, eles fizessem parte do processo de ortorretificação da imagem. O Modelo Digital de Elevação que contém a área de estudo está representado na Figura 37.

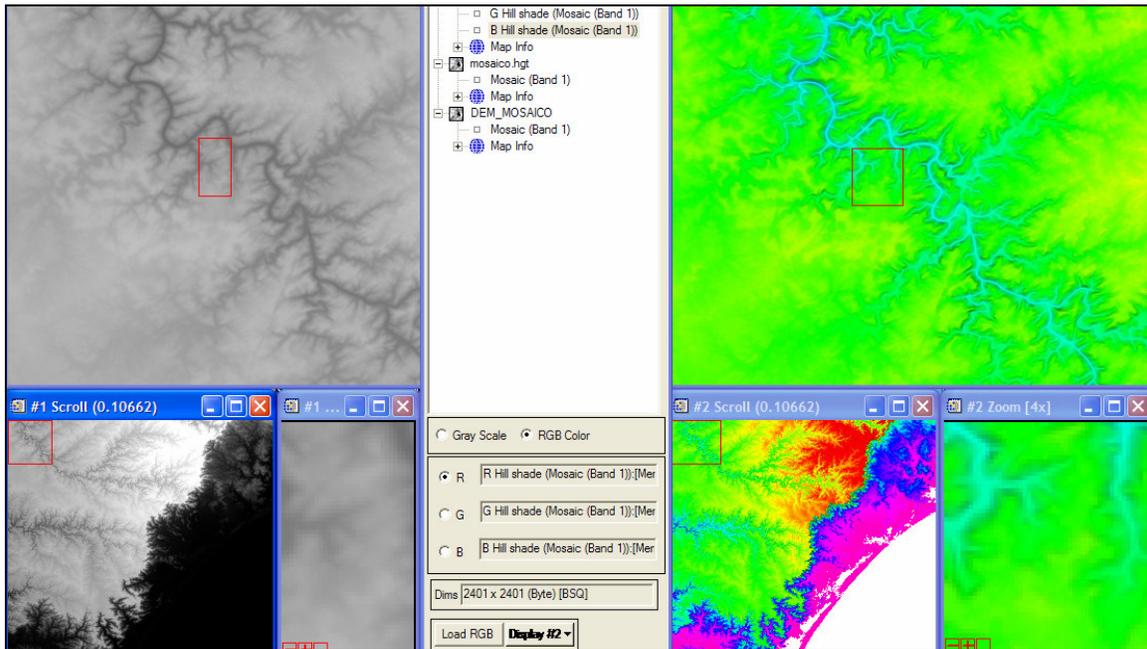


FIGURA 37 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO UTILIZADO – SRTM

O georreferenciamento foi executado juntamente com a ortorretificação através do Software RSI ENVI, utilizando-se o Modelo Digital de Elevação do SRTM, o arquivo RPC fornecido juntamente com a imagem de satélite e os 21 pontos de controle, com suas respectivas altitudes. A realização do georreferenciamento juntamente com a ortorretificação torna-se vantajosa devido ao fato de que os Pontos de Controle de Solo são utilizados como injeções no processo de ortorretificação.

#### 4.3. ANÁLISE DA QUALIDADE GEOMÉTRICA:

No processo de análise geométrica, foi adotada a comparação simples entre as coordenadas dos pontos GPS ajustadas com as coordenadas dos mesmos pontos lidas na imagem ortorretificada, após o processo de reamostragem. A Tabela 11 apresenta a comparação entre as coordenadas, seguida da média e desvio padrão das diferenças observadas. Com base na amostragem apresentada na Tabela 11, pode-se considerar que as medições de coordenadas sobre a imagem ortorretificada apresentam erro médio de 1,74 m, com desvio padrão de 0,71 m.

ESTAÇÃO	GPS		IMAGEM		DIFERENÇA (m)	MÉDIA (m)	DESVIO PADRÃO (m)	VARIÂNCIA (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)				
A0001	483969,3843	6681664,2733	483969,16	6681665,86	1,602475392	1,743437214	0,715059283	0,511309778
0001	483098,8187	6681522,8270	483098,24	6681524,88	2,133003209			
0002	482448,0089	6682302,7256	482448,31	6682304,78	2,076347893			
0003	482186,1044	6682039,5690	482185,34	6682040,81	1,457528167			
0004	483197,2668	6682311,1491	483194,23	6682311,78	3,10164296			
0005	479061,4132	6681824,6646	479061,65	6681822,84	1,839902008			
0006	480372,6199	6681601,4972	480373,52	6681601,87	0,974248351			
0007	481491,4884	6683066,1492	481491,41	6683066,69	0,546453292			
0008	482267,1977	6685002,4683	482267,33	6685004,45	1,986111322			
0009	481420,678	6683940,5853	481421,41	6683942,58	2,124771067			
0010	480157,3174	6682331,9628	480156,54	6682330,78	1,415403334			
0011	484684,7075	6682582,4791	484684,08	6682583,73	1,399466706			
0012	486243,1196	6682059,7213	486242,93	6682061,81	2,097287736			
0013	486376,6658	6681482,7551	486376,91	6681484,88	2,138886077			
0014	483829,3165	6683910,5372	483829,17	6683913,59	3,056313153			
0015	478885,8783	6678884,0269	478884,67	6678886,2	2,486433691			
0016	486175,2964	6680265,7611	486173,93	6680264,03	2,20539252			
0017	483471,1259	6679771,5348	483470,21	6679771,09	1,018194407			
0018	481841,4699	6680235,4122	481841,37	6680235,03	0,395040314			
0019	482757,8337	6681310,8106	482757,28	6681311,9	1,222037663			
0020	483416,2634	6681596,0495	483415,21	6681596,87	1,335242229			

TABELA 11 – ESTIMATIVA DE ERROS NAS COORDENADAS DA IMAGEM

Considerando-se os valores de média e desvio padrão calculados, pode-se estimar, através da tabela de distribuição normal, os valores de erro, considerando-se o intervalo de confiança de 90%:

$$P(Z \leq z) = 0,90$$

Na tabela de distribuição normal, o valor correspondente a 0,90 é 1,29.

$$(X - \mu) / \sigma = 1,29$$

$$X = (1,29 \times 0,715) + 1,7434 = 2,66 \text{ m}$$

Logo, tendo como base a amostra de pontos analisados, estima-se que, com um intervalo de confiança de 90% o erro nas coordenadas na imagem, após georreferenciamento e ortorretificação é de 2,66 m. Ressalta-se que os pontos utilizados para análise das coordenadas após as correções geométricas e redistribuição dos pixels foram os mesmos pontos de controle de solo utilizados nos processos de georreferenciamento e ortorretificação. Estudos futuros com novas coletas de coordenadas em pontos de verificação poderão ser utilizados para confirmação das análises aqui apresentadas e dos erros estimados.

#### 4.4. INSERÇÃO DE INFORMAÇÕES TEMÁTICAS E GERAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

##### 4.4.1. Carta Imagem do Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo do Aeroporto Internacional Salgado Filho:

Não há em qualquer manual ou documento, uma fórmula matemática que permita reproduzir fidedignamente um Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo, haja vista que o Comando da Aeronáutica, através do Departamento de Controle do Espaço Aéreo realiza os estudos e análises de riscos. A partir desses estudos, publica os referidos Planos naqueles aeroportos onde não é possível utilizar-se os Planos Básicos. Nos aeroportos onde são utilizados Planos Básicos de Zona de Proteção de Aeródromo, é possível, a partir dos conceitos já apresentados neste trabalho, estabelecer-se as dimensões, limites e rampas envolvidas na Faixa de Pista, Área de Transição, Áreas de Aproximação e Decolagem, Área Horizontal Interna, Área Cônica e Área Horizontal Externa.

Como o Aeroporto de Porto Alegre possui Plano Específico de Zona de Proteção, foi obtido junto ao Comando da Aeronáutica um arquivo com os vetores do referido Plano. O Plano Específico foi novamente processado em aplicativo de cartografia digital, onde separou-se cada área em um polígono diferente, o que veio a facilitar muito a

elaboração do Sistema de Informações Geográficas devido à possibilidade de cadastro de informações associadas a cada polígono. O Plano Específico apresenta informação defasada no comprimento da ampliação da pista. Enquanto nele consta a dimensão de 2.800 m, o projeto está prevendo a dimensão de 3.200 m. Dessa forma, foi desenhado em azul a extensão da zona de proteção, em relação ao que consta no referido Plano. Tal alteração afetou as dimensões da Faixa de Pista, Área de Aproximação e Área de Transição. Foi identificado em cada polígono, o nome da área abrangida, e em um quadro na área de informações técnicas da carta, foi inserida a correspondência de limites de altitudes ou o respectivo ângulo vertical de limitação.

Após o processamento dos polígonos, foi elaborada a Carta Imagem do Plano Específico de Zona de Proteção do Aeroporto Internacional Salgado Filho, demonstrada na Figura 38. No ano de 2009, a referida carta, em escala 1:10.000 e impressa em papel de tamanho A0 foi entregue ao Comandante do V COMAR e enviada ao Secretário de Planejamento do Município de Porto Alegre, com a solicitação de que a mesma fosse incluída no Plano Diretor do Município. A referida Carta Imagem também é utilizada pela Superintendência do Aeroporto Internacional Salgado Filho, Gerências de Operações, Engenharia e Navegação Aérea, para análises e identificação dos limites das áreas abrangidas pelas superfícies limitadoras de obstáculos estabelecidas pelo Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo.

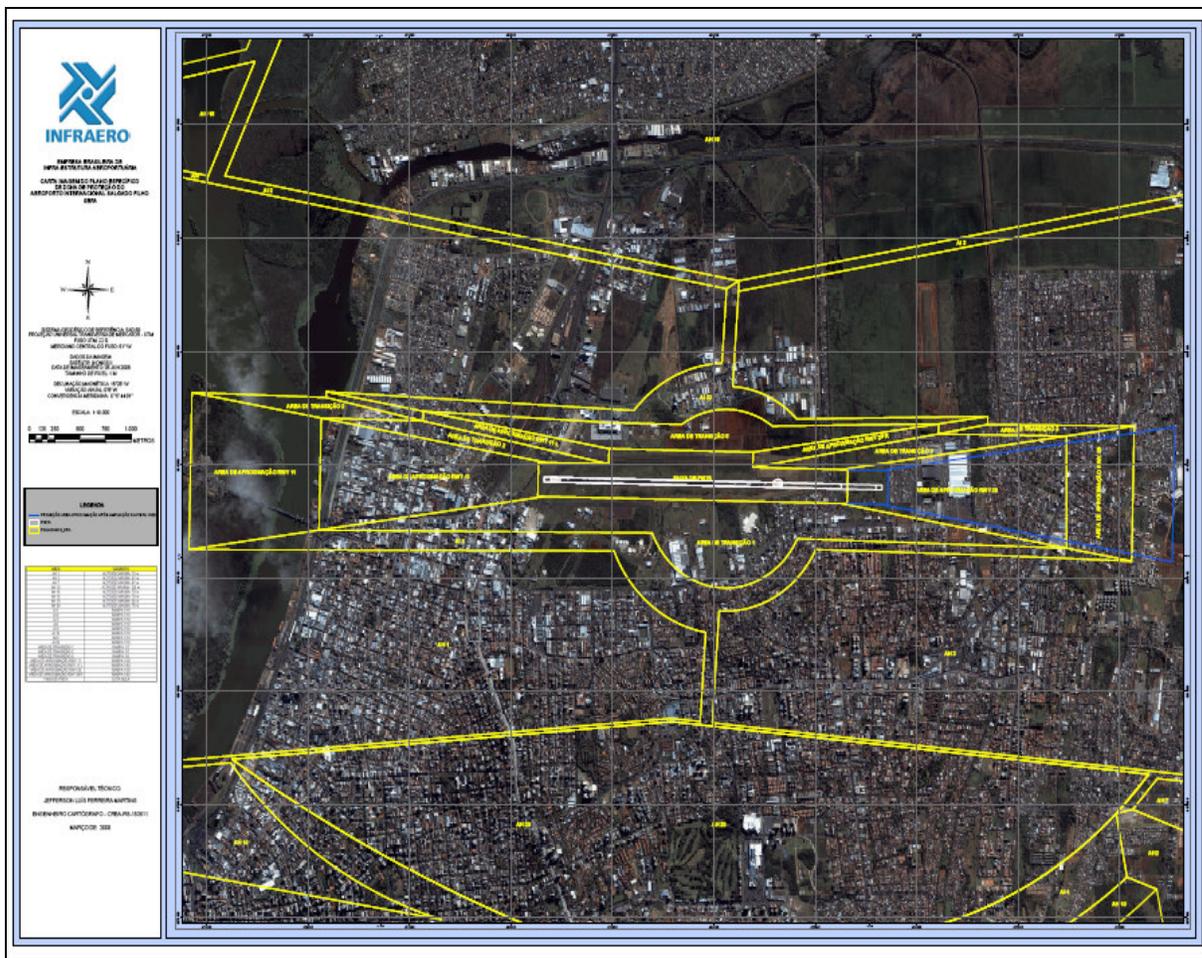


FIGURA 38 – CARTA IMAGEM DO PLANO ESPECÍFICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE ZONA DE PROTEÇÃO DO AEROPORTO DE PORTO ALEGRE

#### 4.4.2. Mapa de Conflitos Obstáculos X Ampliação da Pista

Visando uma análise criteriosa de fatores impactantes à ampliação da pista do Aeroporto Internacional Salgado Filho, foi elaborada uma Carta Imagem de conflitos entre obstáculos à Zona de Proteção e a ampliação da pista, onde foram projetados a pista em sua futura extensão, os futuros limites do sítio aeroportuário e os obstáculos na área de interesse para a ampliação da pista. As coordenadas dos obstáculos foram obtidas na Portaria 68/DGCEA e em planilha resultante de levantamento topográfico realizado pelo Instituto de Cartografia Aeronáutica em setembro de 2008. O referido mapa de conflitos foi utilizado no processo de solicitação de aprovação do projeto de ampliação da



#### 4.4.3. Sistema de Informações Geográficas do Aeroporto Internacional Salgado Filho (SIG-SBPA)

Tendo como objetivo possibilitar análises mais detalhadas de implantações através da correlação de informações temáticas como dados patrimoniais, informações de interesse da área de meio ambiente, zona de proteção de aeródromo, plano de zoneamento de ruído e projetos de obras, e visando possibilitar a utilização de ferramentas de geoprocessamento para a tomada de decisão, foi elaborado um Sistema de Informações Geográficas do Aeroporto de Porto Alegre, chamado “SIG-SBPA”. No referido SIG, foram inseridas a imagem de alta resolução aqui estudada, uma imagem LANDSAT de uma área maior, visando abranger o raio de 20 Km no entorno do aeroporto, para análises ambientais e os dados acima citados. O Sistema de Informações Geográficas foi elaborado com o uso do aplicativo Arc GIS – Arc View 9.2 e foi disponibilizado através do software de visualização gratuito – Arc Explorer.

Para a elaboração do SIG, foram analisados os seguintes aspectos:

Definição dos usuários do SIG: Como o Sistema visa ser utilizado como Ferramenta de Apoio à decisão para Gerenciamento de atividades aeroportuárias, foram consideradas as seguintes áreas como usuários em potencial para o Sistema de Informações Geográficas:

- Operações Aeroportuárias (Localização no Sítio Aeroportuário, Zona de Proteção, Superfície do Segmento Visual - VSS);
- Segurança Aeroportuária (Estratégias de incursão/ saída, gerenciamento de cercas, muros, guaritas, portões de acesso e áreas remotas);
- Manutenção (Localização de áreas mantidas, valas, equipamentos e auxílios);
- Engenharia (Planejamento de obras, análise de impactos nas vizinhanças);
- Comercial (ocupação do espaço disponível);
- Meio Ambiente (ASA, EIA RIMA, gestão ambiental);
- Navegação Aérea (Zona de Proteção de Aeródromo e Auxílios à Navegação Aérea);
- Financeira (gestão patrimonial);
- Administração do Aeroporto: Auxílio para argumentação em reuniões, audiências e treinamentos.

Dados a comporem o SIG:

Através de sobreposição em camadas de informações temáticas, o SIG foi elaborado inicialmente com os seguintes dados, representados na Figura 40: Planejamento e projeção de obras, limites de municípios das proximidades do aeroporto, planejamento de expansão do Sítio Aeroportuário, Limites patrimoniais do aeroporto, plano de zoneamento de ruído, Superfície do Segmento Visual (VSS), com os respectivos obstáculos, Plano de Zona de Proteção de Aeródromo, com os respectivos obstáculos, dados vetoriais sobre focos atrativos de pássaros, imagem multi-espectral LANDSAT – TM5 e imagem de alta resolução. O SIG deve ser complementado com mais dados temáticos à medida que forem surgindo novas demandas.

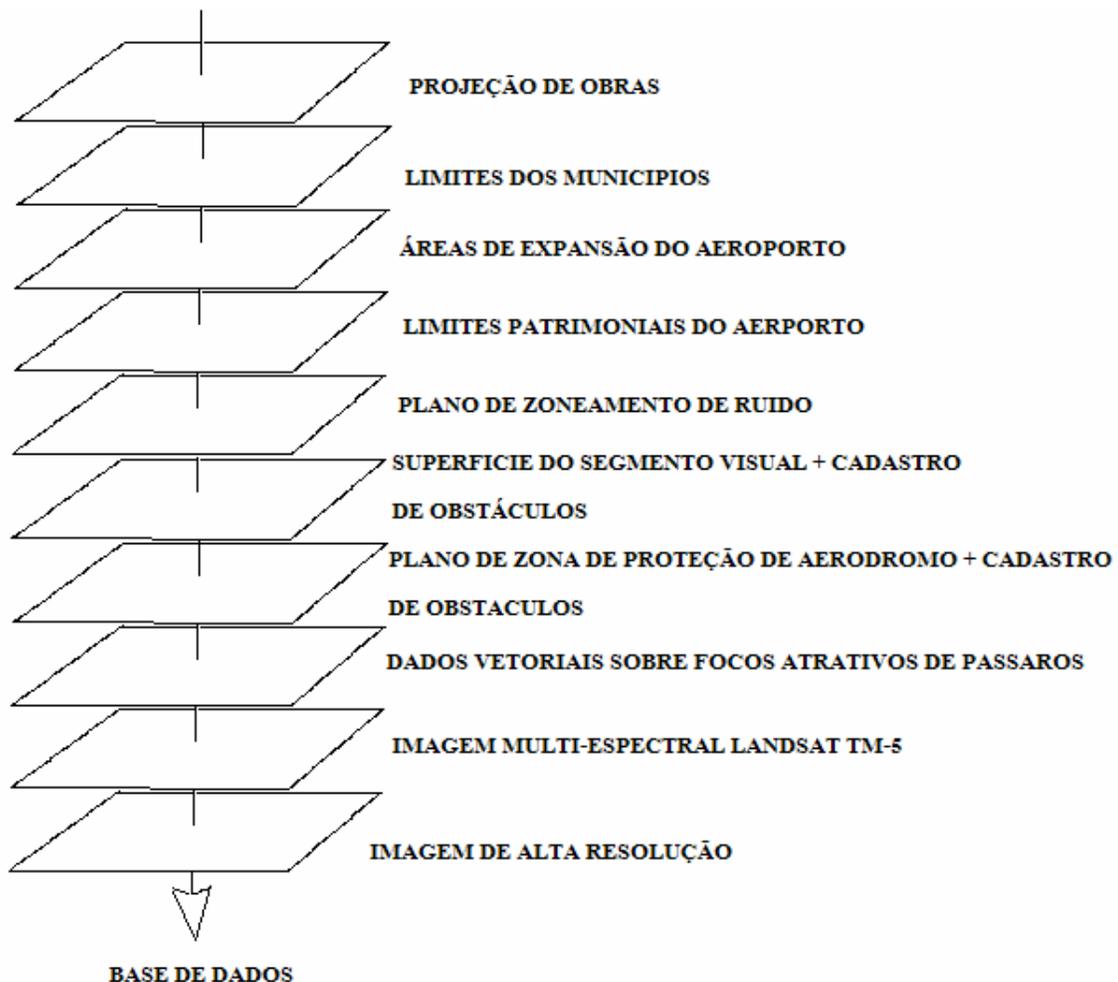


FIGURA 40 – COMPOSIÇÃO DO SIG

Tabelas de atributos:

As informações cadastrais foram associadas aos respectivos dados vetoriais através de tabelas de atributos. Algumas formas de desenho necessitaram ser modificadas para o cadastro das informações através das tabelas de atributos, como as áreas do Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo, que foram transformadas de polilinhas para polígonos, aos quais foram associadas às respectivas informações sobre limites de altitudes e rampas.

A utilização do cadastro de informações através de tabelas de atributos visa propiciar a análise e localização rápida dos pontos cadastrados. A Figura 41 ilustra a tabela de atributos de um obstáculo:

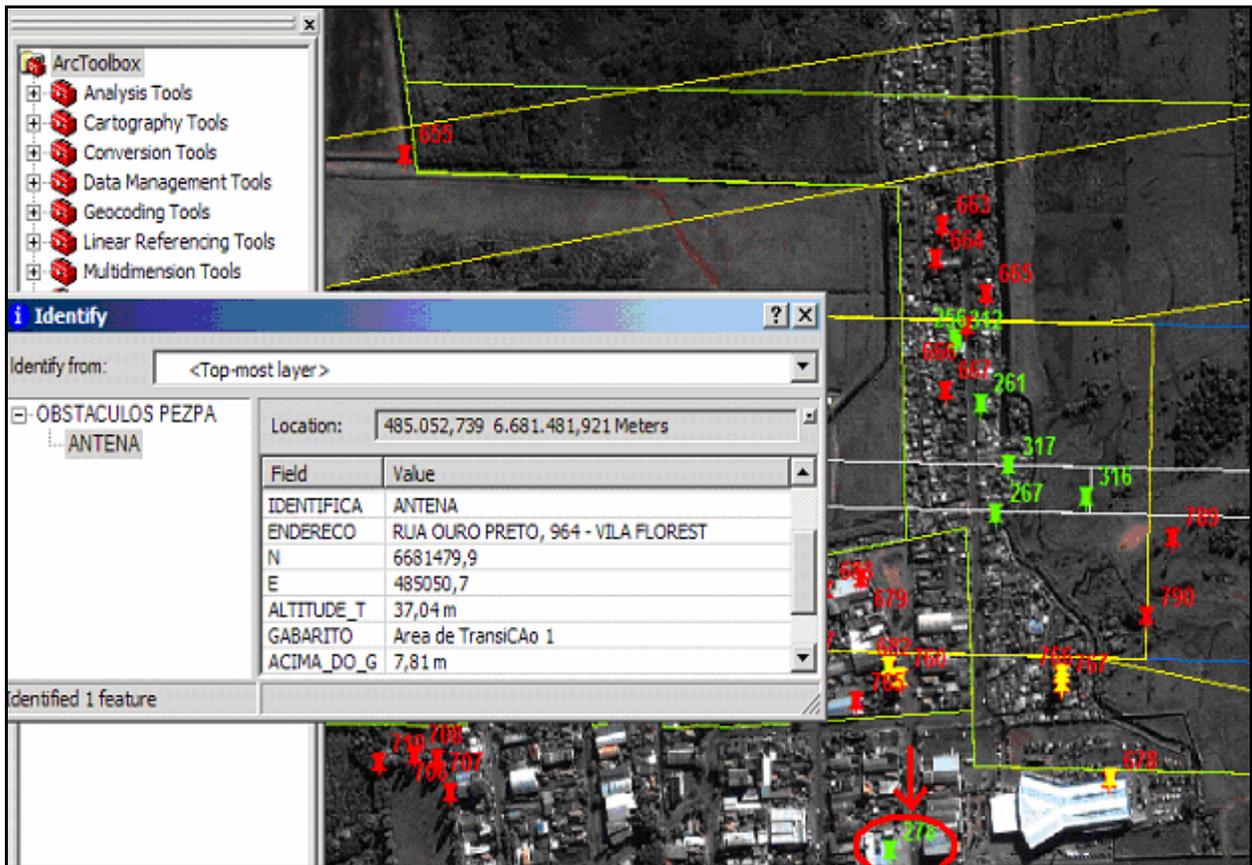


FIGURA 41 – TABELA DE ATRIBUTOS

## Integração dos Dados:

Os dados cadastrais e temáticos foram obtidos de diversas fontes, como levantamentos cadastrais do acervo cartográfico da INFRAERO, dados fornecidos pela ANAC, dados obtidos junto ao IBGE, dados obtidos através de documentos do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e informações coletadas em campo. Para tanto, foi necessário padronizar o Sistema Geodésico de Referência de todas as camadas de informação para SIRGAS 2000.

As informações cadastradas foram abrangidas por dois níveis de resolução espacial. Um deles, identificado pela imagem de alta resolução, contendo maior nível de detalhamento, representado pela Figura 42, e o outro identificado pela imagem LANDSAT – TM-5, que ultrapassa o limite do raio de 20 Km do aeroporto estabelecido pela Resolução 4 do CONAMA (BRASIL 1995) – Figura 43.

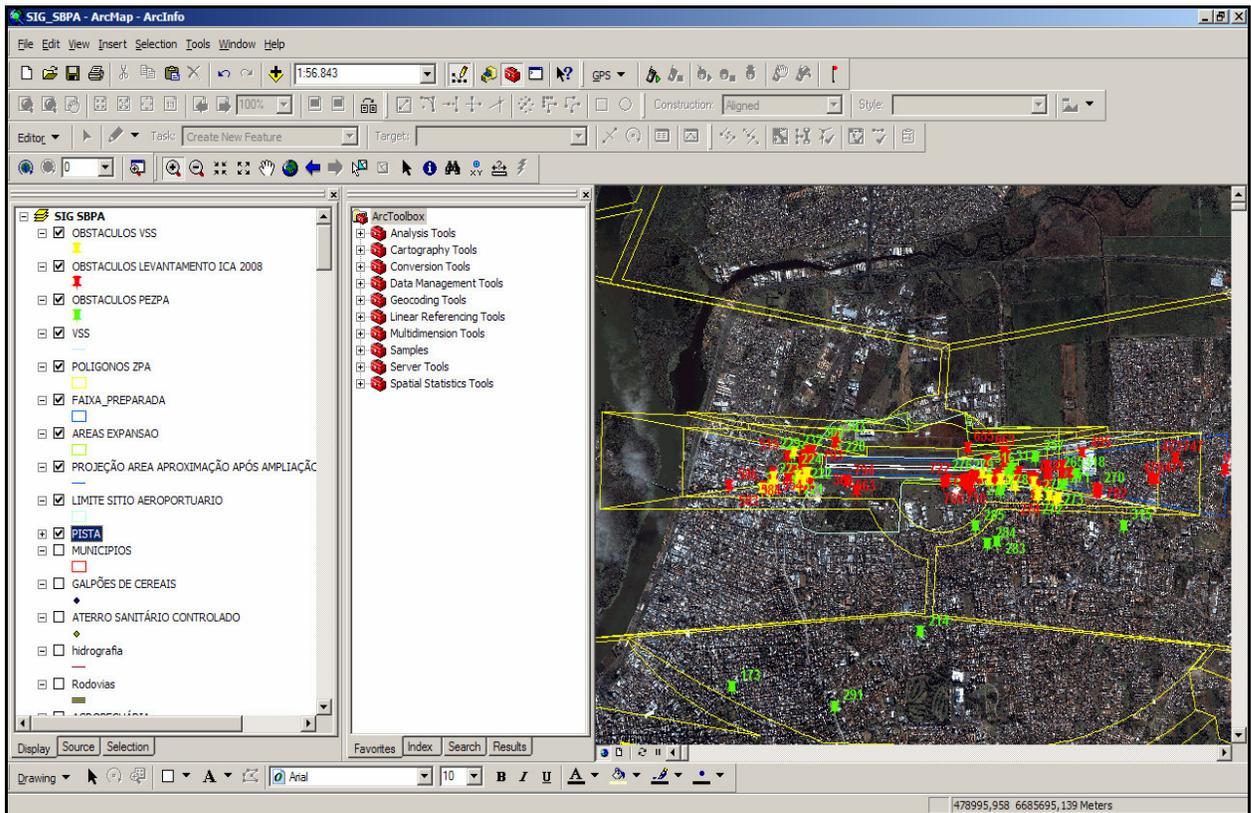


FIGURA 42 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS –DETALHAMENTO DA ÁREA ABRANGIDA PELA IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO

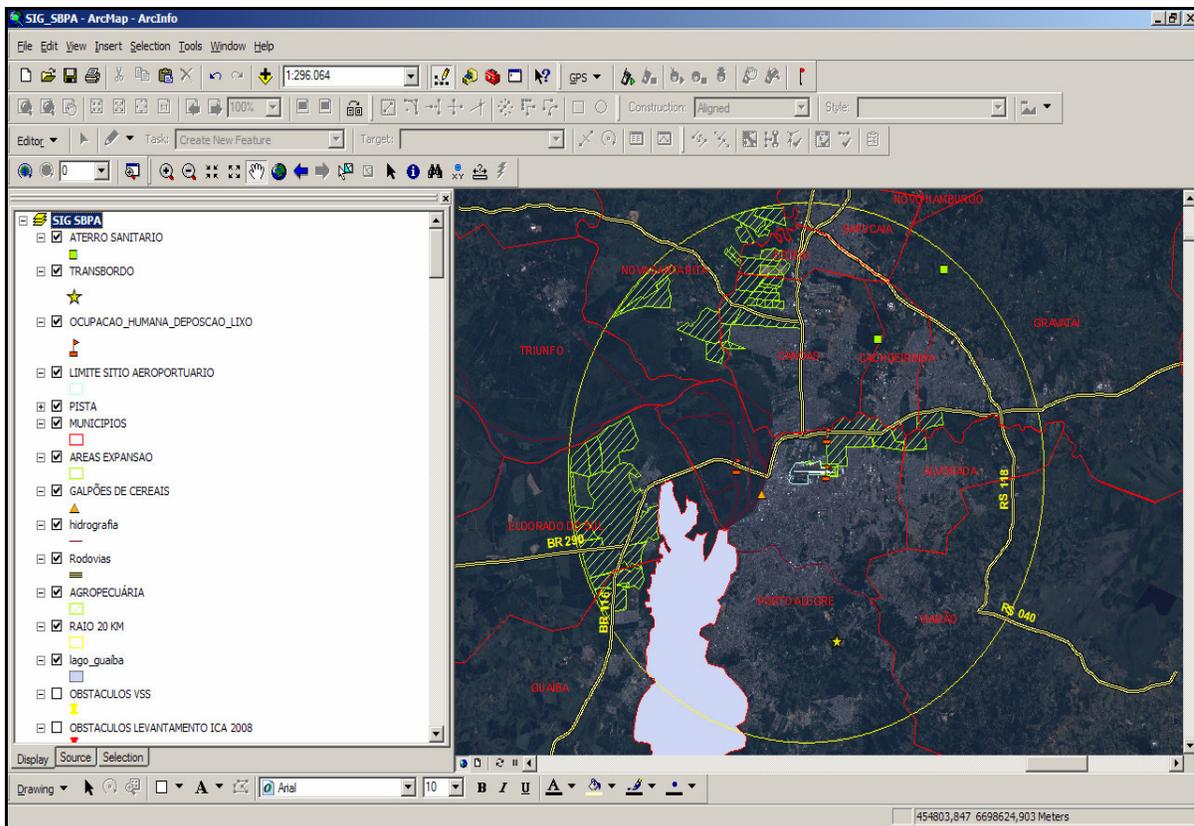


FIGURA 43 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – DA ÁREA ABRANGIDA PELO RAIO DE 20 KM DO AEROPORTO

O Sistema de Informações Geográficas foi desenvolvido no aplicativo Arc Gis e em evolução posterior poderá ser disponibilizado em rede corporativa através de software livre, como o Map Server. Enquanto esta opção de acesso não é implementada, o SIG foi disponibilizado juntamente com o aplicativo de visualização de Sistemas de Informações Geográficas “Arc Explorer”, tendo em vista que o mesmo é gratuito.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento e aplicação de correções geométricas na alta resolução utilizada no estudo aqui apresentado, associadas às superfícies limitadoras de implantações no entorno de aeródromos, verifica-se que a utilização da imagem de alta resolução apresenta-se como técnica eficiente para as análises de obstáculos, haja vista que um erro estimado de 2,66 m nas coordenadas da imagem ortorretificada, considerando-se um intervalo de confiança de 90%, é tolerável dentro da maior parte dos parâmetros estabelecidos pelas superfícies limitadoras de obstáculos. O menor ângulo vertical é de 1/5, o que significa que, a cada 5 m na horizontal, a superfície limitadora sobe 1 m. Considerando-se um erro horizontal de 2,6 m, este ângulo vertical teria uma margem de erro vertical de aproximadamente  $(2,66/5)$  0,53 m. A área mais crítica, é a Área de Aproximação, pois em grande parte dos casos, possui um ângulo vertical de 1/50, o que significa que, a cada 50 m de afastamento horizontal, a superfície limitadora sobe 1 m. Considerando-se o mesmo erro horizontal nas coordenadas, nesta área crítica, as limitações verticais calculadas a partir de coordenadas de obstáculos teriam um erro de  $(2,66/50)$  0,053 m.

A Carta Imagem do Plano Específico de Zona de Proteção do Aeroporto Internacional Salgado Filho foi elaborada em tamanho A0, em escala 1:10.000, visando abranger as áreas de estudo e no maior tamanho de papel imprimível por uma Plotter contém o maior nível de detalhamento possível, associado à escala da Carta Imagem. As diversas limitações e critérios impostos por um Plano de Zona de Proteção de Aeródromo foram apresentados através da projeção das áreas estabelecidas no Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo e exposição de tabela de correlação entre as referidas áreas e seus limites de altitudes e rampas, conforme identificado na Tabela 12, constante na Carta Imagem.

ÁREA	GABARITO
AH 1	ALTITUDE MÁXIMA: 73 m
AH 3	ALTITUDE MÁXIMA: 61 m
AH 7	ALTITUDE MÁXIMA: 67 m
AH 10	ALTITUDE MÁXIMA: 125 m
AH 14	ALTITUDE MÁXIMA: 79 m
AH 15	ALTITUDE MÁXIMA: 79 m
AH 19	ALTITUDE MÁXIMA: 64 m
AH 20	ALTITUDE MÁXIMA: 76 m
AI 1	RAMPA 1/10
AI 2	RAMPA 1/10
AI 3	RAMPA 1/10
AI 4	RAMPA 1/10
AI 9	RAMPA 1/10
AI 10	RAMPA 1/10
AI 12	RAMPA 1/10
AI 22	RAMPA 1/10
AREA DE TRANSIÇÃO 1	RAMPA 1/7
AREA DE TRANSIÇÃO 2	RAMPA 1/7
AREA DE TRANSIÇÃO 5	RAMPA 1/5
AREA DE APROXIMAÇÃO RWY 11	RAMPA 1/50
AREA DE APROXIMAÇÃO RWY 11 L	RAMPA 1/40
AREA DE APROXIMAÇÃO RWY 29	RAMPA 1/50
AREA DE APROXIMAÇÃO RWY 29 R	RAMPA 1/40
FAIXA DE PISTA	COTA NULA

TABELA 12 – LIMITES DE ALTITUDES E RAMPAS

Devido a sua facilidade de transporte e manuseio, a Carta Imagem do Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo resultou em grande ganho na divulgação e compreensão das limitações para implantações no entorno dos aeroportos, pois sua leitura se faz de forma rápida e prática, facilitando o entendimento das informações nela contidas. Atualmente há vários quadros com a referida Carta, distribuídos entre as salas da Superintendência e das Gerências do referido Aeroporto.

Através do SIG, tornou-se possível a consulta de informações cadastradas de forma interativa, com visualização e possibilidade de medição de distâncias e determinação de coordenadas de objetos de interesse, além do cadastro de novas informações e produção de mapas temáticos. A partir da correlação entre dados temáticos, o SIG apresenta-se como ferramenta de apoio à decisão nas atividades aeroportuárias, facilitando a identificação de áreas possíveis de expansão do Sítio Aeroportuário, de impactos causados por novas construções na área patrimonial do aeroporto, análise de novas de implantações em áreas externas ao sítio aeroportuário em relação aos gabaritos de Zona de Proteção de Aeródromo e uso do SIG como ferramenta de auxílio visual para apresentação de estudos de caso em reuniões e palestras. Esta situação pode ser exemplificada através da correlação entre a projeção das áreas de expansão do Sítio

Aeroportuário do Aeroporto Internacional Salgado Filho em relação aos obstáculos contidos nas proximidades da Cabeceira 29. Esses dados podem ser verificados na Figura 39. Além da possibilidade de ampliação para análise detalhada, é possível consultar-se dados específicos sobre cada obstáculo contido na área de interesse sobre o SIG.

Através dos requisitos especificados no item 4.2.2 e técnicas de processamento apresentadas neste trabalho, foram estabelecidos parâmetros e critérios que possibilitam a correta utilização de imagens de alta resolução para o gerenciamento de zona de proteção de aeródromos. Através dessas especificações, atingiu-se o erro horizontal estimado de 2,6 m nas coordenadas da imagem, estabelecendo-se um padrão de referência para utilização de imagens de alta resolução para gerenciamento de zonas de proteção de aeródromos.

Comparando-se as imagens dos anos de 2001 (Figura 44) e 2008 (Figura 45), observa-se que houve expansão nas áreas invadidas no entorno do aeroporto, principalmente na área da Vila Nazaré, especificamente no trecho onde deverá ser instalado um dos equipamentos que compõe o Sistema de Pouso por Instrumentos (ILS), no período de 07 (sete) anos. As áreas destacadas em amarelo na Figura 50 representam a expansão urbana na área de interesse, em função da ampliação da pista e do Sítio Aeroportuário.



FIGURA 44 - IMAGEM DO ANO DE 2001



FIGURA 45 - IMAGEM DO ANO DE 2008

Considerando-se a possibilidade de expansão dos estudos aqui desenvolvidos para outras atividades que não apenas o controle de obstáculos no entorno de aeródromos, em estudos complementares, ao projetar-se as curvas de ruído, que são áreas nas quais estabelecem-se determinadas restrições de implantação em função dos níveis de ruído, foi observado que a imagem possuía o tamanho aquém ao da curva de ruído 2, conforme demonstrado na Figura 46, o que dificultou a utilização da mesma para estudos de ruído no entorno do aeroporto. Registra-se aqui que, para aplicações de imagens de alta resolução para gestão de atividades aeroportuárias é fundamental que se leve em consideração os limites de abrangência das curvas de ruído durante a especificação dos limites da área a ser imageada.

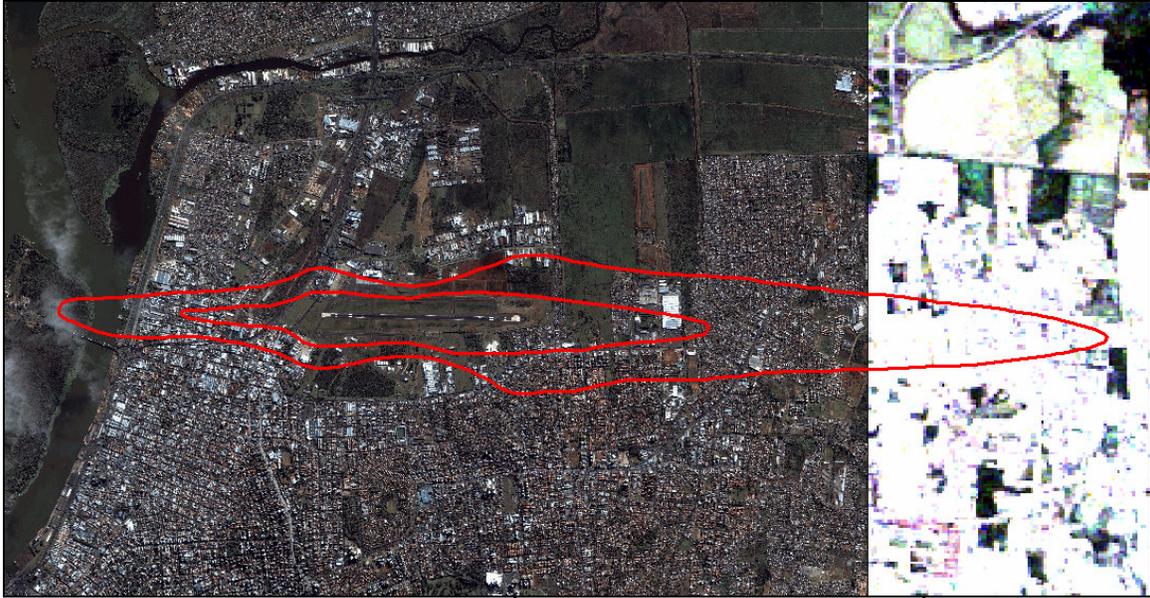


FIGURA 46 – ABRANGÊNCIA DAS CURVAS DE RUÍDO

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aspectos apresentados no item anterior definem claramente a diferença entre a utilização de imagens de alta resolução com as devidas correções geométricas em atividades que necessitam precisão nas medidas, em comparação com imagens disponibilizadas gratuitamente na WEB, através de softwares com aplicações lúdicas, porém sem qualquer compromisso com a qualidade técnica. Não há como garantir-se uma qualidade adequada de medidas ou acurácia nas coordenadas geográficas em um mosaico de imagens que não passou pelos devidos processos de georreferenciamento e ortorretificação. Por outro lado, a devida especificação para a aquisição de uma imagem de alta resolução, seguida dos passos aqui apresentados para o processamento da mesma, garante um alto nível de qualidade que torna viável a aplicação dessa moderna ferramenta para o gerenciamento de zonas de proteção de aeródromos.

Em relação aos erros envolvidos em levantamentos realizados através de topografia clássica, Camargo (2000) cita que mesmo cercado-se de precauções e cuidados especiais no momento da obtenção das observações durante um levantamento topográfico, estas vêm envolvidas dos inevitáveis erros de medidas, consequência da imperfeição do equipamento, falha humana e das condições ambientais nas quais se processa a mensuração. Comparando-se o uso de imagens de alta resolução com a topografia clássica para o gerenciamento de zonas de proteção de aeródromos, há vantagens no uso das imagens de alta resolução para os casos nos quais necessita-se identificar, a partir de uma posição geográfica, o limite de altitude para determinada implantação, pois essas determinações podem ser realizadas instantaneamente sobre a imagem, sem o envolvimento de custos. Caso haja necessidade de realização de levantamento por topografia clássica para tal determinação, há necessidade de contratação de uma empresa de topografia, o que demandará tempo para a contratação e para a execução dos levantamentos, além do custo dos serviços de topografia.

Assim, através de uma ferramenta que permita um entendimento e identificação das limitações de implantações no entorno dos aeroportos de forma mais rápida e facilitada por parte das autoridades que possuem responsabilidades no controle e fiscalização de implantações no entorno dos aeroportos e também através de uma técnica que possibilite a análise rápida e precisa sobre novas implantações, busca-se efetivar este trabalho como uma contribuição social. Os aeroportos menos suscetíveis à interferência de obstáculos tornam-se mais seguros e sem riscos de redução de comprimento de pista, cancelamento de procedimentos de aproximação por instrumentos ou elevação dos mínimos de teto e visibilidade exigidos para pouso e decolagem, e desta maneira, quanto menos restritos os aeroportos forem, maior será a capacidade para operações, o que contribui para o desenvolvimento das regiões atendidas pelos mesmos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNSTEIN, R, Image Geometry and Rectification. In R, N Colwell (Ed.) Manual of Remote Sensing, 2c, Charter 21, Falls Church, Va American Society of Photogrametry, Virginia. 1983;

BRASIL, Decreto 21.713, de 27 de agosto de 1946;

BRASIL, Lei 8.666, de 21 de junho de 1993;

BRASIL, Portaria N.º 68/DGCEA, de 02 de maio de 2005 – Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo de Porto Alegre e Canoas;

BRASIL, Portaria n.º 889/MD, de 06 de junho de 2008;

BRASIL, Portaria 1.141/GM-5, de 08 de dezembro de 1987;

BRASIL, Resolução N. 4/1995 - CONAMA – Áreas de Segurança Aeroportuária – ASA;

BURROUGH, P. A. - Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment 1986;

CAMARGO, Paulo de Oliveira – Ajustamento de Observações – Notas de Aula – UNESP – 2000;

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING – Fundamentals of Remote Sensing – 2005 – 258p.;

CELESTINO, Vivian – Padrão de Exatidão de Mapeamento para Imagens do Sensor Quickbird – Dissertação de Mestrado – CEPSSRM, 105 p. – Porto Alegre - 2007;

CRÓSTA, A.P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas: UNICAMP, 170p. 1992;

D'ALGE, J. C. L. Correção Geométrica de Imagens de Sensoriamento Remoto. Notas de aula. 2006;

DA SILVA, Heloisa Alves; MONICO, João Francisco Galera - Ajustamento De Redes Gps Em Conformidade Com As Exigências Da Lei 10.267/2001 – V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas – Presidente Prudente – 2007 - p 130 - 136;

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION -DOC 8168 – PANS-OPS - Construction of Visual and Instrument Flight Procedures – Canada – 2006 – 783p;

GEMAEL, Camil- Introdução ao ajustamento de observações: Aplicações Geodésicas. Curitiba: Editora da UFPR, 1994 – 319 p;

GURTNER, Verner – RINEX - The Receiver Independent Exchange Format - Version 3.00 - Astronomical Institute University of Bern – 2007;

INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ANNEX 14 – Aerodrome Design and Operations – 2006 – 231p;

ISHIKAWA, M. I. Potencialidade de Uso de Imagens IKONOS/GEO para Aplicações em Áreas Urbanas Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001. 82 p.

MEIRA et Al – Fiscalização de Processos de Uso e Ocupação do Solo em Áreas de Segurança Aeroportuária Utilizando Sistemas de Informações Geográficas – UFV – MG, 2001;

MONICO, João Francisco Galera – Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações – 2ª. Edição – Editora UNESP – 2007- 476p;

MOREIRA, Mauricio Alves – Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação – INPE – 2001- 250p;

MOURA, Ana Clara Mourão – Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano – UFMG – 2003 – 294p;

PATROCÍNIO, Raphael- Análise Quantitativa de Pontos de Controle para Correção Geométrica de Imagens Orbitais – Dissertação de Mestrado – UFRGS – 2004 - 126p;

PEREIRA, R. – A Estatística E Suas Aplicações. Editora Grafosul. Porto Alegre, RS; 1978 – 662p;

REIS ET AL – Uso de produtos de Sensoriamento Remoto gratuitos na Representação do Relevo – um potencial para a educação - Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 1337-1344.

RICHARDS, John ; JIA, Xiuping – Remote Sensing Digital Image Analysis – 2006 – 454p;

ROCHA. R., - Exatidão Cartográfica Para As Cartas Digitais Urbanas. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, SC. 2002, 128p;

SILVA, Antonio Machado E – Curso de Processamento Digital de Imagens de Satélite – XX CBC – 2001 – 68p;

SILVA, Antonio Machado E - O uso de polinômios racionais na ortorretificação de imagens de satélite - XIII CBC – 2007 – p.1289 a 1295;

Sítio de Internet da Agência Espacial Européia – ESA: [http://www.esa.int/esaCP/SEM9F1JTYRF\\_Portugal\\_1.html](http://www.esa.int/esaCP/SEM9F1JTYRF_Portugal_1.html); Acesso em Janeiro de 2010;

Sítio de Internet da DIGITAL GLOBE: [www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com); Acesso em Janeiro de 2010;

Sítio de Internet da GEOEYE: [www.geoeeye.com](http://www.geoeeye.com); Acesso em Janeiro de 2010;

Sítio de Internet do IBGE – Apresentações – “O que é”:  
<http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/atlascolar/apresentacoes/oquee.swf>; Acesso em Janeiro de 2010;

Sítio de Internet do SRTM – NASA: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2>; Acesso em Janeiro de 2010;

ZANARDI, Rafael – Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS 2B e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas – Dissertação de Mestrado - UFRGS - 2006 - 94p.

# ANEXO

## COORDENADAS DOS MARCOS ESTABELECIDOS PELO ICA NO AEROPORTO INTERNACIONAL SALGADO FILHO



COMANDO DA AERONÁUTICA  
INSTITUTO DE CARTOGRAFIA AERONÁUTICA  
LISTA DE COORDENADAS

Cod. Loc: 328

Ponto (s)	Coordenadas Planas Projeção UTM SAD-69		Coordenadas Geográficas SAD-69		Coordenadas Geográficas WGS-84		Altitude (m)		Data	Topógrafo	Revisor	Eng <sup>o</sup> CREA
	NORTE	ESTE	LATITUDE	LONGITUDE	LATITUDE	LONGITUDE	Base	Topo				
	Personalizada											
CAB-11	6.681.867,240	482.397.090	29° 59' 37,9694" S	51° 10' 57,0018 W	29° 59' 39,7719 S	51° 10' 58,8435 W	3,41	-x-	06/1999	2S Plaza		-x-x-x
CAB-11 (TAXI)	6.682.063,880	483.025,190	29° 59' 31,6128" S	51° 10' 33,8500 W	29° 59' 33,4154 S	51° 10' 35,3914 W	3,04	-x-	04/2004	3S Figueiredo		-x-x-x
CAB-29	6.681.818,550	484.675,570	29° 59' 39,6616" S	51° 09' 31,9638 W	29° 59' 41,4644 S	51° 09' 33,8048 W	3,43	-x-	06/1999	2S Plaza		-x-x-x
CAB-29 (TAXI)	6.682.036,050	484.325,140	29° 59' 32,5793" S	51° 09' 45,0316 W	29° 59' 34,3821 S	51° 09' 46,8726 W	3,39	-x-	04/2004	3S Figueiredo		-x-x-x
AP-1049 (INS)	6.682.216,860	482.759,990	29° 59' 26,6294" S	51° 10' 43,4391 W	29° 59' 28,4319 S	51° 10' 45,2806 W	2,96	-x-	08/2005	2S Moacyr		-x-x-x
AP-112	6.682.295,550	482.646,420	29° 59' 24,0671" S	51° 10' 47,6709 W	29° 59' 25,6696 S	51° 10' 49,5124 W	2,47	-x-	11/1991	Rodrigues		-x-x-x
AP-114	6.682.258,940	482.534,990	29° 59' 25,2508" S	51° 10' 51,8941 W	29° 59' 27,0533 S	51° 10' 53,6756 W	2,69	-x-	11/1991	Rodrigues		-x-x-x
AP-1144 (INS)	6.682.112,170	482.978,190	29° 59' 30,0416" S	51° 10' 35,2992 W	29° 59' 31,8442 S	51° 10' 37,1406 W	2,63	-x-	08/2005	2S Moacyr		-x-x-x
AP-1161 (INS)	6.682.086,880	482.555,230	29° 59' 30,8418" S	51° 10' 51,0866 W	29° 59' 32,6443 S	51° 10' 52,9291 W	2,39	-x-	08/2005	2S Moacyr		-x-x-x
AP-401	6.682.333,830	482.572,640	29° 59' 22,8197" S	51° 10' 50,4223 W	29° 59' 24,6222 S	51° 10' 52,2638 W	2,62	-x-	11/1991	Rodrigues		-x-x-x
AP-951 (ARP)	6.681.914,390	483.537,040	29° 59' 36,4947" S	51° 10' 14,4525 W	29° 59' 38,2973 S	51° 10' 16,2938 W	2,22	-x-	06/1999	2S Plaza		-x-x-x
INS-1 (AP-110)	6.682.147,000	482.501,620	29° 59' 28,8859" S	51° 10' 53,0839 W	29° 59' 30,6884 S	51° 10' 54,9255 W	2,67	-x-	11/1991	Rodrigues		-x-x-x
INS-2 (AP-111)	6.682.220,820	482.608,990	29° 59' 26,4931" S	51° 10' 49,0745 W	29° 59' 28,2956 S	51° 10' 50,9160 W	2,45	-x-	11/1991	Rodrigues		-x-x-x
QFE	6.681.818,380	483.700,640	29° 59' 39,6217" S	51° 10' 08,3517 W	29° 59' 41,4244 S	51° 10' 10,1929 W	3,11	-x-	04/2004	3S Figueiredo		-x-x-x
QFE-GS	6.681.766,380	482.705,960	29° 59' 41,2620" S	51° 10' 45,4797 W	29° 59' 43,0646 S	51° 10' 47,3212 W	0,88	-x-	04/2008	1S MOACYR	Ten. Quirino PR-89106/D	
THD DVOR PCA RADIAL 290 <sup>o</sup>	6.681.708,050	484.019,250	29° 59' 43,2213" S	51° 09' 56,4660 W	29° 59' 45,0241 S	51° 09' 58,3072 W	1,93	4,85	06/2000	Correa		-x-x-x
THD GLIDE IPA	6.681.772,570	482.699,080	29° 59' 41,0606" S	51° 10' 45,7361 W	29° 59' 42,9631 S	51° 10' 47,5776 W	2,28	-x-	08/2000	3S Figueiredo		-x-x-x
THDVCR ANTIGO	6.682.161,460	484.271,280	29° 59' 28,5025" S	51° 09' 47,0348 W	29° 59' 30,3052 S	51° 09' 48,8758 W	6,20	-x-	06/1999	2S Plaza		-x-x-x