

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA - MEAU

ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO POR MEIO DA
MODELAGEM HIDRÁULICA NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE
INUNDAÇÃO.

Santiago Henrique Anjos Soares Nascimento

Salvador
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA - MEAU

ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO POR MEIO DA
MODELAGEM HIDRÁULICA NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE
INUNDAÇÃO.

Santiago Henrique Anjos Soares Nascimento

Dissertação apresentada ao **MESTRADO
EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA -
MEAU** como requisito parcial à obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA
AMBIENTAL URBANA.

Orientador: Prof. Dr. Mauro José Alixiandrini Jr.

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível
Superior (CAPES)

Salvador
2017

Modelo de ficha catalográfica fornecido pelo Sistema Universitário de Bibliotecas da UFBA para ser confeccionada pelo autor

N244 Nascimento, Santiago Henrique Anjos Soares
Análise de Modelos Digitais de Terreno por meio da
modelagem hidráulica na definição de áreas de risco de
inundação. / Santiago Henrique Anjos Soares Nascimento. --
Salvador, 2017.
108 f.

Orientador: Mauro José Alixiandrini Junior.
Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia Ambiental
Urbana - MEAU) -- Universidade Federal da Bahia, Escola
Politécnica, 2017.

1. Modelagem hidráulica. 2. MDT. 3. Mancha de inundação. 4.
GNSS. 5. VANT. I. José Alixiandrini Junior, Mauro. II. Título.

DEDICATÓRIA

“À família maravilhosa que tenho”

FORMAÇÃO DO CANDIDATO

Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo, formado pela Universidade Federal da Bahia, UFBA (2015) e Urbanista, formado pela Universidade do Estado da Bahia, UNEB (2011).

*Nasce o sol a 2 de julho
Brilha mais que no primeiro
É sinal que neste dia
Até o sol é brasileiro*

*Nunca mais o despotismo
Regerá nossas ações
Com tiranos não combinam
Brasileiros corações*

*Salve, oh! Rei das Campinas
De Cabrito a Pirajá
Nossa pátria hoje livre
Dos tiranos não será*

*Nunca mais o despotismo
Regerá nossas ações
Com tiranos não combinam
Brasileiros corações*

*Cresce, oh! Filho de minha alma
Para a pátria defender
O Brasil já tem jurado
Independência ou morrer*

Hino da Bahia

“Todo efeito tem uma causa. Todo efeito inteligente tem uma causa inteligente. O poder da causa inteligente está na razão da grandeza do efeito.”

Allan Kardec

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SANTIAGO HENRIQUE ANJOS SOARES NASCIMENTO APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E URBANA, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 07 DE MARÇO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro José Alixiandrini Jr
Orientador
PPEC - UFBA

Prof.(a) Dr.(a) Vivian Oliveira Fernandes
PPEC - UFBA



Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira
PPGTG - UFSC

AGRADECIMENTOS

À família,

Aos amigos,

À Universidade Federal da Bahia

Ao Orientador Prof. Dr. Mauro Aليxiandrini, pelos ensinamentos, amizade e por ser um exemplo de profissional aos que estão ao seu redor,

Aos professores do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia,

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, em especial a Patrícia Lustosa, Ilce Dantas e Juan Moreno pelo apoio no decorrer do mestrado,

Aos professores e funcionários do Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana em especial a Coordenadora Prof. Dr. Vivian Fernandes,

Ao Prof. Dr. Lafayette Dantas da Luz pelas fundamentais contribuições no decorrer do trabalho,

Ao Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira por fazer parte da banca examinadora deste trabalho,

Ao meu irmão Cícero por realizar a fundamental revisão dos erros gramaticais e concordâncias,

Ao ex-prefeito do Município de Lajedinho Antonio Mário e aos munícipes pelo apoio nos trabalhos de campo,

Ao amigo Alexandre Aquino pelo auxílio no levantamento com o VANT em Lajedinho,

As colegas e amigas da pós-graduação Laiz Cunha e Nathale Andrade por ter o desafio de estudar este tema comigo,

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro em parte do Mestrado.

NASCIMENTO, S. H. A. S.; **Análise de Modelos Digitais de Terreno por meio da modelagem hidráulica na definição de áreas de risco de inundação.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana. Salvador, Bahia, 2017.

RESUMO

O Brasil encontra-se entre os países do mundo mais atingidos por inundações e enchentes. Com o intuito de priorizar a redução dos riscos de desastres naturais, existe a necessidade de reorientar os esforços sobre o desenvolvimento de estratégias e ações para a redução do risco hidrológico investindo na evolução tecnológica com o intuito de aumentar a resiliência das comunidades mais susceptíveis ao risco. A pesquisa concentra seu estudo no canal do Rio Saracura onde a cidade de Lajedinho está localizada, esta, que em dezembro de 2013 foi atingida por uma inundação, onde as margens do rio foram ocupadas, ocasionando a destruição de casas e equipamentos urbanos, causando irreparáveis danos sociais, econômicos e naturais, assim como, dezessete vítimas fatais. A proposta deste trabalho baseia-se na utilização e análise dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) derivados de imagens SRTM, de levantamento GNSS e por imageamento com Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) aplicado a uma modelagem hidráulica para definição de áreas de risco de inundação. O escoamento no canal do rio Saracura foi modelado utilizando a equação da Energia, considerando o fluxo unidimensional e o regime permanente implementado no *software* HEC-RAS 5.0.3. Realizou-se a simulação da mancha de inundação da cheia de dezembro de 2013 observada em Lajedinho-Ba, comparando com dados de relatórios da época. Foram realizadas comparações entre as manchas de inundação geradas por MDT obtido por diferentes métodos de aquisição referentes às vazões máximas associadas aos períodos de retorno de 100, 300, 650, 1000 anos. A análise das discrepâncias das coordenadas do MDT-GNSS e MDT-SRTM atingiram resultados melhores que os esperados nesta pesquisa, a média das discrepâncias analisadas foi de 2.60m sendo menores que as discrepâncias utilizando o MDT-VANT de 4.12m. A calibração do coeficiente de *Manning* (n)

no Rio Saracura-Ba foi balizada na comparação entre as alturas do nível d'água medidas em campo e as simuladas, os resultados mostram que a variação em área assemelha-se a uma progressão aritmética, alternando em média 4.000m^2 com a modificação do coeficiente; para uma vazão de $183,61$ (m^3/s) a maior diferença em área chega a $17.382,35\text{ m}^2$. A maior diferença na área encontrada na mancha de inundação utilizando o MDT-SRTM e o MDT-GNSS na modelagem hidráulica foi $16.347,75\text{m}^2$ (19,11%), já utilizando o MDT-VANT e o MDT-GNSS foi $13.706,61\text{m}^2$ (24,70%). A simulação da mancha de inundação ocorrida em 2013 com dados de posicionamento GNSS (mais precisa) quando comparada com a área da poligonal gerada pela equipe da UFBA através da interpolação dos pontos coletados em campo, apresenta diferença em área de valores que chegam a $22.694,25\text{m}^2$ (22,08%) e em perímetro 75.84m (2,90%). Apesar do canal não ter sido apresentado com detalhamento de projeto, é possível observar que o mesmo não comporta a vazão de cheia do tempo de recorrência estudado, mostrando-se insuficiente para confinar o escoamento em sua calha, assim como, existem trechos do canal que não estão localizados no ponto de altitude mais baixa. Constata-se que atualmente ainda há residências em áreas de risco com a necessidade de serem relocadas.

Palavras-chave: Modelagem hidráulica, MDT, Mancha de inundação, GNSS, VANT, SRTM.

NASCIMENTO, S. H. A. S.; **Analysis of Digital Terrain Models through hydraulic modeling in the definition of flood risk areas.** Dissertation (Master degree) - Federal University of Bahia, Masters in Environmental and Urban Engineering. Salvador, Bahia, 2017.

ABSTRACT

Brazil stay among countries around the world most affected by floods and overflows. In order to prioritize natural disasters risks reduction, efforts to on development of strategies are needed and actions to reduce hydrological risk. Also investing in technological developments in order to increase the resilience of communities most susceptible to risk are useful. The research study the Saracura River channel where cross Lajedinho city. In December of 2013 this city was reached by a flood, causing the destruction of houses and urban equipment, irreparable Social, economic and natural damages, as well as seventeen fatalities. The work proposal is on the use and analysis of Digital Terrain Models (MDT) derived from SRTM images, GNSS surveying and imaging with unmanned aerial vehicle (UAV) applied to a hydraulic modeling to describe inundation risk areas. The Saracura River channel flow was modeled using the Energy equation, considering one-dimensional flow and permanent regime implemented in HEC-RAS 5.0.3 software. The floodplain simulation of the December 2013 flood observed in Lajedinho-Ba was carried out, comparing with data from reports. The work compared flood spots are generated by MDT obtained by different acquisition methods referring to the maximum flows associated with the return periods of 100, 300, 650, 1000 years. The analysis of MDT-GNSS and MDT-SRTM coordinate discrepancies achieved better results than expected in this study, the average of the discrepancies analyzed was 2.60m, being smaller than the discrepancies using MDT-VANT of 4.12m. The calibration of Manning coefficient (n) in Saracura-Ba River was based on comparison between water level heights measured in field and those simulated, results show that variation in area resembles an arithmetic progression, alternating An average of 4,000m² with coefficient modification; For a flow of 183.61 (m³ / s), the largest difference in area amounts to 17,382.35 m². The

largest difference in area in the floodplain using MDT-SRTM and MDT-GNSS in hydraulic modeling was $16,347.75\text{m}^2$ (19.11%), using MDT-VANT and MDT-GNSS was $13,706.61\text{m}^2$ (24.70%). The simulation of the flood spot occurred in 2013 with GNSS (more precise) positioning data when compared to the area of the polygon generated by UFBA team through the interpolation of points collected in field, presents a difference in area of values that reach $22,694,25\text{m}^2$ (22.08%) and in perimeter 75.84m (2.90%). Although the channel was not presented with detailed design, it is possible to observe that it does not contain the filling flow of the studied recurrence time, showing insufficient to confine the flow in its channel, as well as, there are sections of the channel that are not located at the lowest altitude point. It is noticed that currently there are still residences in risk areas with the need to be relocated.

Keywords: Hydraulic modeling, MDT, Flood spot, GNSS, UAV, SRTM.

SUMÁRIO

	Pág.
BANCA EXAMINADORA	vi
AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
SUMÁRIO	xii
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
ÍNDICE DE QUADROS	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipóteses	4
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo Geral.....	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 Estrutura do Trabalho.....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Desastres Naturais.....	7
2.2 Modelos Hidrodinâmicos.	11
2.3 Sensoriamento Remoto – SRTM.....	17
2.4 Levantamento Geodésico – GNSS	18
2.4.1 Definição:.....	18
2.4.2 Princípio do posicionamento GNSS.....	19
2.4.3 Métodos e Técnicas de Posicionamento GNSS.	23
2.4.4 Altimetria através de Posicionamento GNSS.	28
2.5 Fotogrametria – VANT.....	29
2.6 Modelo Digital do Terreno	35
2.6.1 Processo de geração de um MDT.	36

2.6.2	Modelos Digitais Terreno em Modelagem Hidráulica	42
3	ÁREA DE ESTUDO.....	44
4	METODOLOGIA DA PESQUISA	49
4.1	Materiais.....	49
4.2	Métodos.....	50
4.2.1	Modelo Digital do Terreno - Levantamento Geodésico – GNSS..	52
4.2.2	Modelo Digital do Terreno - Imagens SRTM	55
4.2.3	Modelo Digital do Terreno - Levantamento Aerofotogramétrico - VANT	55
4.2.4	Dados hidrológicos	66
4.2.5	Modelagem Hidráulica.....	67
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	71
5.1	Modelos Digitais de Terreno.....	71
5.2	Acurácia dos Modelos Digitais do Terreno	73
5.3	Calibração do coeficiente de Manning	79
5.4	Modelagem Hidráulica.....	80
5.5	Comparação entre as manchas de inundação para as vazões máximas dos Tempos de Recorrência.....	85
5.6	Comparações entre as manchas de inundação produzidas pelos três MDTs estudados e as vazões máximas dos Tempos de Recorrência.	88
5.7	Comparação e análises da simulação da mancha de inundação de dezembro de 2013 com dados de relatórios da época.....	93
5.8	Simulação da inundação na área atual da cidade de Lajedinho.	97
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	99
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	103
8	REFERÊNCIAS.....	104
9	APÊNDICES.....	108

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1: Precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, equipamento utilizado e comprimento da linha de base.	27
Tabela 2: Vazão máxima para cada tempo de recorrência estudado.	66
Tabela 3: Resultados das diferenças das altitudes entre o MDT-GNSS e o MDT-SRTM dos 62 pontos selecionados.....	75
Tabela 4: Resultados - Estatísticas Descritivas das Discrepâncias das Altitudes (GNSS – SRTM).	76
Tabela 5: Resultados das diferenças das altitudes entre o MDT-GNSS e o MDT-VANT dos 61 pontos selecionados.	77
Tabela 6: Resultados - Estatísticas Descritivas das Discrepâncias das Altitudes (GNSS – VANT).....	78
Tabela 7: Média e Desvio Padrão da diferença entre as alturas do nível d'água (m) medidas em campo e simuladas com a variação do coeficiente de Manning.	79
Tabela 8: Área da mancha de inundação com a variação do coeficiente de <i>Manning</i> e a vazão máxima.	80
Tabela 9: Área das manchas de inundação de acordo com o MDT e Vazões máximas utilizados na modelagem.	91
Tabela 10: Discrepância da área da Mancha de Inundação utilizando MDT-SRTM e MDT-GNSS, relacionada à vazão máxima do Tempo de Recorrência.....	92

Tabela 11: Discrepância da área da Mancha de Inundação utilizando MDT-VANT e MDT-GNSS, relacionada à vazão máxima do Tempo de Recorrência.....	92
Tabela 12: Pontos onde a equipe da UFBA coletaram as cotas de inundação.	94
Tabela 13: Comparação da área da Mancha de Inundação para a Vazão Máxima (Tr 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de Dezembro de 2013 com a Mancha de Inundação gerada pela equipe da UFBA.	96

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Informações resultantes da modelagem hidráulica.	85
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.	10
Figura 2: Representação de termos na Equação da Energia	15
Figura 3: Ilustração da geometria do posicionamento por satélites.	20
Figura 4: Princípio do Posicionamento por Ponto	22
Figura 5: Métodos e técnicas de posicionamento por GNSS.	24
Figura 6: Posicionamento Relativo.....	26
Figura 7: Relação das Superfícies Geoide e Elipsoide.	29
Figura 8: Diferença entre MDT e MDS.....	36
Figura 9: Principais conceitos utilizados para filtragem de nuvem de pontos. ..	37
Figura 10: Modelo de grade regular retangular.	39
Figura 11: Modelo de grade irregular triangular.	41
Figura 12: Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay.....	42
Figura 13: Localização do município de Lajedinho - BA.	45
Figura 14: Localização do município de Lajedinho no Piemonte do Paraguaçu.	45
Figura 15: Cidade de Lajedinho construída ao redor do canal do Rio Saracura.	46
Figura 16: Aspectos do Rio Saracura na área urbana da cidade após a enchente.	47
Figura 17: Destruição na cidade de Lajedinho.	48

Figura 18: Procedimentos Metodológicos da Pesquisa.	52
Figura 19: Aspectos da medição com receptores GNSS.	53
Figura 20: Os pontos em vermelho representam a disposição espacial do levantamento realizado pela Equipe da UFBA; os pontos em roxo indicam onde foram medidas as alturas máximas da enchente.	54
Figura 21: Planejamento e Linhas de voo executadas em Lajedinho, tela do <i>software</i> Pixel4D Capture.	57
Figura 22: Pontos de Apoio coletados em campo, alvos pré-sinalizados (cerâmica de 16x16cm) e feições urbanas fotoidentificáveis.	60
Figura 23: Pontos de Apoio utilizados no processamento fotogramétrico.	61
Figura 24: Geometria e seções transversais da área de estudo.	69
Figura 25: MDT obtido através do levantamento planialtimétrico GNSS.	71
Figura 26: MDT obtido através das Imagens de Radar – SRTM.	72
Figura 27: MDT obtido através da Fotogrametria com VANT.	72
Figura 28: Grade regular de 80 pontos, construída para as comparações da altitude dos pontos.	73
Figura 29: Localização dos pontos retirados da análise final (MDT-SRTM - MDT- GNSS).	76
Figura 30: Localização dos pontos retirados da análise final (MDT-SRTM - MDT- VANT).	78
Figura 31: Perfil da seção na estaca 263,4785m para vazão máxima de 86,89 m ³ /s.	82
Figura 32: Perfil da seção na estaca 957,4235m para vazão máxima de 86,89 m ³ /s.	82

Figura 33: Perfil da modelagem hidráulica para vazão máxima de 86,89 m ³ /s.	83
Figura 34: Imagem em perspectiva 3D da mancha de inundação.	84
Figura 35: Poligonais geradas utilizando o MDT-GNSS para as vazões máximas relacionadas aos TRs: 1000,650,300 e 100 anos.....	86
Figura 36: Poligonais geradas utilizando o MDT-SRTM para as vazões máximas relacionadas aos TRs: 1000,650,300 e 100 anos.....	87
Figura 37: Poligonais geradas utilizando o MDT-VANT para as vazões máximas relacionadas aos TRs: 1000,650,300 e 100 anos.....	87
Figura 38: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 100 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.	88
Figura 39: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 300 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.	89
Figura 40: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 650 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.	89
Figura 41: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 1000 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.	90
Figura 42: Mancha de Inundação e nível d'água para a vazão máxima (Tr 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de dezembro de 2013.....	93
Figura 43: Espacialização dos pontos onde a equipe da UFBA coletou as cotas de inundação.	95

- Figura 44: Mancha de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de Dezembro de 2013 com a Mancha de Inundação gerada pela equipe da UFBA.....95
- Figura 45: Mancha de Inundação para a Vazão Máxima (Tr 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de Dezembro de 2013 na área atual da cidade de Lajedinho.98

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AIC	Circular de Informações Aeronáuticas
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
CA	<i>Coarse Acquisition</i>
CEAC	Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica
CONDER	Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DOD	<i>Department of Defense</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DETG	Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia
DLR	<i>Deustches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
EIRD	<i>Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres</i>
EM-DAT	<i>International Disaster Database Emergency Events Database</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
GRAU	Grupo de Riscos Ambientais e Urbanos
HEC	<i>Hydrologic Engeenering Center</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
InSAR	<i>Interferometric synthetic aperture radar</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LABGEO	Laboratório de Geomensura Theodoro Sampaio
LABMAP	Laboratório de Mapeamento, Cartografia e SIG
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MEC	Ministério da Educação
MDA	Modelo Digital de Altura
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
MNT	Modelo Numérico do Terreno
NA	Nível de Água.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
P	<i>Precise code</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PDDU	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano
RAS	<i>River Analysis System</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPAS	Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SEI	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais do Estado da Bahia
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
TPT	Tamanho do Pixel no Terreno
TR	Tempo de Recorrência
UAS	Unidade Aérea de Segurança
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
UFBA	Universidade Federal da Bahia
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado

1 INTRODUÇÃO

Desde 2008, metade da população mundial reside em cidades, em 2030 espera-se que este número aumente para 5 bilhões de pessoas (HODGSON, 2011). No Brasil a urbanização intensificou-se na segunda metade do século XX, a partir da década de 1960 a população urbana tornou-se superior à rural (BRITO, 2006). Este processo de urbanização não foi acompanhado de políticas públicas de desenvolvimento urbano que tivessem o objetivo de prover moradia em lugares adequados para toda a população.

A interação entre a natureza e os espaços construídos provocam alterações na superfície, gerando mudanças na geomorfologia, clima, hidrologia entre outros. O crescimento urbano em áreas inapropriadas para uso e ocupação podem ocasionar desastres naturais, como inundações e deslizamentos de terra. Portanto, uma gestão do território adequada deve buscar a otimização de recursos e redução de perdas, devendo basear-se, necessariamente, no conhecimento das potencialidades e limitações do meio físico frente às intervenções antrópicas.

Em todo o mundo 102 milhões de pessoas são afetadas todos os anos pelas enchentes e quase 366 mil por deslizamentos de terra. As inundações contabilizam 15% de todas as mortes causadas por desastres naturais (ONU, 2012). No Brasil os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são os deslizamentos de encostas e as inundações, que estão associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados. Enquanto as inundações são responsáveis por grandes perdas econômicas e por impactos mais significativos na saúde pública, os deslizamentos geram o maior número de vítimas fatais (BRASIL, 2006).

Pelo menos 48 mil pessoas no Estado da Bahia perderam suas casas entre 2008 e 2012 em função de desastres naturais provocados por chuvas fortes, deslizamentos de terra e alagamentos. Nesse período, pelo menos 42% das 417 cidades baianas sofreram com alagamentos, 10% com deslizamentos de terra e 13% com enchentes; estes dados fazem parte da Pesquisa de Informações Básicas Municipais (IBGE, 2013). No Brasil, segundo a pesquisa

do IBGE, as enchentes atingiram 1.543 municípios (27,7%) em cinco anos, totalizando 1,4 milhão de pessoas desabrigadas ou desalojadas. Além disso, 41% das cidades tiveram pelo menos um desastre natural. Esses fatos justificam a concepção e implantação de políticas públicas municipais específicas para a gestão de riscos hidrológicos.

De acordo com The International Disaster Database Emergency Events Database EM-DAT, o Brasil encontra-se entre os países do mundo mais atingidos por inundações e enchentes, entretanto uma pesquisa realizada por Carmo e Anazawa (2014) identificou que o número de desastres ocorridos no Brasil pode ser bem mais elevado do que os contabilizados no banco de dados de desastres naturais EM-DAT.

O EM-DATA adota uma classificação geral para os desastres naturais dividindo-os em subgrupos de acordo com a sua origem. Subdividem-se em: geofísicos, climatológicos, hidrológicos, meteorológicos e biológicos (SAUSEN e LACRUZ, 2015). Esta pesquisa terá como foco principal de análise o subgrupo de desastres hidrológicos, os quais podem ser definidos como eventos causados por alterações no ciclo normal da água e/ou por transbordamento de sistemas hídricos por ação dos ventos. Os desastres naturais associados a este subgrupo são principalmente a inundação e o movimento de massa (úmido).

Com o intuito de priorizar a redução dos riscos de desastres naturais, existe a necessidade de reorientar os esforços sobre o desenvolvimento de estratégias e ações para a redução do risco hidrológico investindo na evolução tecnológica com o intuito de aumentar a resiliência das comunidades mais susceptíveis a este risco, através também da colaboração de toda a sociedade. Esta pesquisa apresenta vinculação com o “Programa de Redução de Riscos e Desastres para o Estado da Bahia” - ProExt/MEC, este que destina-se à estudar e criar elementos preliminares no que se refere à prevenção de desastres e redução de riscos, no estado da Bahia. Dentre outras ações, o programa visa o levantamento aerofotogramétrico com veículo aéreo não tripulado, na região dos quatro aglomerados selecionados como prioritários, que são os municípios de: Lajedinho, Lençóis, Palmeiras e Seabra.

A presente pesquisa concentra seu estudo no canal do Rio Saracura onde a cidade de Lajedinho está localizada, este, em dezembro de 2013 foi atingido por chuvas torrenciais que elevaram substancialmente o nível do rio Saracura, onde precipitou entre 120mm e 130 mm no sábado do dia 07 de dezembro, segundo informações registradas no relatório intitulado “Lajedinho: inundação de 2013”, produzido pelo Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica e pelo Grupo de Riscos Ambientais e Urbanos (GRAU), ambos vinculados à Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA, 2013). Deste modo, ocorreu inundação na sede municipal, onde as margens do rio Saracura foram ocupadas, ocasionando a destruição de casas e equipamentos urbanos, causando irreparáveis danos sociais, econômicos e naturais, assim como, dezessete vítimas fatais.

A proposta deste trabalho baseia-se na utilização das informações cartográficas, Modelo Digital de Terreno derivados de dados SRTM, de levantamento GNSS e por imageamento com Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) aplicado a uma modelagem hidráulica para definição de áreas de risco de inundação. Este estudo fornecerá informações para os especialistas sobre qual técnica de aquisição de dados do terreno utilizar para subsidiar uma modelagem hidráulica, já que está associada ao nível de precisão do modelo do terreno e o tipo de estudo necessário. Por exemplo, se é necessário um estudo hidrológico prever apenas uma caracterização geral das áreas atingidas sem um alto nível de detalhes da mancha de inundação, pode bastar um modelo digital de terreno, baseado em imagens SRTM e/ou Fotogrametria com VANT. Mas, se o estudo é para fins de projeto executivo hidráulico, exigindo um levantamento do terreno e áreas no entorno, o levantamento pode ser baseado na topografia clássica e/ou levantamentos GNSS. Os especialistas precisam conhecer os resultados com ambas as alternativas aplicando um ou outro modelo de terreno, tendo consciência do seu alcance e limitações para cada tipo de aplicação.

Este estudo produz ainda informações espaciais necessárias para a tomada de decisões com vistas à mitigação dos efeitos das recorrentes cheias e inundações presentes nestas áreas. A partir da delimitação das áreas

inundáveis associadas ao risco hidrológico das enchentes e inundações, pode-se, por exemplo, definir áreas inapropriadas para a ocupação humana, ou ainda definir as medidas complementares necessárias e mais adequadas para mitigar o efeito das cheias nas áreas de maior risco.

A metodologia adotada e proposta no presente trabalho podem ser reproduzidas para outras regiões de interesse, sendo uma ferramenta importante para subsidiar o planejamento e gestão dos municípios, a exemplo dos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano, exigência do Governo Federal para cidades com mais de 20.000 mil habitantes (Lei nº 10.257/2001 - Estatuto da Cidade). Segundo o Estatuto da Cidade em seu artigo 41º é obrigatório que as cidades integrantes de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas, as incluídas no cadastro nacional de Municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos, as pertencentes a áreas de especial interesse turístico e, ainda, as inseridas na área de influência de empreendimentos ou atividades com significativo impacto de âmbito regional ou nacional elaborem seus respectivos planos diretores, mesmo que tenham menos de vinte mil habitantes.

1.1 Hipóteses

A metodologia desta pesquisa busca responder a respeito da possibilidade de, por meio da modelagem hidráulica e a partir de informações cartográficas produzidas pela Fotogrametria com VANT, se definir manchas de inundação de regiões de interesse com melhor exatidão que manchas geradas com dados derivados do SRTM, sendo bem mais próximas às manchas de inundação com base no Posicionamento GNSS, já que os modelos obtidos por Fotogrametria com VANT podem atingir níveis sub-métricos de precisão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho apresenta como principal objetivo analisar três modelos digitais de terreno: derivado de dados SRTM, de levantamento GNSS e por imageamento com VANT aplicado a uma modelagem hidráulica para definição de áreas de risco de inundação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Modelar o escoamento no canal do rio Saracura, utilizando a equação da Energia, considerando o fluxo unidimensional e o regime permanente implementado no *software* computacional HEC-RAS 5.0.3;
- b. Simular a mancha de inundação da cheia de dezembro de 2013 observadas em Lajedinho-Ba;
- c. Comparar as simulações das manchas de inundação de dezembro de 2013 com dados de relatórios da época;
- d. Comparar as manchas de inundação geradas por Modelos Digitais de Terreno obtido por diferentes métodos de aquisição referentes às vazões máximas associadas aos períodos de retorno de 100, 300, 650, 1000 anos;
- e. Discutir a influência do coeficiente de rugosidade de *Manning* nas manchas de inundação estudadas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta pesquisa está dividida em 9 capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma introdução à pesquisa mostrando tema e sua justificativa, em seguida, apresentam-se os objetivos gerais e específicos a serem alcançados.

O segundo capítulo trás o referencial teórico-metodológico necessário para conhecer mais sobre o objeto de estudo, serão tratados temas norteadores para a pesquisa como: desastres naturais, riscos hidrológicos, modelos hidrodinâmicos, sensoriamento remoto – SRTM, levantamento geodésico – GNSS, fotogrametria com veículos aéreos não tripulados, modelo

digital de terreno, bem como, temas relativos a estes, também abordados na presente pesquisa.

No capítulo 3 serão abordados os aspectos gerais da área de estudo, tais como: a localização e a sub-bacia hidrográfica do rio Saracura no município Lajedinho, com suas características físicas e o histórico de antecedentes de inundações. A descrição dos dados utilizados e da metodologia empregada na resolução do problema apresentado, encontra-se no capítulo 4, denominado Metodologia da Pesquisa.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados e análises da aplicação da metodologia adotada na presente pesquisa e descrita no capítulo anterior. Por fim, depois dos levantamentos de todas as informações e das análises; serão feitas no capítulo 6 as considerações finais e recomendações do trabalho. No capítulo 7 são sugeridos temas para trabalho futuro, por fim as referências no capítulo 8 e apêndices no 9º capítulo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Desastres Naturais.

Desde a formação do planeta existe a ocorrência de processos físicos que ocorrem naturalmente na superfície terrestre, são eles: terremotos, tsunamis, erupções vulcânicas, inundações e deslizamentos de terra. Por sua vez, os primeiros agrupamentos humanos levavam em consideração na identificação de locais de moradia a possibilidade de transporte, comunicação, comércio e principalmente ao redor de terras produtivas, por estas razões os primeiros aglomerados urbanos foram consolidados sobre as planícies dos grandes rios, no litoral e nas encostas vulcânicas (MARCELINO, 2008).

A conceituação de desastres apresenta várias interpretações a depender das linhas de pensamentos, ainda hoje não se alcançou uma definição única deste conceito pelos diversos órgãos e estudiosos do tema. A Estratégia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) apresenta a seguinte definição básica para desastre: interrupção do funcionamento de uma comunidade ou sociedade que causa perdas humanas e/ou importantes perdas materiais, econômicas ou ambientais; que excedem a capacidade da comunidade ou sociedade afetada de lidar com a situação utilizando seus processos de risco. Resulta da combinação de ameaças, condições de vulnerabilidade e insuficiente capacidade ou medidas para reduzir as consequências negativas e potenciais do risco. (EIRD, 2009)

Os grupos sociais através das experiências passadas de geração em geração, aprenderam a conviver com os desastres naturais apesar do risco. Ocorre que nos últimos anos, as pesquisas têm demonstrado que houve um aumento considerável na intensidade e na frequência dos desastres naturais, impactando seriamente diversas áreas da superfície terrestre.

Segundo informações da Organização das Nações Unidas (ONU), a cada ano mais de 226 milhões de pessoas são afetadas por desastres; entre 2002 e 2011, registrou-se 4.130 desastres naturais no mundo, nos quais mais de 1,117 milhão de pessoas morreram com perdas financeiras atingindo

valores próximos a 1,19 trilhão de dólares. Atualmente há mais pessoas vivendo em áreas de risco, onde estão expostas ao risco de perda de vidas e danos materiais provenientes de desastres naturais, devido principalmente ao crescimento populacional, segregação socioespacial e mudanças climáticas. Por exemplo, entre 1970 e 2010 aumentou 114% a proporção da população que vive em regiões das bacias hidrográficas que estão mais susceptíveis a enchentes e inundações (ONU, 2012).

A forma de usar e ocupar indevidamente o solo representa um grave problema nas áreas urbanas. Para reduzir vulnerabilidade ao risco, melhorando a resiliência dos grupos sociais que residem em áreas inadequadas à moradia, devem ser realizadas medidas preventivas, intervindo de forma planejada no território visando a diminuição dos danos materiais, ambientais e de vidas humanas. No que se refere a redução de riscos, os mapeamentos podem atuar de forma efetiva na solução de problemas já existentes, assim como, na prevenção dos acidentes.

Os desastres naturais são provocados por diversos fatores envolvendo uma gama de variáveis como: forma do relevo, características do solo e da vegetação, precipitação, etc. Outros tipos de variáveis envolvidas são as humanas como a população, uso e ocupação do solo, pobreza entre outros (MARCELINO, 2008). Para se manipular esta grande quantidade de dados realiza-se o uso das geotecnologias, através das ciências geodésicas, do sensoriamento remoto, da fotogrametria e Sistema de Informação Geográfica (SIG) onde são coletados, organizados, armazenados e analisados os dados que produzem as informações a serem utilizadas na prevenção e mitigação dos desastres.

Um dos maiores desafios encontrados na gestão de riscos e desastres está no fato de que a velocidade e a imprevisibilidade dos desastres naturais exigem medidas de identificação, monitoramento e sistemas de alerta que são superiores à capacidade técnica-institucional dos órgãos competentes, principalmente nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento como o Brasil, tornando necessário o desenvolvimento de ferramentas capazes de

garantir a gestão destas áreas em uma escala de tempo próxima da escala real e com baixo custo.

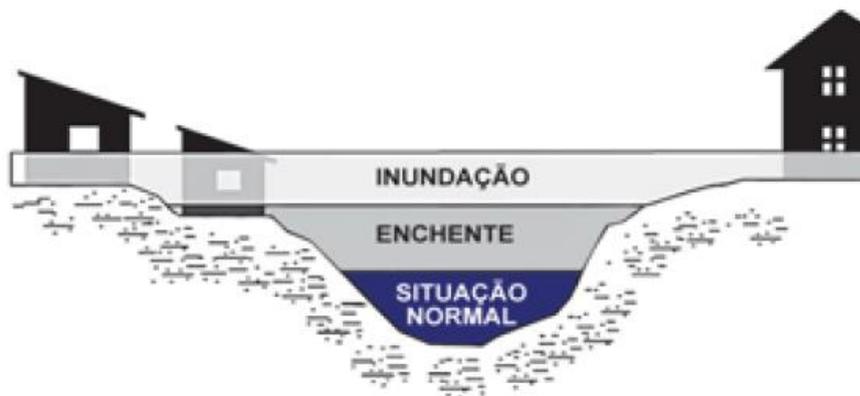
Torna-se necessário a compreensão da diferença das definições e dos conceitos em relação aos desastres naturais, principalmente em um estudo como este, que trata de maneira geral dos problemas da circulação das águas no espaço urbano. Estes termos são, recorrentemente, confundidos entre si ou tomados a partir de conotações populares e não científicas.

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (BRASIL, 2007) a enchente ou cheia é a elevação temporária do nível d'água em um canal de drenagem devido ao aumento da vazão ou descarga. No período de cheias, as vazões aumentam podendo superar a capacidade de descarga da calha do curso d'água, extravasando as áreas marginais habitualmente não ocupadas pelas águas; este extravasamento é chamado de inundação.

Desta maneira, a inundação seria o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio. Já a enxurrada é o escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte, que pode ou não estar associado a áreas de domínio dos processos fluviais (BRASIL, 2007). As enxurradas geralmente causam danos sociais e físicos irreparáveis à população, principalmente quando ocorre ao longo de vias implantadas sobre antigos cursos d'água com alto gradiente hidráulico e em terrenos com alta declividade natural.

Na Figura 01, observam-se, didaticamente, os processos de enchente e inundação.

Figura 1: Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.



Fonte: BRASIL, 2007.

Todos estes conceitos denotam a superação do limiar das margens plenas pela lâmina d'água de curso fluvial, e o conseqüente transbordamento do canal. O processo hidrológico de enchente ou inundação é um fenômeno dinâmico, ao longo de um curso d'água e a depender das características específicas do local podemos ter trechos com cenários de enchentes e trechos com cenários de inundação, causando impacto destrutivo que pode ou não causar efeitos no espaço urbano (BRASIL, 2007).

Segundo o Glossário Internacional de Hidrologia onde consta a definição de todos os termos fundamentais da hidrologia disponibilizado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) a cheia é definida como o crescimento, normalmente rápido, do nível de um curso de água até um máximo, a partir deste ponto o nível d'água desce em geral mais lentamente (UNESCO, 2016).

Ainda no Glossário o termo inundação é tratado como a “*submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água ou acumulação de água proveniente de drenagens...*” (UNESCO, 2016), outro termo similar também está presente no glossário, este seria a inundação urbana conceituada como o aumento do nível da água precipitada que se acumula dada a capacidade do sistema de drenagem não ser suficiente para a sua evacuação. A definição para o conceito de enchente não é tratada no Glossário Internacional de Hidrologia.

2.2 Modelos Hidrodinâmicos.

O escoamento de água em canais e em outros corpos de água pode ser classificado em regime permanente e não-permanente:

- Os movimentos não-permanentes são aqueles onde os campos de velocidades do escoamento, bem como outras propriedades do mesmo, variam no decorrer do tempo (SANTOS, 2013 *apud* BAPTISTA *et al.*, 2003), ou seja, são representados por modelos hidrodinâmicos, que levam em conta a variação no tempo e no espaço das variáveis do escoamento em um rio ou canal.

- O escoamento permanente e uniforme pode ser considerado quando as variações nos valores de vazão, área da seção transversal e declividade são mínimas e tendem a ser desprezíveis ao longo do tempo (GRIBBIN, 2009).

O escoamento não-permanente é o padrão mais comumente encontrado nos escoamentos fluviais. Apesar disto, variações ocorrem na maioria dos escoamentos da natureza, e a escala temporal de interesse por vezes permite tratar alguns deles como permanentes de modo aproximado, como por exemplo, os casos onde as vazões variam lentamente em função do tempo, o que ocorre comumente em alguns trechos de rios e canais naturais. Em geral, podem ser aproximadamente tratados como permanentes os escoamentos de água em canais naturais, ou rios, apenas os casos de estiagens prolongadas ou aqueles correspondentes a um curto intervalo de tempo nas regiões mais altas ou mais baixas de um hidrograma (SANTOS, 2013 *apud* BAPTISTA *et al.*, 2003).

Os rios e canais podem apresentar diferentes características, predominando em cada caso, um ou mais efeitos sobre o escoamento. Quando o escoamento ocorre com uma profundidade superior à profundidade crítica, o escoamento é denominado superior, tranquilo, fluvial ou subcrítico; neste escoamento, uma perturbação qualquer pode se propagar nos dois sentidos, o que indica que o escoamento recebe influência das condições à montante e à jusante. Sempre que o escoamento ocorrer em profundidades menores que a crítica, o escoamento é denominado inferior, rápido, torrencial ou supercrítico, neste escoamento, qualquer perturbação propaga-se apenas para jusante, ou

seja, o escoamento depende apenas das condições à montante do mesmo. O caso particular do regime crítico corresponde à situação em que ou a perturbação propaga-se para jusante ou permanece estacionária. Uma seção do escoamento a partir da qual eventuais alterações nas condições do escoamento não exercem influência sobre o escoamento a montante (SANTOS, 2013 *apud* BAPTISTA *et al.*, 2003).

A modelagem matemática aplicada a recursos hídricos estuda a simulação de sistemas reais a fim de prever o seu comportamento. Com o intuito de realizar a representação dos escoamentos e avaliação da magnitude das enchentes e inundações são utilizadas várias abordagens nos estudos de propagação da onda de cheia em rios. Atualmente os pacotes de modelos de simulações hidráulicas disponíveis no mercado representam os escoamentos nos rios e planície de inundação de três formas: escoamento unidimensional (1D) na calha do rio e planície de inundação, escoamento bidimensional (2D) na calha do rio e planície de inundação e modelos integrados 1D/2D na calha principal e planície de inundação, respectivamente (COUTINHO, 2015).

A abordagem mais comumente empregada são os modelos hidrodinâmicos 1D, adotando a simplificação de que o escoamento segue apenas na direção longitudinal do curso d'água. Os modelos hidrodinâmicos 1D são baseados nas equações de continuidade e quantidade de movimento, desenvolvidas por *Saint Venant*.

Ao combinar as duas equações: da conservação de massa e da quantidade de movimento formam o sistema de equações conhecido como equações de *Saint Venant* (PONTES, 2011):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_0 - S_f) \tag{2}$$

Onde:

A [m²] = área da seção transversal,

Q [m³/s] = vazão,

q_l [m²/s] = vazão de contribuição lateral,

t [s] e x [m] = são respectivamente o tempo e a distância longitudinal,

g [m/s²] = aceleração da gravidade,

S_0 [m/m] = declividade do fundo do rio,

S_f [m/m] = declividade da linha de energia e

h [m] a profundidade da linha d'água, que pode ser dada pela equação a seguir:

$$S_f = \frac{|Q| \cdot Q \cdot n^2}{A^2 \cdot R^{4/3}} \quad (3)$$

Algumas hipóteses foram consideradas para o desenvolvimento das equações de *Saint Venant*, este equacionamento e as hipóteses são válidos para um canal ou rio subdividido em seções transversais (PONTES, 2011):

- I. As variáveis devem ser representadas por funções contínuas;
- II. Fluido incompressível e homogêneo;
- III. O escoamento é unidimensional, a velocidade é uniforme e igual à média e o nível de água é horizontal na seção transversal;
- IV. A pressão é hidrostática, ou seja, depende apenas da profundidade;
- V. É possível utilizar equações para perda de carga, semelhantes às usadas em escoamento permanente, como a equação de *Manning*;
- VI. A declividade do canal é baixa.

Dentre outros diversos modelos hidrodinâmicos existentes, destaca-se o sistema de modelagem do Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS), um modelo amplamente difundido na literatura e um dos principais utilizados na modelagem hidrodinâmica unidimensional.

O HEC-RAS é um *software* gratuito, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, em inglês, United States Army Corps of Engineers (USACE), permite análises unidimensional (1D), bidimensional (2D), ou combinado 1D e cálculos hidráulicos 2D para uma rede completa de canais naturais ou construídos. O principal objetivo do *software* é apoiar a gestão dos recursos hídricos através do aumento da capacidade

técnica na área de recursos hídricos, engenharia hidrológica, planejamento e gestão (USACE, 2016).

O HEC-RAS tem a capacidade de gerar gráficos e tabelas além de conseguir visualizar em 3D os resultados das simulações. Uma das suas vantagens é que pode ser facilmente associado ao SIG ArcGis, através da plataforma HEC-GeoRAS, esta, facilita a adição da geometria de canais, possibilitando a importação ou exportação dos dados simulados para análise espacial da planície de inundação simulada.

Com base na análise dos resultados das simulações, têm-se as áreas propensas às inundações para os eventos extremos de precipitação e são construídos mapas que podem, por exemplo, simular impactos da ocupação urbana, com caráter de planejamento.

O HEC-RAS utiliza as equações de *Saint Venant* completas para propagar a vazão em trechos de rio. O nível d'água, em Regime de Escoamento Permanente, pode ser calculado a partir da solução da Equação da Energia (USACE, 2016).

Equação da energia:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (4)$$

Onde:

Z_1 e Z_2 = Elevação do fundo do canal em cada seção

Y_1 e Y_2 = Nível d'água nas seções

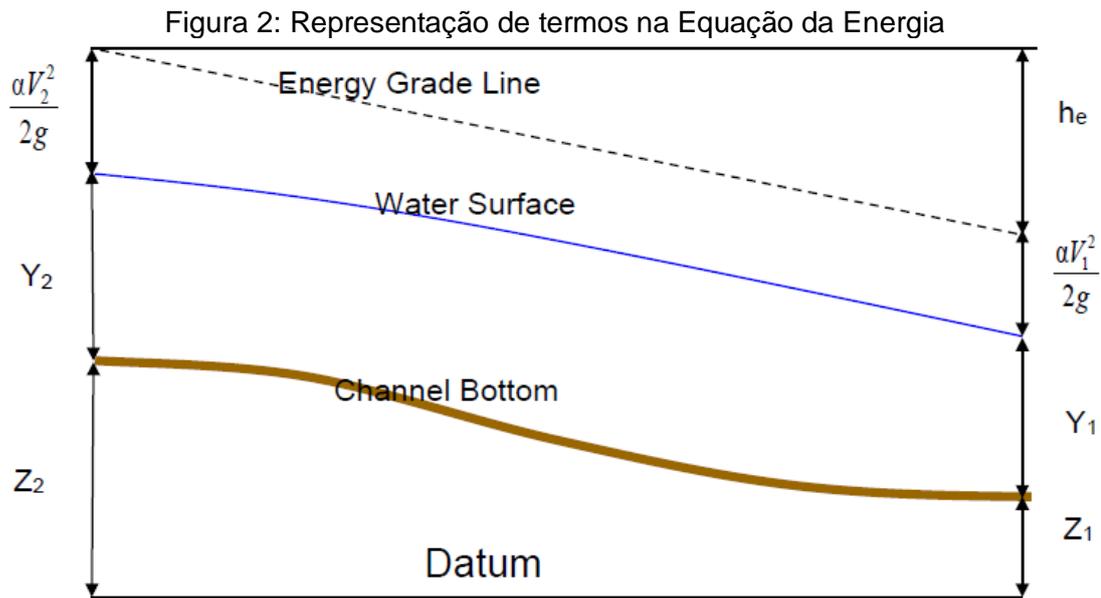
V_1 e V_2 = Velocidade do escoamento

α_1 e α_2 = Coeficientes de Coriolis

g = Aceleração da gravidade

h_e = Coeficiente de perda

Na Figura 2 são apresentados os termos da Equação da Energia.



Fonte: USACE, (2016).

O termo h_e , representa as perdas de carga de energia durante a propagação do escoamento, estas perdas estão relacionadas aos coeficientes de fricção, expansão e compressão. A equação para calcular as perdas referentes ao escoamento é (USACE, 2016):

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (5)$$

Onde:

L = Comprimento do trecho

S_f = Inclinação representativa entre as duas seções

C = Coeficiente de expansão ou perda de contração

Para executar a simulação de escoamento permanente no HEC-RAS e encontrar o nível d'água, são necessárias algumas informações que devem ser inseridas no *software*, as principais são:

- I. Geometria da bacia estudada - traçado do canal e formato das seções transversais
- II. Coeficientes de rugosidade de *Manning* (n), normalmente baseado nas observações realizadas em campo com os diferentes usos do solo

urbano e das características das margens dos trechos fluviais. Segundo Strasser *et al* (2005), é fundamental focalizar a atenção sobre os parâmetros que representam a resistência ao escoamento, como por exemplo o coeficiente de rugosidade de *Manning*, já que a diminuição do coeficiente de resistência com o aumento da vazão e do nível d'água é um fato já discutido na literatura por diversos autores (Chow, 1959; Henderson, 1966; Vanoni, 1975; Mascarenhas, 1985; Ribeiro Neto, 2001).

- III. Regime do Fluxo, entre as opções estão o Regime Subcrítico, Supercrítico e Misto.
- IV. Condições de Contorno, necessárias para estabelecer a cota de inundação ao final do sistema de rios, que pode ser considerado tanto à montante como à jusante.

Nesta etapa, pode-se escolher entre as opções: “Nível d'água conhecido”, “Profundidade Crítica”, “Declividade da Linha de Energia” e “Curva Chave”.

A “Profundidade Crítica” pode ser obtida automaticamente, a partir do modelo inserido. Para calcular esta condição de contorno o HEC-RAS utiliza desta equação (USACE, 2016):

Equação da Profundidade Crítica:

$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (6)$$

Onde:

H = Profundidade Crítica

WS = Nível d'água

V = Velocidade do escoamento

A profundidade crítica corresponde ao valor de nível d'água para o qual a energia é mínima na seção.

- V. Vazões que serão utilizadas para o cálculo da cota de inundação. O Escoamento Permanente considera esta vazão como constante para as demais seções.

A modelagem hidráulica é um sistema complexo, que interage com diversas variáveis e condições. A qualidade e quantidade dos dados de entrada para a construção da geometria são fundamentais para tornar o resultado dos cálculos referentes a cota de inundação mais confiável. Ou seja, os produtos finais gerados tem completa relação com as informações inseridas na modelagem.

2.3 Sensoriamento Remoto – SRTM

Em fevereiro de 2000 foi realizada a missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), diversos órgãos participaram desta missão, entre eles: a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD) e as agências espaciais alemã *Deustches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) e italiana *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI). O objetivo desta missão era obter informações altimétricas da superfície terrestre com interferometria de radar de abertura sintética (InSAR), entre 60° de latitude norte e 54° de latitude sul, mapeando aproximadamente 80% das áreas emersas do planeta (GROHMANN *et al*, 2008). O uso da interferometria para o cálculo da altitude possui em alguns casos maior acurácia em relação à técnica da estereoscopia já que o MDE derivados de interferometria, não sofrem interferência significativa de parâmetros atmosféricos.

O ônibus espacial americano *Endeavour* partiu para uma missão de 11 dias. Os dados brutos da missão foram processados pela NASA e, apesar de obtidos com resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m no equador), foram disponibilizadas nesta resolução apenas para a área dos Estados Unidos. Para os outros países, houve uma reamostragem dos dados para 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m) de resolução espacial (GROHMANN *et al*, 2008). Após 14 anos, em setembro de 2014, o Presidente

dos Estados Unidos da América anunciou a disponibilidade pública de dados SRTM com resolução espacial de 30 metros¹.

As imagens SRTM de 30m estão disponibilizadas no site do Serviço Geológico Americano, estas imagens apresentam pelo menos uma linha e uma coluna de sobreposição com os arquivos correspondentes às áreas vizinhas; estão no sistema de coordenadas geodésicas (latitude/longitude) e o Sistema Geodésico de Referência é o WGS-84, sendo as altitudes dadas em metros.

As técnicas empregadas na missão SRTM objetivou a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), já que os sinais de radar são refletidos, por exemplo, pelo dossel das árvores em áreas densamente florestadas, entre outros. Mas, neste estudo, por não haver áreas densas e apresentar vegetações de pequeno porte, considerou-se o modelo produzido a partir de valores de altitude do nível do solo, ou seja, Modelo Digital de Terreno (MDT).

2.4 Levantamento Geodésico – GNSS

2.4.1 Definição:

2.4.1.1 Geodésia

A palavra Geodésia foi utilizada pela primeira vez por Aristóteles (384-322 a.C.), de forma literal expressa a “divisão ou particionamento da Terra”, Todavia, esta expressão não define com objetividade a importância e o alcance desta ciência, sendo necessário buscar outros conceitos de outros autores.

Geodésia pode ser compreendida como a ciência que estuda o conjunto de métodos e procedimentos adotados para definir a forma e dimensão do nosso planeta, bem como a determinação dos parâmetros definidores do campo da gravidade (GEMAEL, 1987). Estes procedimentos compreendem a mensuração das coordenadas Geodésicas dos pontos da Terra (Geodésia Geométrica), da geometria das órbitas dos satélites artificiais e pontos

¹ Os downloads das imagens SRTM de 30m pode ser realizado no site: <http://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: 10 de junho. 2016

terrestres (Geodésia Espacial) e das forças que atuam na terra (Geodésia Física).

2.4.1.2 GNSS

A palavra GNSS foi utilizada pela primeira vez em 1991 pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) para generalizar os sistemas mundiais de navegação por satélites artificiais (SEEBER, 2003). O termo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma denominação geral que contempla sistemas de navegação com cobertura global, além de uma série de infraestruturas terrestre (GBAS – *Ground Based Augmentation System*) que, associadas aos sistemas, proporcionam maior precisão e confiabilidade (INCRA, 2013).

O GNSS é uma das tecnologias mais avançadas que surgiram recentemente. Um dos principais componentes do GNSS é o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelos Estados Unidos, que se encontra em plena operação, além do GLONASS, similar ao GPS, desenvolvido e sendo de responsabilidade da República da Rússia, do Galileo, desenvolvido pela União Européia e o Compass pela China (TEIXEIRA, 2010a).

2.4.2 Princípio do posicionamento GNSS.

O posicionamento GNSS envolve um processo bastante complexo da dinâmica orbital, é essencial no processo a disponibilidade de órbitas dos satélites com alta precisão. Segundo Mônico (2008), o princípio básico do posicionamento com uso de receptores GNSS consiste na medida de distâncias entre o equipamento e, até um conjunto de pelo menos quatro satélites artificiais (observação simultânea) que é estabelecida pela medida do tempo de viagem do sinal de rádio emitido pelo satélite até o receptor. Através da posição espacial dos satélites em um determinado sistema de referência (WGS 84), é possível determinar as coordenadas de um ponto na superfície terrestre.

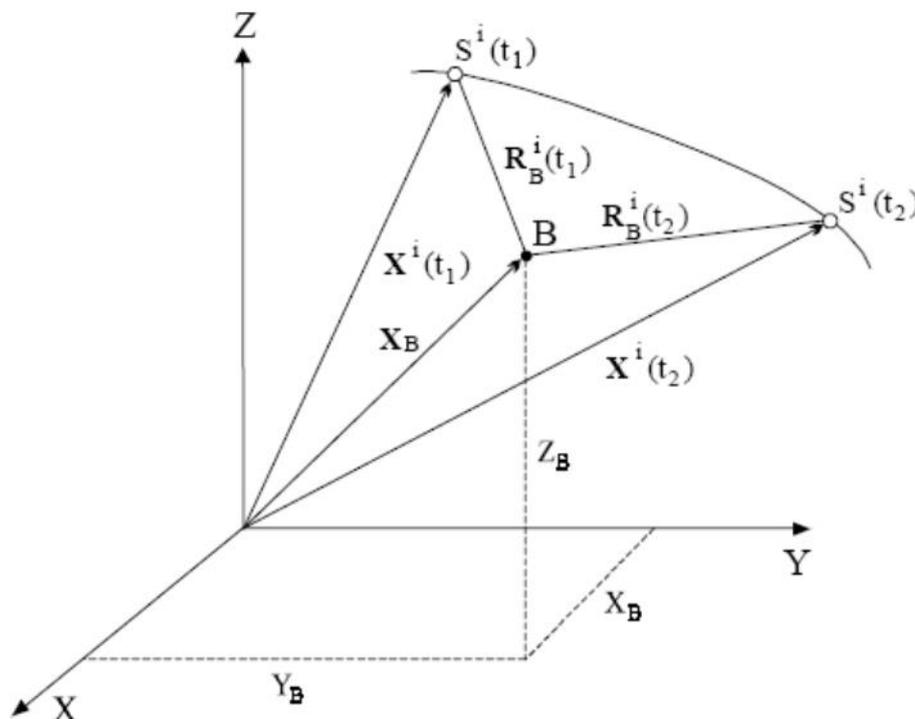
Segundo Seeber (2003), este posicionamento é determinado pelas seguintes observáveis básicas do GNSS:

- Pseudodistância a partir do código, e
- Fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

Estas que são obtidas a partir dos códigos C/A (*Coarse Acquisition*) e P (*Precise code*) ou das duas ondas portadoras L1 e L2. A portadora L1 com frequência de 1575,42 MHz e comprimento de onda de 19,05 cm é modulada pelos códigos C/A e P, enquanto a portadora L2 com frequência de 1227,60 MHz e comprimento de onda de 24,45 cm é modulada somente pelo código P.

Em síntese, o princípio para determinação de coordenadas com o GNSS é baseado na medição das chamadas pseudodistâncias, tem este nome devido a ser a distância satélite-receptor que é afetada por erros ou efeitos sistemáticos, entre a antena de um receptor e as antenas de quatro satélites. Observa-se um receptor instalado em uma estação B e um satélite i (Figura 3).

Figura 3: Ilustração da geometria do posicionamento por satélites.



Fonte: (TEIXEIRA, 2010a).

A equação fundamental de observação para uma pseudodistância seria:

$$PR_B^i(t) = |\mathbf{X}^i - \mathbf{X}_B| + c\delta t_B = c\tau_B^i = ((X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2)^{\frac{1}{2}} + c\delta t_B \quad (7)$$

Onde:

PR_B^i : pseudodistância entre a antena do satélite i e a antena do receptor em B ;

\mathbf{X}^i : vetor posição do satélite i de componentes X_i, Y_i, Z_i no sistema geocêntrico CTS;

\mathbf{X}_B : vetor posição da antena do receptor em B , de componentes X_B, Y_B, Z_B no sistema geocêntrico CTS;

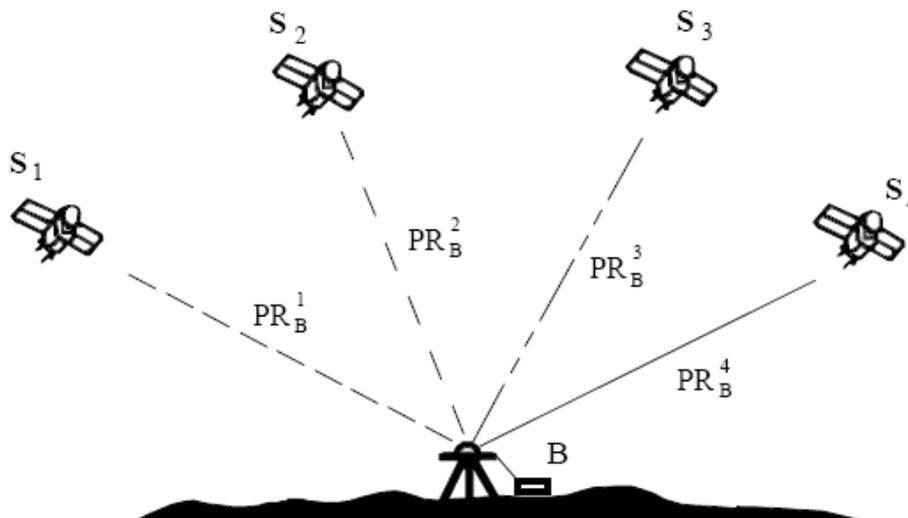
c : velocidade de propagação da luz no vácuo;

δt_B : erro de sincronização entre o sistema de tempo GPS e o relógio do receptor em B ;

τ_B^i : tempo de propagação do sinal entre a antena do satélite i e a antena do receptor em B .

São necessárias apenas três destas observações para obter coordenadas tridimensionais, mas uma quarta observação é adicionada para resolver o erro de não sincronismo entre os relógios do receptor (B) e dos satélites. As coordenadas da antena do receptor instalado na estação B , representado na Figura 4, podem ser obtidas pela observação simultânea de 4 satélites (S_1, S_2, S_3 e S_4), conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4: Princípio do Posicionamento por Ponto



Fonte: (TEIXEIRA, 2010a).

2.5.3 Classificação dos Receptores GNSS segundo sua aplicação.

Apesar dos satélites artificiais transmitirem todos os sinais continuamente, nem todos os receptores são desenvolvidos para rastreá-los. Desta maneira, existem diversas maneiras de classificar os receptores GNSS, considerando aspectos como: comunidade usuária, número e tipos de canais, frequência, tipos de dados e aplicação. Os receptores podem ser classificados, segundo sua aplicação, como (IBGE, 2008):

- Navegação – Receptores destinados à navegação terrestre, marítima e aérea, bem como a levantamentos com precisão de ordem métrica. Fornecem as coordenadas em tempo real com base nas pseudodistâncias derivadas do código C/A; alguns programas permitem a extração das observações de pseudodistância e da fase da onda portadora para posterior processamento;
- Topográfico – Estes receptores normalmente são utilizados na topografia, são capazes de rastrear a fase da onda portadora L1 e o código C/A; é possível proporcionar, após pós-processamento, posicionamento preciso quando utilizados em conjunto com um ou mais receptores localizados em estações de referência. Para tanto, a distância entre o receptor móvel e a sua Base de referência fica restrita a uma área compreendida dentro de um círculo de raio de aproximadamente 20 km.

- Geodésico – Receptores mais sofisticados capazes de rastrear a fase da onda portadora nas frequências (L1, L2 e L5). Existe menor degradação do sinal, pois é possível modelar a maior parte da refração ionosférica a partir do uso da combinação linear livre da ionosfera (*ion free*) durante o processamento dos dados. Isso possibilita a sua utilização em linhas de base maiores que 20 km. Normalmente estes receptores são utilizados na geodésia.

2.4.3 Métodos e Técnicas de Posicionamento GNSS.

O posicionamento ou levantamento por GNSS tem o objetivo de determinar a posição de objetos – estacionários ou em movimento – em relação a um referencial específico, e pode ser realizado por dois métodos distintos: o **método absoluto** e o **método relativo**. O **posicionamento absoluto** pode ser realizado pelas **técnicas estática e cinemática**, é caracterizado pelo fato de ter suas coordenadas referidas ao geocentro. O **posicionamento relativo** pode ser realizado pelas **técnicas estática, cinemática e diferencial**, e é caracterizado pelo fato de ter suas coordenadas determinadas em relação a um referencial por vértices de coordenadas conhecidas (TEIXEIRA, 2010b).

Na Figura 5, pode-se observar um organograma, apresentando os métodos e as técnicas do posicionamento GNSS:

Figura 5: Métodos e técnicas de posicionamento por GNSS.



Fonte: (TEIXEIRA, 2010b).

Como se pode perceber na Figura 5 o posicionamento por GNSS pode ser realizado por diferentes métodos e procedimentos. Nos próximos tópicos será realizada uma breve descrição sobre os principais e mais utilizados métodos e técnicas de posicionamento por GNSS.

2.4.3.1 Posicionamento absoluto.

Para a execução deste método é necessário apenas um receptor, as coordenadas de um ponto são determinadas em tempo real, utilizando a pseudodistância derivada do código C/A na portadora L1. Divide-se em:

a) Posicionamento por ponto

O Posicionamento por ponto é executado em tempo real, geralmente utilizado para navegação e levantamentos que requerem precisão métrica. Este tipo de posicionamento GNSS proporciona precisão (métrica) inferior àquelas

fornecidas por outras técnicas, porque apenas os erros do relógio do satélite e do receptor são modelados na solução. Para sua realização, basta apenas o usuário dispor de um receptor, nenhuma outra estrutura adicional é necessária. Através das efemérides transmitidas são determinadas as coordenadas e o erro do relógio dos satélites, enquanto que o erro do relógio e as coordenadas do receptor são calculados em um ajustamento onde as observações são pseudodistâncias derivadas do código C/A de pelo menos quatro satélites (IBGE, 2008)

b) Posicionamento por ponto preciso

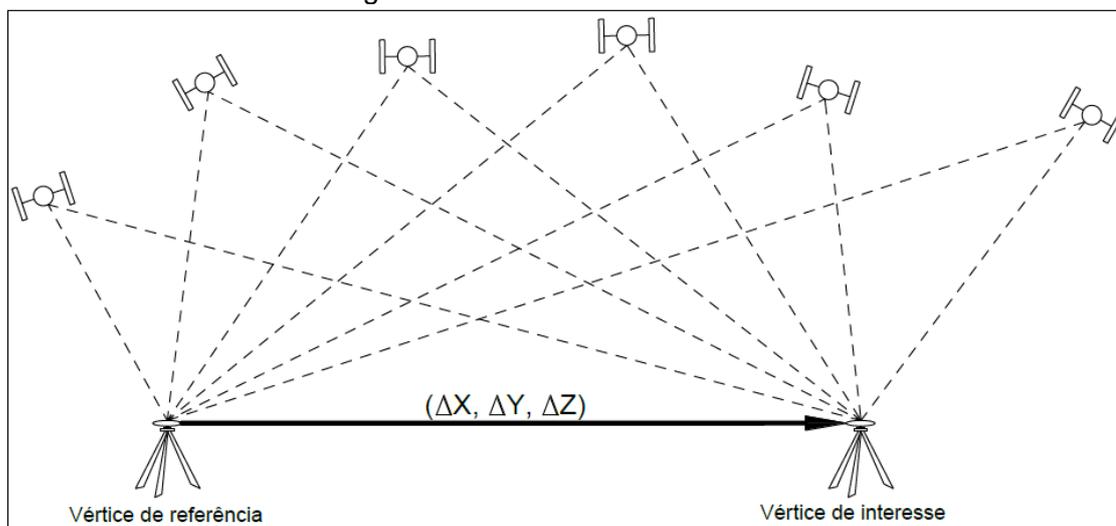
Esta técnica pode proporcionar precisão centimétrica já que seu posicionamento requer a utilização da pseudodistância e fase das ondas portadoras L1 e L2, possibilitando a redução dos efeitos de primeira ordem da ionosfera. Nesta técnica, os efeitos da troposfera devem ser modelados. Os erros de órbita e relógio dos satélites, bem como parâmetros de rotação da Terra, são produtos adquiridos do IGS (International GNSS Service) (IBGE, 2008).

O IBGE em seu portal oficial disponibiliza um serviço on-line para o pós-processamento de dados GNSS denominado IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso ou Posicionamento Absoluto Preciso. Através da sua utilização os usuários podem obter coordenadas de boa precisão no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e no *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF).

2.4.3.2 Posicionamento relativo

Neste método um receptor (Base) permanece fixo sobre uma estação de coordenadas conhecidas e outro receptor (Rover) ocupa vértices de interesse, rastreando simultaneamente um grupo de pelo menos dois satélites comuns (Figura 6).

Figura 6: Posicionamento Relativo.



Fonte: (INCRA, 2013).

O método do posicionamento relativo pode ser subdividido em quatro técnicas, são elas: estático, estático-rápido, semicinemático e cinemático. A seguir, as características destas técnicas de posicionamento são apresentadas.

a) Posicionamento relativo estático

No posicionamento relativo estático, tanto o(s) receptor(es) do(s) vértice(s) de referência quanto o(s) receptor(es) do(s) vértice(s) de interesse permanecem estacionários durante todo o levantamento. Neste método, a sessão de rastreamento se estende por um longo período, variando de 20 minutos até várias horas. (INCRA, 2013).

Para levantamentos no território brasileiro, recomenda-se observar os valores constantes na Tabela 1, sugerido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A Tabela 1 apresenta a precisão aproximada do posicionamento relativo com GNSS, em função do tipo de equipamento utilizado, tempo de rastreamento das observações e comprimento das linhas de base.

Tabela 1: Precisão do posicionamento relativo em função do tempo de observação, equipamento utilizado e comprimento da linha de base.

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 Km	02 – 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 Km	mínimo. 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
> 100 Km	mínimo. 04 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm

Fonte: (IBGE, 2008).

b) Posicionamento relativo estático-rápido

O posicionamento relativo estático-rápido é realizado de forma similar ao estático. As técnicas se diferem pelo intervalo de tempo do rastreamento, que no estático-rápido é inferior a 20 minutos. Este tipo de posicionamento é adequado quando é necessário um alto rendimento no campo, nos casos em que a linha de Base é inferior a 20 Km e também pode ser utilizado como alternativa ao método semicinemático (*stop and go*) em locais onde há muitas obstruções, já que o receptor móvel pode ser desligado entre as sessões de coleta.

c) Posicionamento relativo semicinemático (*stop and go*)

O posicionamento relativo semicinemático ou *stop and go* também é conhecido como pseudoestático. Esta técnica de posicionamento é similar ao estático-rápido, onde o diferencial está no tempo de permanência em cada estação e na necessidade do receptor permanecer ligado durante todo o período do levantamento (IBGE, 2008). Quanto maior a duração da sessão de levantamento com a coleta de dados íntegros, sem perdas de ciclos, melhor a precisão na determinação de coordenadas. Este método não deve ser usado em locais que possuam muitas obstruções (INCRA, 2013).

d) Posicionamento relativo cinemático

Esta modalidade de posicionamento, enquanto um ou mais receptores estão estacionados no(s) vértice(s) de referência, o(s) receptor(es) que coleta(m) dados dos vértices de interesse permanece(m) em movimento. A cada intervalo de observação, que coincide com o intervalo de gravação, é

determinada a posição do receptor móvel. A sua utilização em locais com muitas obstruções é limitada, conforme descrito para o método semicinemático (INCRA, 2013).

2.4.4 *Altimetria através de Posicionamento GNSS.*

As coordenadas geodésicas dos vértices coletados por Posicionamento GNSS são caracterizadas por duas componentes: planimétrica e altimétrica. A planimetria é representada pela latitude e longitude, a altimetria é representada pela altitude. Ambas são referidas ao elipsóide de revolução adotado como referência (IBGE, 2008).

Em relação à determinação da componente altimétrica por Posicionamento GNSS, as coordenadas possuem a altitude referida à superfície do elipsóide, denominada de altitude elipsoidal ou altitude geométrica (h). Ocorre que, a superfície de referência altimétrica adotada no Brasil é o geóide, este seria então uma superfície eqüipotencial que coincide com o nível médio dos mares não perturbados. A altitude referida ao geóide é denominada de altitude ortométrica (H) (IBGE, 2008).

As altitudes geométricas (em relação ao elipsóide) e ortométricas (em relação ao geóide) se relacionam através da ondulação geoidal (N). Portanto, caso seja necessário converter a altitude elipsoidal em altitude ortométrica, utiliza-se a equação:

$$H \cong h - N \quad (8)$$

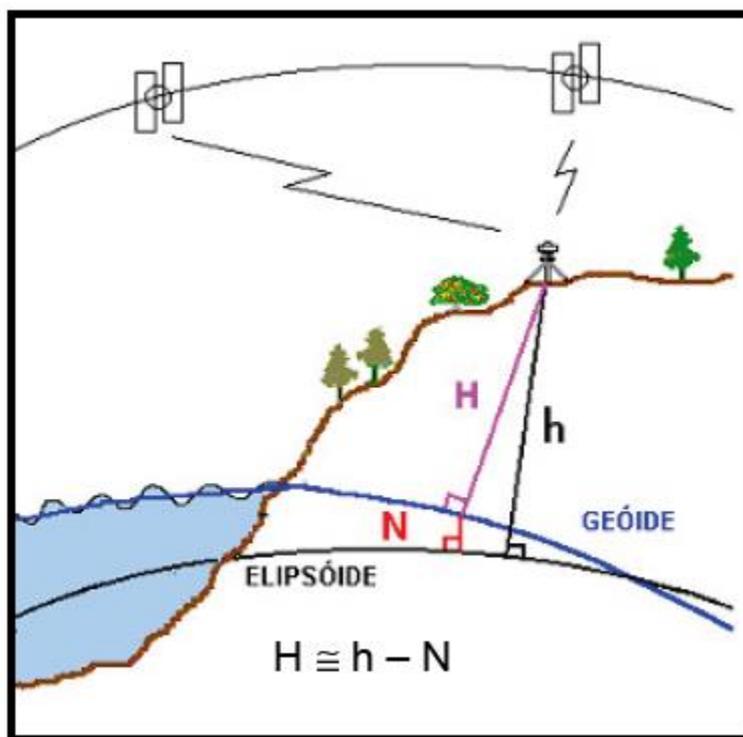
H = Altitude ortométrica

h = Altitude geométrica

N = Ondulação geoidal

A Figura 7 apresenta a relação entre as superfícies utilizadas na determinação da altitude.

Figura 7: Relação das Superfícies Geoide e Elipsoide.



Fonte: Modificado, IBGE (2008).

Desta forma, como se pode perceber na Figura 7, para converter a altitude geométrica em altitude ortométrica é necessário o conhecimento de N (ondulação geoidal). Através desta demanda pela utilização de um modelo de ondulação geoidal brasileiro cada vez mais preciso para aplicações nas áreas de mapeamento e engenharia, o IBGE e seus parceiros produziram o MAPGEO2015. Segundo o IBGE, em seu site oficial, o MAPGEO2015 é um sistema onde os usuários podem obter a ondulação geoidal em um ponto ou conjunto de pontos cujas coordenadas referem-se ao SIRGAS2000 e estejam compreendidas entre as latitudes de 6°N e 35°S e entre as longitudes de 75°W e 30°W , dentro do território brasileiro. O MAPGEO2015 pode ser obtido no portal do IBGE <www.ibge.gov.br>.

2.5 Fotogrametria – VANT

Uma nova terminologia surge mais recentemente, a Fotogrametria VANT, segundo Eisenbeiss (2009), seria uma plataforma de medição fotogramétrica que opera remotamente controlada, semi-autônoma ou de forma

autônoma, sem um piloto embarcado no veículo. A plataforma está equipada com um sistema de medição (câmara de pequeno ou médio formato), podendo estar incluído ou não: uma câmera de vídeo, sistemas de câmeras térmicas ou infravermelhos, sistema *Light Detection and Ranging* (LiDAR), ou uma combinação dos mesmos.

Os Veículos Aéreos não Tripulados (VANT) são conhecidos por diversos nomes e siglas. Popularmente também chamados de drones, que vem do inglês, traduzido como “abelha rainha” ou “zangão”. Na língua inglesa são conhecidos como *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) define veículo aéreo não tripulado como: “*É um veículo aéreo projetado para operar sem piloto a bordo, que possua uma carga útil embarcada e que não seja utilizado para fins meramente recreativos. Nesta definição incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e aeromodelos.*” (DECEA, AIC-N 21/10 pag. 4)

A Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) introduziu o conceito de "sistema de aeronaves remotamente pilotado" (RPAS), uma classe particular de VANT (Unidade Aérea de Segurança - UAS). Esta definição RPAS foi construída para ser capaz de integrar-se no sistema de aviação civil de todo o mundo.

O uso de VANT, ARP e Drones² no espaço brasileiro é regulado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) que expede instrução de uso, autorizações e licença de pessoal. A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) instrui especificamente sobre o uso de frequência dos voos. No Brasil, os drones são regulamentados conforme seu propósito de uso. Se sua utilização for para lazer, esporte ou hobby, o equipamento é visto como um aeromodelo; caso o

² Neste estudo trataremos os termos VANT, ARP e Drones como expressões que na maioria das vezes querem se referir aos sistemas aéreos não tripulados. Desta maneira, adotaremos o termo VANT para unificar a terminologia neste estudo.

seu uso seja para outras finalidades, tais como pesquisa, experimentos ou serviços, o aparelho passa a ser entendido como um VANT ou Drone.

Eisenbeiss (2009), em sua pesquisa, enumera várias vantagens dos sistemas de aeronaves não tripuladas em relação às aeronaves tradicionais da fotogrametria clássica, são elas:

- a) Podem ser usados em situações de alto risco, sem pôr em perigo a vida humana, entrando em áreas de difícil acesso.
- b) Voar em baixa altura e próximo aos objetos a serem imageados, onde os sistemas tripulados não poderiam voar, por exemplo: locais de desastres naturais, áreas montanhosas e vulcânicas, inundações, zonas de terremoto e deserto, cenas de acidentes.
- c) VANT podem ter permissão de recobrimento em áreas que os sistemas tripulados não consigam obter, sendo a única alternativa prática em muitos casos, como por exemplo em condições climáticas de tempo nublado e chuvoso. A aquisição de dados com o VANT ainda é possível, quando a distância ao objeto permite voar abaixo das nuvens. As aeronaves tradicionais de câmaras de grande formato, não permitem a aquisição de dados nestas condições climáticas, devido à necessidade de voar em maiores alturas.
- d) Por serem veículos não tripulados, não estão sujeitos às limitações fisiológicas e psicológicas de seres humanos e despesas econômicas com pilotos.
- e) Capacidade rápida de aquisição de dados e transmissão de imagem, vídeo e orientações em tempo real para a estação de controle.

Existem várias tipos de VANT. Os principais autores apresentam várias formas de classificá-los, estando de acordo com o: tamanho, peso, métodos de lançamentos, resistência, alcance e altitude de voo, autonomia de voo entre outros. A UVS Internacional³ associação que agrega estudiosos sobre o assunto, define três categorias principais de VANT:

³ UVS Internacional, Disponível em < <http://www.uvs-internacional.org/> > acessado em 25/11/2014

1. VANT táticos: micro, mini, curto alcance, médio, de médio alcance, baixa altitude e penetração profunda, baixa altitude e ou, longa duração e altitude média com sistemas de longa duração. A massa varia de alguns quilos até 1000 kg, a área de cobertura de alguns quilômetros quadrados até 500 km², a altura de voo a partir de algumas centenas de metros até 5 km, e o tempo de voo de alguns minutos para 2-3 dias.
2. VANT estratégicos: alta altitude com longa duração, estratosférico, sistemas que voam mais alto do que 20.000 m de altitude e tem uma autonomia de 2-4 dias.
3. VANT tarefas especiais: veículos de combate não tripulados autônomos, letais e com sistemas de armadilhas.

Os VANT aplicados para fotogrametria podem ser classificados de acordo com seu sistema de propulsão do motor em: plataformas sem energia, por exemplo: balão, pipa, planador, parapente; ou plataformas motorizadas, por exemplo: dirigível, planador, hélice, elétrico, motor de combustão. Podem ainda ser classificados de acordo com as características aerodinâmicas e "físicas", como: mais leve que o ar, por exemplo: balão, dirigível; asa rotativa, seja elétrica ou com motor de combustão, por exemplo: com um rotor, coaxial, *quadricopter*, *octocopter* e *multi-rotor* e asa fixa, ou sem alimentação: elétrica ou com gelo, por exemplo: planador ou asa alta. (NEX e REMONDINO, 2014).

Os VANT em alguns serviços estão cada vez mais vistos como uma segunda alternativa comparado com a fotogrametria clássica; considerados como complementar ou alternativo a métodos diretos de levantamentos cadastrais. Geralmente apresentam um melhor custo benefício, flexibilidade, disponibilidade e eficiência para o trabalho.

Diversos pesquisadores têm realizado estudos que visam à utilização de Veículos Aéreos não Tripulados (VANT) para aplicações em desastres. Alguns autores como: Murphy et al. (2008), Rathinam et al. (2008), Campoy et al. (2009), Murphy et al. (2011) e (Perry e Ryan 2011) abordam a importância do mapeamento com VANT na redução do risco de desastres naturais ou provocados pelo homem. Eles são utilizados principalmente em aplicações de

mapeamento, monitoramento de mudanças ambientais, resposta aos desastres, prevenção, exploração de recursos, etc.

A utilização de imagens adquiridas por satélites aplicados à gestão de desastres naturais é realizada em larga escala atualmente. O sensoriamento remoto tem vários usos para o gerenciamento de desastres, desde a modelagem do risco e a análise da vulnerabilidade até o alerta e a avaliação dos danos (SAUSEN e LACRUZ, 2015). Estas aplicações nas fases de preparação, prevenção e mitigação se assemelham às realizadas na fotogrametria com VANT, podendo-se destacar algumas delas:

- Identificação, mapeamento e monitoramento de áreas com o potencial de ocorrência de desastre;

- Mapeamento de eventos para prevenção;
- Mapeamento de áreas vulneráveis e análise da vulnerabilidade;
- Mapeamento das áreas de risco/modelagem do risco;
- Sistema de monitoramento de risco;
- Desenvolvimento de um sistema de alerta e alarme

O Sensoriamento Remoto e a Fotogrametria convencional através das plataformas aéreas tripuladas muitas vezes não atingem o nível de detalhe necessário para aplicações em desastres naturais. Por outro lado, a topografia clássica realizada com estações totais, teodolitos, níveis ou levantamentos realizados por receptores GNSS, são métodos geralmente mais precisos, mas, podem ser inviáveis quando o cenário é inacessível e de difícil acesso (normalmente áreas de desastres), apresentando maiores custos para levantar áreas maiores, devido principalmente a mão de obra necessária. Nas últimas décadas, uma nova alternativa que cobre a abertura entre ambas as técnicas foi desenvolvida, a Fotogrametria através de VANT. Abaixo estão elencadas algumas vantagens da utilização de VANT para aplicação em desastres:

- ✓ Coleta de um grande número de informações mais detalhadas:

Com os dados coletados pelo VANT na área de interesse, permite-se uma maior riqueza de detalhes com melhores resoluções espaciais e temporais, estas informações auxiliam os gestores dos desastres em uma

melhor tomada de decisão. Por exemplo, as imagens de satélite com alta resolução espacial (sub-métricas) e recentes através do sensoriamento remoto dificilmente estarão disponíveis em tempo hábil, para as aplicações pós-desastres (SAUSEN e LACRUZ, 2015).

✓ Mapeamento rápido e altamente frequente:

Os VANT apresentam maior prontidão para o recobrimento podendo ser operados sem muito trabalho preparatório se comparado aos aviões tripulados. Podem coletar dados de situações espacialmente em movimento e em tempo real, como por exemplo: monitoramento do fluxo de tráfego para guiar veículos de emergências em rotas mais rápidas.

✓ Redução dos problemas com nuvens:

As nuvens produzem sombras e este sempre foi um problema da fotogrametria clássica, devido à menor altura de recobrimento estas aeronaves não tripuladas são menos afetados pelas nuvens (sombras) sendo capaz de coletar conjuntos de dados espaciais de diversas posições, o que melhora a eficiência no mapeamento e monitoramento de desastres.

✓ Eficiência na Modelagem 3D:

A visão em 3D das estruturas pode auxiliar no monitoramento de prédios, barragens, entre outros, reduzindo a ocorrência de desastres. Os levantamentos aéreos tradicionais ou por satélites obtém informações na maioria das vezes em vista aproximadamente ortogonal, ou seja, vista de cima dos alvos observados, as técnicas de levantamento direto costumam adquirir dados para as fachadas frontal e lateral. A mobilidade dos VANT multirrotores faz com que capturem imagens mais próximas de todas as vistas possíveis facilitando a construção 3D do objeto imageado com uma alta resolução e confiabilidade.

2.6 Modelo Digital do Terreno

Segundo Li *et al.* (2005) um MDT é um conjunto ordenado de pontos de dados amostrados que representam a distribuição espacial de vários tipos de informação no terreno. Onde a expressão matemática poderia ser:

$$K_P = f(X_P, Y_P) \quad (9)$$

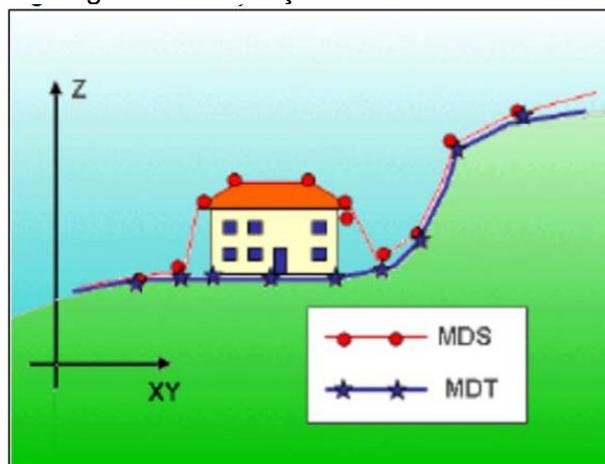
Onde K_P é um valor do atributo do k-ésimo tipo de feição do terreno na posição P (que pode ser um ponto isolado ou uma área em torno do ponto P). X_P e Y_P é o par de coordenadas bidimensional do ponto P. K varia de 1, 2, 3,..., m - número total de informações sobre o terreno e P varia de 1, 2,..., n - números totais de pontos amostrados no terreno. Assim, MDT é uma representação digital da distribuição espacial de uma ou mais tipos de informação do terreno. Na Equação (9), quando $m = 1$ e a informação do terreno é elevação (cotas ou altitudes), então o resultado é a matemática expressão do MDE, sendo então o MDE um subconjunto e componente fundamental do MDT.

Miller e Laflamme (1958) são um dos primeiros autores a tratar destes termos, eles consideram MDT como uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de vértices selecionados com coordenadas conhecidas X, Y e Z em um campo arbitrário de coordenadas.

Felgueiras (2005) traz o conceito de Modelo Numérico de Terreno (MNT) sendo uma representação digital (numérica) computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre.

Em virtude do uso do parâmetro de elevação (Z), algumas bibliografias trazem o MDT como sinônimo MDE ou MDS. No entanto, o MDS e o MDE descrevem a superfície com feições nela existentes, já o MDT carrega apenas a superfície topográfica “nua”. Além disso, o termo MDT incorpora características específicas do terreno para o modelo, como: linhas de rios, cumes, cristas, quebras. (DRUZINA, 2007). Assim, o presente trabalho adota a terminologia MDT (Figura 8).

Figura 8: Diferença entre MDT e MDS.



Fonte: Centeno e Mitishita (2007).

Através da análise do MDT de determinada região é possível realizar diversos estudos, como análises de viabilidade de obras, cálculo de volumes e áreas, análises de corte e aterro para projeto de estradas e barragens, identificação de áreas com maior susceptibilidade a desastres naturais, estudos ambientais, entre outros. Por suas infinitas aplicabilidades esse produto tornou-se essencial para o planejamento urbano.

2.6.1 Processo de geração de um MDT.

O processo de geração de um modelo numérico de terreno pode ser dividido em 3 etapas: aquisição dos dados (amostragem), geração de grades (modelagem) e elaboração de produtos representando as informações obtidas.

2.6.1.1 Amostragem

A entrada de dados compreende a aquisição de um conjunto de amostras que representam a variação de um fenômeno espacial de interesse. Uma amostragem não pode ser insuficiente, subamostragem, nem tampouco ser redundante, superamostragem (FELGUEIRAS, 2005).

As fontes mais comuns de amostras de modelos digitais de terrenos são: arquivos digitais, importados de outros sistemas; bases topográficas com isolinhas e pontos notáveis de máximos e mínimos e; levantamentos em campo transformados, de alguma forma, em informações digitais. A aquisição dos dados de altimetria pode ser através de métodos diretos ou indiretos, pode-se

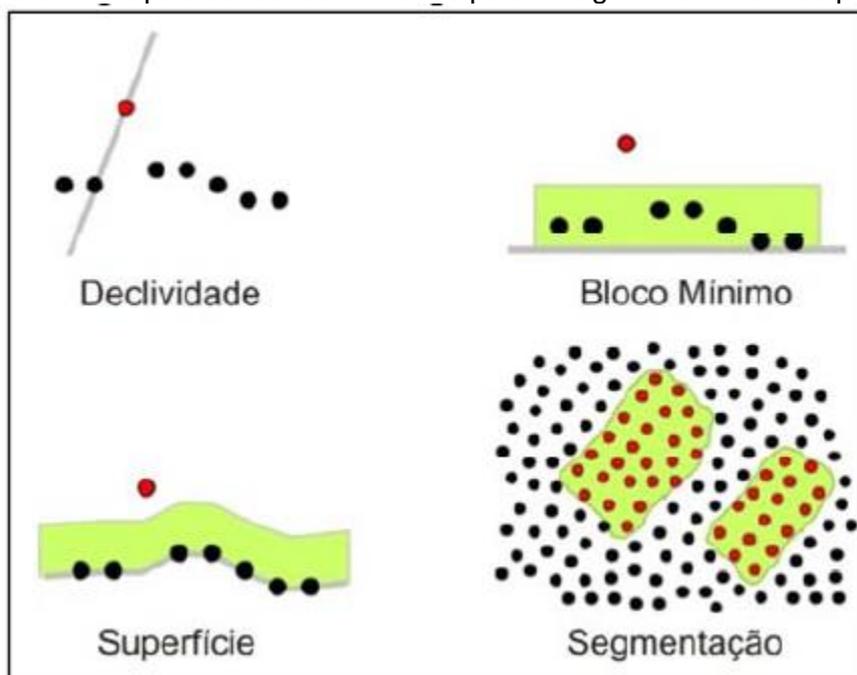
realizar, por exemplo: digitalização de mapas, medidas fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos e levantamentos em campo de dados altimétricos adquiridos por Posicionamento GNSS, VANT, satélites que utilizam Radar e Laser Scanner.

A geração de MDT a partir de métodos de levantamento indireto, como: sistemas fotogramétricos digitais (pela correlação de imagens sobrepostas devidamente orientadas), e tecnologias de varredura LiDAR, se deparam na dificuldade de classificar a nuvem de pontos, separando os pontos que pertencem ao terreno e os pontos que pertencem às edificações, árvores e obstruções do solo em geral (SILVA, 2015a).

Nos últimos anos, surgiram diversos métodos para a filtragem automática e semiautomática da nuvem de pontos, executando a “redução” do MDS para o MDT. Importante perceber o impacto tecnológico positivo nas ciências de medição, solucionando algumas dificuldades existentes há bastante tempo.

De acordo com Silva, (2015a) *apud* Sithole e Vosselman (2003), os principais métodos de filtragem automática de nuvem de pontos utilizam algoritmos com os conceitos de (Figura 9):

Figura 9: Principais conceitos utilizados para filtragem de nuvem de pontos.



Fonte: Silva, (2015a) *apud* Sithole e Vosselman (2003).

- “a) Declividade – utiliza a medida da diferença de altura entre dois pontos e a declividade do terreno dos pontos vizinhos. Caso a diferença de altura supere o limiar definido, determinado com base na declividade, o ponto mais alto não é considerado como pertencente à superfície;
- b) Bloco mínimo – Nesta função um plano horizontal é determinado e sobre ele uma buffer zone de tolerância é definida pelo usuário (região no espaço 3D onde se espera que os pontos de superfície estejam), e os pontos localizados fora do limiar definido são eliminados;
- c) Superfície – Similar ao bloco mínimo, mas ao invés de utilizar um plano horizontal, sobre o qual é criada a buffer zone de tolerância, este método utiliza uma superfície parametrizada para definir a buffer zone onde se espera que estejam os pontos da superfície do terreno;
- d) Segmentação – primeiramente é executada uma segmentação da nuvem de pontos, sendo posteriormente classificada considerando que os pontos de um determinado segmento (cluster) não fazem parte da superfície do terreno caso sua altura seja superior a dos segmentos circunvizinhos.” (pag. 67 SILVA, 2015a *apud* Sithole e Vosselman, 2003).

2.6.1.2 Modelagem

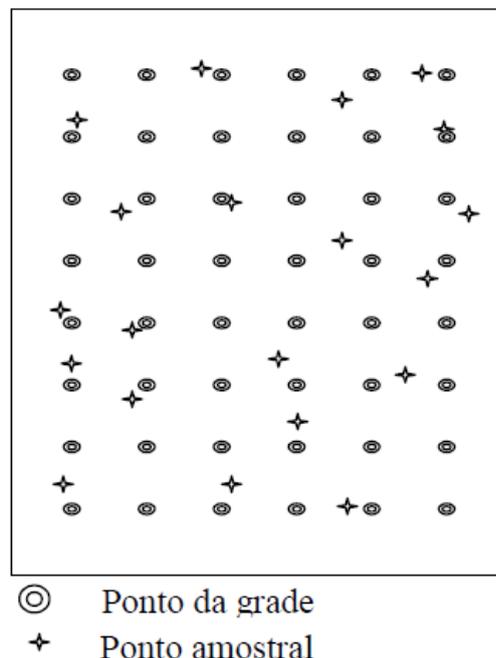
A etapa da modelagem propriamente dita envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para os elementos dessas estruturas. Nesta etapa se obtém uma função definível em toda a região de estudo, mas, esta função, nem sempre é contínua e diferenciável para todos os pontos. Por exemplo, os dados de altimetria, pode-se ter discontinuidades na forma de vales ou cumes e, neste caso, é comum utilizar funções lineares ou funções definidas dentro de sub-regiões da área de interesse (FELGUEIRAS, 2005).

Os métodos de construção de um MDT mais utilizados na prática são os modelos de grade regular retangular e os modelos de grade irregular triangular. O processo de geração destes modelos de grade compreende a construção de uma malha, regular ou irregular, e a definição de funções interpolantes locais.

a) Modelos de Grade Regular.

A Grade Regular retangular é um poliedro de faces retangulares, a geração desta grade consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada (Figura 10) (FELGUEIRAS, 2005). Consiste na coleta dos dados amostrais (X,Y) mantendo uma distribuição espacial dos pontos obtidos “constante”. Esse método é mais indicado na geração do MDT para regiões cujo relevo possui um perfil mais suavizado.

Figura 10: Modelo de grade regular retangular.



Fonte: Modificado Felgueiras, (2005).

Um modelo de grade regular pode também ser gerado a partir de um conjunto de amostras irregularmente espaçadas. Ao gerar grades regulares retangulares a partir de amostras irregularmente espaçadas é comum definir-se funções interpolantes simples (por exemplo: médias ponderadas, splines, etc...)

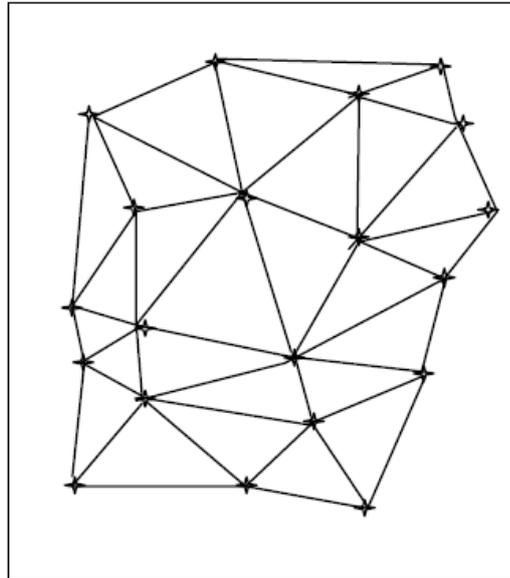
e utilizá-las no local. A estimativa da componente Z de cada ponto da grade é realizada a partir de amostras vizinhas locais, mas uma análise global das amostras é sempre necessária para se encontrar essa vizinhança (FELGUEIRAS, 2005).

Importante ressaltar que para a criação destas estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para se obter uma melhor representação do fenômeno, é necessária realização de interpolações. Na geração de uma malha retangular, a interpolação pode ser realizada por diversos métodos, elas permitem obter um novo conjunto de dados a partir de amostras até em lugares em que não foi necessário realizar a coleta. Dentre os diferentes tipos de interpoladores que são utilizados na geração de um MDT, pode-se citar o método do(a): vizinho mais próximo, curvatura mínima, krigagem, média simples, média ponderada, média ponderada por quadrante e função de base radial.

b) Modelos de Grade Irregular.

O termo TIN, iniciais de "*Triangular Irregular Network*", é o mais usado para se referir ao modelo de grade irregular triangular, esta que tem a estrutura de um poliedro de faces triangulares. Neste modelo os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos (FELGUEIRAS, 2005). A coleta dos pontos amostrais dar-se com espaçamento e distribuição desordenada, apenas em virtude da característica do terreno. Havendo maior densidade de pontos em áreas de maior declividade. Esse método é mais apropriado para superfícies mais acidentadas, pois definirá de forma mais eficiente os detalhes existentes no relevo do terreno (Figura 11).

Figura 11: Modelo de grade irregular triangular.

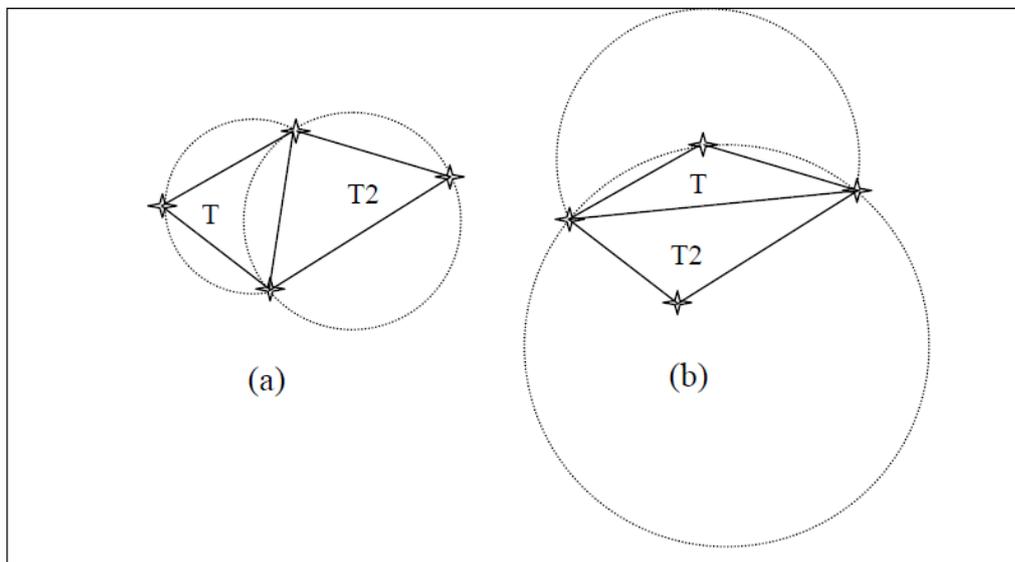


Fonte: Modificado Felgueiras, (2005).

Na geração de uma malha triangular, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha não precisam necessariamente ser estimados por interpolações. O método mais utilizado no SIG para geração da malha triangular é a triangulação de Delaunay,

Esse critério, esquematizado na Figura 12, diz que uma triangulação é de Delaunay se: *“O círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.”* (FELGUEIRAS, pag. 16, 2005).

Figura 12: Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay.



Fonte: Felgueiras, (2005).

O método mais adequado para construção de um MDT depende de como ocorreu a distribuição geométrica de pontos durante a coleta de dados, do comportamento do relevo do terreno, assim como, da finalidade do uso do modelo. Esses detalhes irão auxiliar na definição do tipo de amostragem, interpolador e método que melhor se adequa à área de estudo.

2.6.2 Modelos Digitais Terreno em Modelagem Hidráulica

A modelagem hidráulica nada mais é que uma tentativa de avaliar e simular um sistema complexo, que interage com diversas variáveis e condições, portanto, os resultados serão sempre uma estimativa cuja precisão depende da quantidade e qualidade dos dados de entrada. O Modelo Digital do Terreno é uma das primeiras fontes de informação a ser levada em consideração quando se deseja realizar a modelagem hidráulica. A partir dele, podem ser extraídos vários parâmetros importantes para estudos hidrológicos como: declividade, redes de drenagem, direção e acúmulo do escoamento superficial, comprimento de rampa, identificação de cursos d'água, delimitação de bacias hidrográficas, dentre outros.

Diversos programas especializados em estudos hidráulicos não traziam como obrigatório a inserção detalhada da informação espacial em formato vetorial ou matricial (shapefile, imagens de satélites, DWG, DXF ou similar), isso ocorre porque os modelos hidráulicos trabalham com uma simplificação do sistema hidrográfico e exigem parâmetros que sintetizam as propriedades geométricas do sistema. Posto que, a utilização dos *softwares* para estudos hidráulicos é ainda antes do desenvolvimento dos SIG (PEREZ, 2017).

Atualmente a tendência é uma maior integração dos estudos hidráulicos com os SIG, assumindo que quanto mais detalhadas são as informações da superfície física do terreno utilizadas, mais próximo da realidade serão os resultados da modelagem. Em termos gerais, quanto mais preciso o modelo digital do terreno, mais complexa será a modelagem hidráulica, portanto, os especialistas precisam lidar com ambas as alternativas e saber quando aplicar um ou outro modelo de terreno, tendo consciência do seu alcance e limitações (PEREZ, 2017).

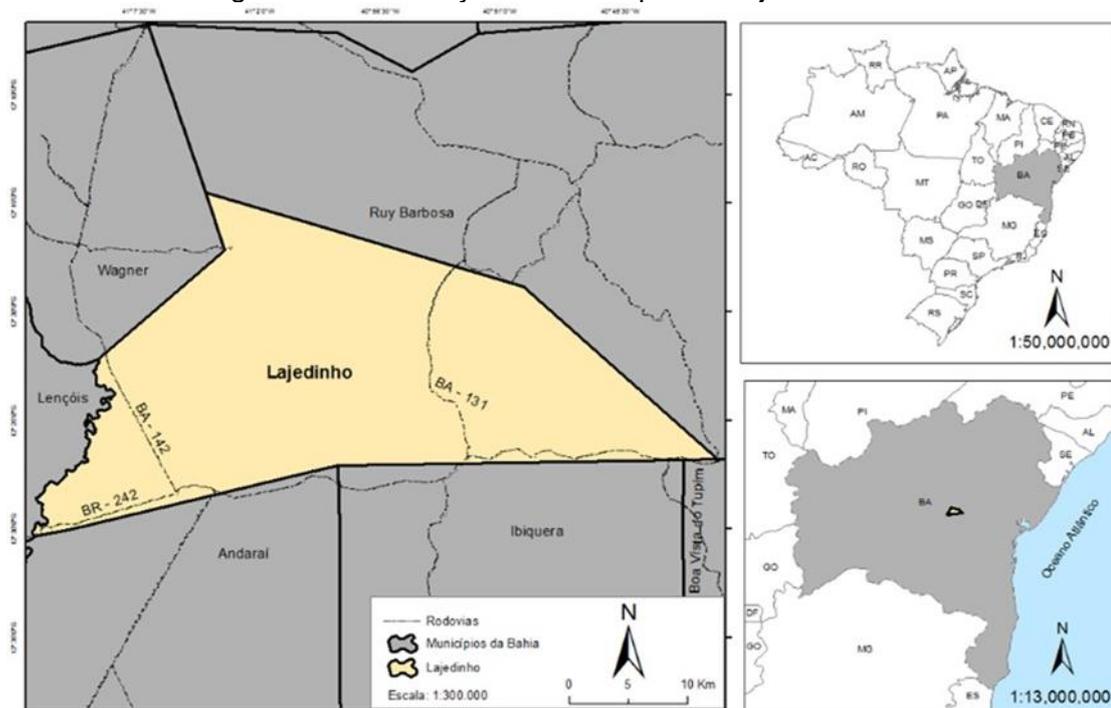
3 ÁREA DE ESTUDO

O município de Lajedinho (Figura 13) está inserido entre as coordenadas geográficas 12° 15' 00" e 12° 45' 00" de latitude sul e 40° 30' 00" e 41° 30' 00" de longitude a oeste de Greenwich e pertence ao Território de Identidade Piemonte do Paraguaçu (Figura 14).

Com uma distância aproximada de 356 km da capital baiana, Lajedinho possui 3.936 habitantes, onde na área urbana estão localizadas 1.245 pessoas e na área rural 2.691, portanto, o 5º menor município da Bahia de acordo com o Censo Demográfico 2010. Possui 1.113 domicílios e deste total 898 (80,7%) possui rendimento nominal mensal de até 1 salário mínimo e 45 (4,04%) não possuem rendimento mensal (IBGE, 2010).

Lajedinho está sob influência do clima semiárido, possui precipitação anual de 633,1 mm, chuvas concentradas entre a primavera e o verão, principalmente entre os meses de novembro e março. A área banhada pelo rio Saracura, riacho dos Negros e riacho Uruguaiana, localiza-se na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, sobre o Patamar do Médio Rio Paraguaçu e Pediplano Karstificado do Bambuí, predominando floresta estacional decidual, (SEI, 2014) destacando-se os tipos de solos latossolos e argissolo, segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (UFBA, 2013 *apud* CPRM, 2005).

Figura 13: Localização do município de Lajedinho - BA.



Fonte: O autor.

Figura 14: Localização do município de Lajedinho no Piemonte do Paraguaçu.



Fonte: SEI, 2014.

A sede do município de Lajedinho está localizada em sua maior parte no leito secundário do rio Saracura, e o canal do rio passa no meio da área urbana, próximo às residências (Figura 15). Por ser uma região com baixos índices pluviométricos a população nunca previu que poderia ocorrer uma precipitação desta magnitude na região. No estudo realizado pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER), o canal existente não só não atende à vazão a escoar, como também não está posicionado no ponto baixo do sistema, ou seja, foi construído tecnicamente de maneira errada (CONDER, 2014).

Figura 15: Cidade de Lajedinho construída ao redor do canal do Rio Saracura.



Fonte: O autor.

No dia 07 dezembro de 2013 a cidade de Lajedinho foi atingida por chuvas torrenciais que elevaram substancialmente o nível do rio Saracura, “Lajedinho: inundação de 2013” (UFBA, 2013). Deste modo, ocorreu inundação na sede municipal, onde as margens do rio Saracura foram ocupadas, ocasionando a destruição de casas e equipamentos urbanos, causando irreparáveis danos sociais, econômicos e naturais, assim como, dezessete vítimas fatais.

O estudo de macrodrenagem do rio Saracura realizado pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – CONDER, em 2014, afirma que a cidade de Lajedinho não dispunha de sistema de drenagem para escoar o volume precipitado que corresponderia a uma chuva de tempo de recorrência de 650 anos. Ainda segundo o estudo, a bacia de 23,65 km² contribuiu nessa ocasião com uma vazão de 183,61 m³/s de água, alagando uma área de 6,76 hectares e com elevação do nível d’água em 1,80 m.

A seguir observam-se algumas imagens do Rio Saracura canalizado na área urbana da cidade após a enchente (Figura 16) e os danos causados pela enchente (Figura 17).

Figura 16: Aspectos do Rio Saracura na área urbana da cidade após a enchente.



Fonte: UFBA, 2013. Adaptado.

Figura 17: Destruição na cidade de Lajedinho.



Fonte: UFBA, 2013. Adaptado.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Esta pesquisa trata-se de um estudo interdisciplinar que envolve diversas áreas da Engenharia Ambiental como a Hidrologia e a Hidráulica de Canais, envolvem-se também outras ciências da Engenharia de Agrimensura e Cartográfica como o Sensoriamento Remoto, Geodésia e Fotogrametria. A vinculação dos conceitos destas engenharias é fundamental já que a modelagem hidrológica e hidráulica se baseia principalmente nas informações do relevo do terreno, ou seja, o método de aquisição das informações físicas interfere diretamente na modelagem, já que cada método tem uma precisão associada a ele.

4.1 Materiais

Diversos equipamentos envolvidos na área da Engenharia de Agrimensura e Cartográfica foram usados para a execução e processamento dos dados dos levantamentos geodésicos e aerofotogramétrico.

Os materiais e licenças para a utilização dos programas pertencem ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (DETG) da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), os dados obtidos em cada etapa foram processados no Laboratório de Geomensura Theodoro Sampaio (LABGEO) e no Laboratório de Mapeamento, Cartografia e SIG (LABMAP), do DETG.

Abaixo alguns equipamentos de campo utilizados nos levantamentos e suas funções:

- a) Receptores GNSS multi-frequência da fabricante *Topcon*, modelo *Hiper Lite Plus*, *Hiper Sr*, e também da fabricante *Spectra*, modelo *Promark 220* para o rastreamento de pontos Base e Rover dos levantamentos geodésicos;
- b) Tripés, para fixação dos receptores GNSS no rastreamento de pontos de campo;
- c) Rádios de comunicação para comunicação e organização da equipe em campo;

d) VANT (*Phanton DJI*) terminal de rádio controle utilizado para realização dos recobrimentos aerofotogramétrico.

A seguir a relação de *softwares* e programas de processamento de dados utilizados no trabalho, ao lado a suas funções:

- a) *Agisoft PhotoScan*, versão 1.1.6 (64 bit), no processamento das imagens do voo aerofotogramétrico;
- b) Quantum Gis 2.8.2, para vetorização das feições, criação e edição dos produtos e elaboração de mapas temáticos;
- c) Pacote Office: Word, Power Point, Excel 2010 – para elaboração de textos, apresentações e análises estatísticas;
- d) Topcon Tools 8.2, para o processamento e ajustamento dos dados GNSS e emissão de relatórios;
- e) AutoCad 2014, para análise, conferência e estudos das feições levantadas.
- f) HEC-RAS, para modelagem Hidráulica.
- g) ArcGis 10, Elaboração de Mapas Temáticos, criação das geometrias para modelagem hidráulica e geração das manchas de inundação através da extensão HEC-GeoRAS.

4.2 Métodos

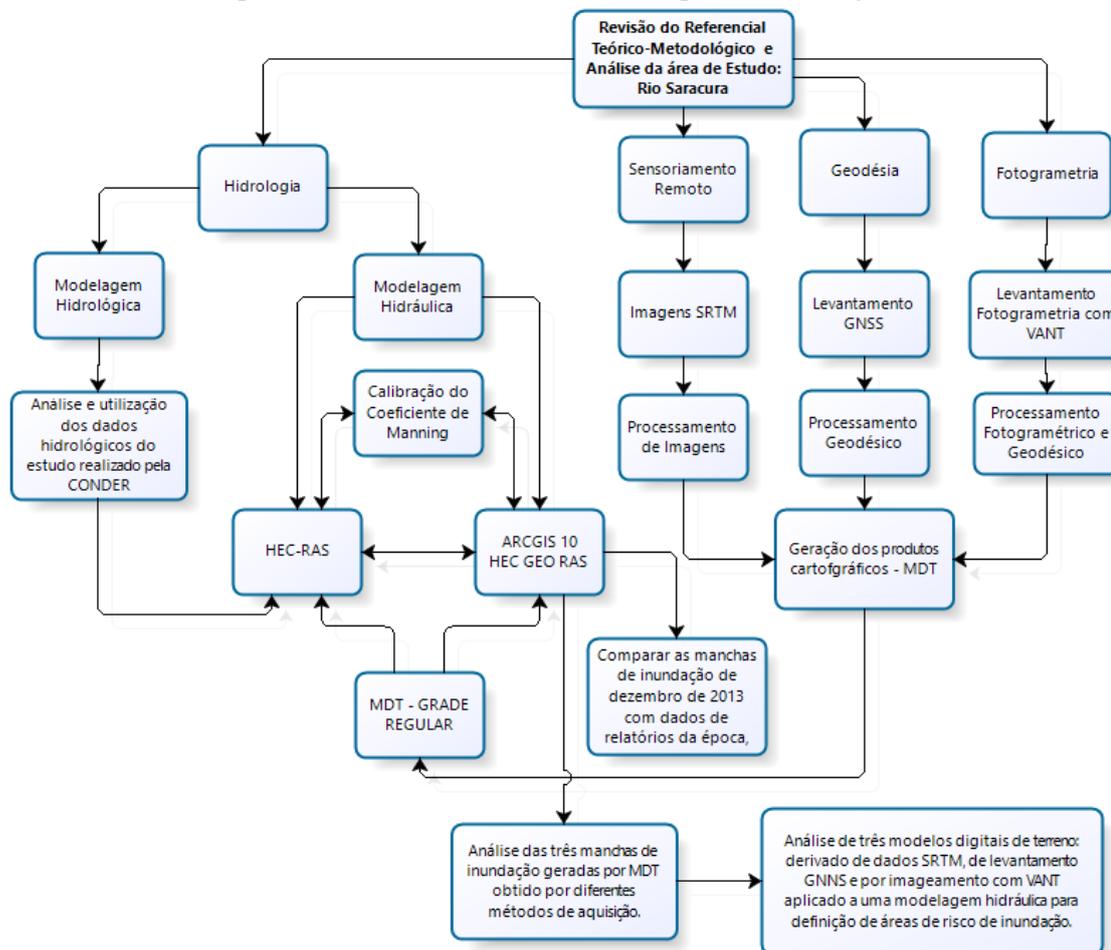
O presente trabalho apresenta como principal objetivo analisar três modelos digitais de terreno: derivado de dados SRTM, de levantamento GNSS e por imageamento com veículo aéreo não tripulado aplicado a uma modelagem hidráulica para definição de áreas de risco de inundação. O estudo

de caso é aplicado no canal do rio Saracura na área urbana do município do Lajedinho/Ba.

Neste contexto, será utilizado o programa computacional HEC-RAS e a extensão do ArcGis 10 chamada HEC-GeoRAS para a modelagem hidráulica do canal em um trecho do rio Saracura. Na aplicação do HEC-RAS e HEC-GeoRAS para modelagem hidráulica e geração das manchas de inundação foram utilizadas três geometrias obtidas por diferentes métodos de aquisição: Sensoriamento Remoto (Imagens SRTM), Levantamento Geodésico GNSS e Fotogrametria com VANT como também parâmetros hidrológicos de entrada como as vazões máximas referentes aos períodos de retorno de 100, 300, 650, 1000 anos obtidas no estudo hidrológico da Macrodrenagem do Rio Saracura – município de Lajedinho – Bahia realizados pela CONDER (CONDER, 2014) e os coeficientes de *Manning* calibrados.

O fluxograma (Figura 18) apresenta resumidamente e de forma esquemática os procedimentos metodológicos realizados na pesquisa para alcançar os seus objetivos.

Figura 18: Procedimentos Metodológicos da Pesquisa.



Fonte: O autor.

4.2.1 Modelo Digital do Terreno - Levantamento Geodésico – GNSS.

Alguns dias após a inundação ocorrida na cidade de Lajedinho uma equipe da Universidade Federal da Bahia (UFBA) composta por professores e estudantes do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica (CEAC), realizou a coleta de dados geodésicos na área.

Segundo informações do Relatório da Missão da UFBA (2013), realizada em Lajedinho, o levantamento planialtimétrico da calha do Rio Saracura na zona urbana foi realizado com a coleta de pontos através de receptores GNSS de dupla frequência. Quatro equipes coletaram cerca de 430 pontos em um dia de trabalho (Figura 19), estabelecendo pontos em secções aproximadamente

transversais ao curso d'água (Figura 20). O método utilizado para rastreamento GNSS dos pontos foi o Posicionamento Relativo Semicinemático (*Stop and Go*). A área de abrangência do levantamento foi de aproximadamente 458.428 m². A incerteza posicional em cerca de 95% dos pontos levantados foi de +/- 2 mm para as coordenadas planimétricas (N, E), e de +/- 4 mm para as coordenadas altimétricas (H) (UFBA, 2013).

Figura 19: Aspectos da medição com receptores GNSS.



Fonte: UFBA, 2013.

A equipe da UFBA realizou ainda a criação do Modelo Digital de Terreno obtido a partir da interpolação 3D entre os pontos levantados. O plano da superfície da enchente foi obtido por interpolação linear entre os 10 pontos georreferenciados onde foram medidas as alturas máximas de inundação. Eles utilizaram ainda o aplicativo ArcGis para a representação da superfície de inundação, determinando a área de inundação (102.802 m²) e o volume de água (282.991 m³) (UFBA, 2013).

Figura 20: Os pontos em vermelho representam a disposição espacial do levantamento realizado pela Equipe da UFBA; os pontos em roxo indicam onde foram medidas as alturas máximas da enchente.



Fonte: UFBA, 2013.

A equipe da UFBA responsável pelo levantamento GNSS disponibilizou as coordenadas tridimensionais dos pontos coletados. Através deste levantamento geodésico foi gerado o Modelo Digital de Terreno em grade regular no *software* ArcGis10, o qual foi utilizado na extensão HEC-GeoRAS para a geração da geometria e modelagem hidráulica.

O desastre ocorrido em dezembro de 2013 em Lajedinho correspondeu a uma chuva de tempo de recorrência superior a 650 anos (CONDER, 2014). Desta maneira, ao simular a inundação, comparar-se-á as áreas obtidas pela Equipe da UFBA e as obtidas pela modelagem hidráulica deste trabalho, assim como, a profundidade dos pontos medidos.

4.2.2 Modelo Digital do Terreno - Imagens SRTM

Após o *download* das imagens SRTM da região de interesse, estas foram então processadas e reprojctadas para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000 e Sistema de projeção UTM Fuso 24 Sul no software ArcGis10. Em seguida, recortadas para detalhar a região de interesse que seria o canal do rio Saracura no seu trecho urbano.

As imagens SRTM de 30m foram reamostradas para 15m através do método Bilinear para facilitar a modelagem hidráulica. Importante ressaltar que esta reamostragem de pixels não melhora a resolução espacial, apenas define os pixels do raster para um tamanho menor não acrescentando nos alvos níveis de detalhes mais precisos.

Após estes procedimentos, foi criado o modelo raster em grade regular da área. Com este modelo em ambiente SIG iniciou-se os procedimentos para modelagem hidráulica.

4.2.3 Modelo Digital do Terreno - Levantamento Aerofotogramétrico - VANT

O levantamento da área de estudo através da Fotogrametria com VANT está dividida em quatro etapas: planejamento de vôo e de aquisição de dados, coleta de dados, processamento fotogramétrico e geodésico, elaboração dos produtos fotogramétricos Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS).

➤ Planejamento de vôo e de aquisição de dados: envolve a definição da área de interesse (entorno do canal do Rio Saracura na zona urbana de Lajedinho - BA) e dos requisitos da missão a fim de determinar os parâmetros de voo, como: recobrimento lateral e longitudinal, pontos de interesse (*waypoints*), altura de vôo, resolução espacial (GSD), número de fotos, entre outros.

➤ Coleta de dados: De posse do plano de voo, realiza a sua verificação, observando as características do terreno, principalmente no que diz respeito

aos lugares de lançamento e pouso do VANT, estas verificações podem levar a ajustes nos planos de voo. Depois que os planos de voo forem verificados, o VANT poderá realizar a coleta de dados.

➤ **Processamento Fotogramétrico e Geodésico:** O processamento de dados não é executado em tempo real e sim quando a equipe de campo retorna ao escritório. De posse de todos os dados coletados e organizados, são eles: o conjunto das imagens digitais e arquivo de log contendo as coordenadas do centro de cada imagem do equipamento GNSS e as inclinações *Kappa*, *Phi* e *Ômega* ou *Yaw*, *Pitch*, *Roll* do sistema inercial - IMU, de todas as imagens; e também as coordenadas dos pontos de apoio geodésico, são realizadas as fases do processamento.

➤ Após o processamento fotogramétrico e geodésico são criados os produtos fotogramétricos georreferenciados necessários, como: Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT), curvas de nível.

4.2.3.1 Planejamento de Voo

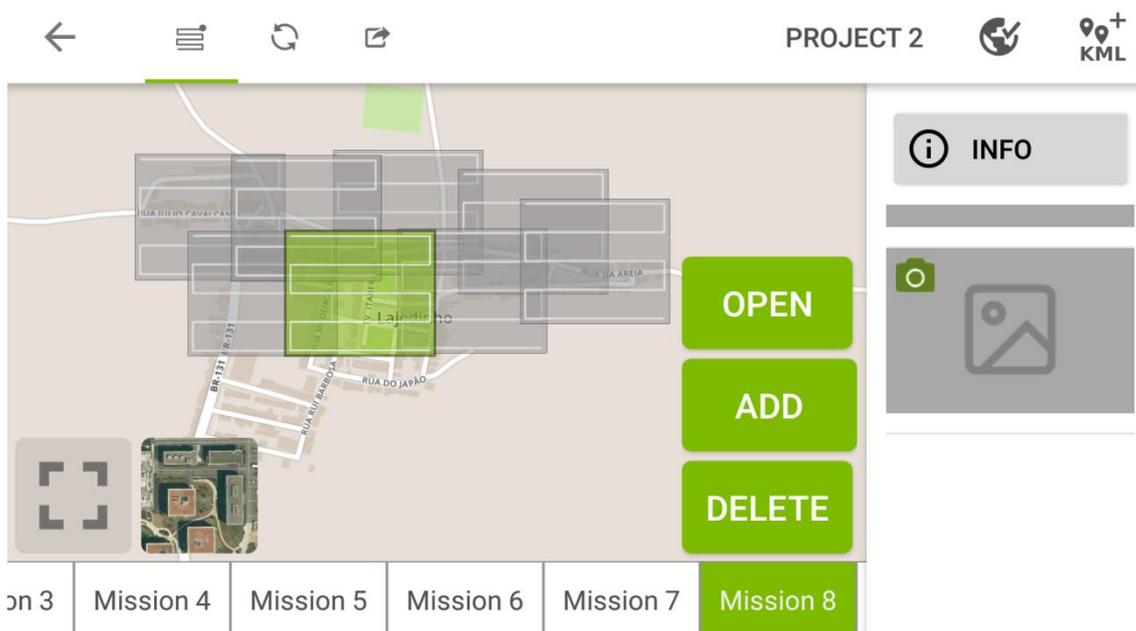
O recobrimento aerofotogramétrico abrangeu uma área aproximada de **55,3 ha**, considerando a área urbana do município de Lajedinho/Ba no entorno do canal do rio Saracura. Para este levantamento foi utilizado o VANT modelo *DJI Phantom Vision 2*, na época único equipamento disponível para a pesquisa.

O objetivo principal do levantamento aerofotogramétrico foi à produção de um modelo digital de terreno e secundariamente uma ortofoto da área de estudo. No planejamento em escritório estipularam-se valores sub-métricos de exatidão posicional planimétrica e altimétrica como meta a ser alcançada com o intuito de demonstrar a eficácia do método modelagem hidráulica na definição de áreas de risco de inundação se comparado com modelos derivados de dados SRTM e de levantamento GNSS.

O planejamento do voo foi preestabelecido em *software* específico: *Pixel4D Capture*, este, utiliza imagens do *Google Earth* para um melhor planejamento de *waypoints*. A execução do recobrimento aéreo ocorreu nos

dias 11 e 23 de dezembro de 2016, sendo realizado 8 voos cada um com 4 faixas de voo, a uma altura de voo aproximada de 100 metros (Figura 21). Utilizou-se uma câmera não métrica grande angular VISION FC200, padrão do VANT, de distância focal de 3,21mm e 14 Megapixels. Nesse levantamento houve apoio de campo já que o georreferenciamento direto através do GPS de Navegação embutido no VANT não atende a finalidade do trabalho.

Figura 21: Planejamento e Linhas de voo executadas em Lajedinho, tela do *software* Pixel4D Capture.



Fonte: O autor

A resolução geométrica da imagem tem muita importância para as avaliações de precisão e identificação de feições no terreno. Para as imagens digitais, a relação de escala tradicional não é apropriada. O elemento mais importante que deve ser analisado é o TPT (Tamanho do Pixel no Terreno) ou o GSD (*Ground Sample Distance*) que pode ser representado pela dimensão do lado do quadrado do terreno imageado obtido pela relação (SILVA, 2015b):

$$TPT = te * \frac{H}{f} \quad (10)$$

Em que:

te: tamanho do elemento sensor em mm

H: altura de voo em m

f : distância focal em mm

Considerando os dados do sensor e do voo utilizados no experimento, calculou-se o TPT da imagem:

Tamanho do elemento sensor: $t_e = 0.0000014$ mm

Altura do voo: $H = 100$ m

Distância focal: $f = 5,00$ mm

Aplicando a fórmula, temos, o valor aproximado do $TPT = 0,028$ m

*Neste caso a altitude utilizada para o cálculo foi a altitude geométrica em relação ao elipsóide de referência.

De forma teórica, este tamanho de TPT quer dizer que cada pixel registra a média da radiação emitida por áreas de 2,8 cm x 2,8 cm de tamanho. Na prática, a identificação se torna possível, com certa facilidade, a partir de feições com dimensões que cobrem cerca de três pixels e a interpretação a partir de feições medindo oito a dez vezes o tamanho do pixel. Ou seja, na prática será possível a identificação de um alvo de 8,4 cm e uma interpretação das feições com 22,4 cm a 28,0 cm. De maneira geral, percebe-se que a identificação de objetos varia muito com a forma do objeto e a diferença na resposta espectral dos objetos em seu entorno. Por exemplo, a observação de feições lineares e uma alta variação de contraste do local imageado torna mais fácil a diferenciação de objetos.

Com o dado do $TPT = 0,028$ m pode-se encontrar também a representação do terreno para cada foto:

Dada a resolução 4384×3288 pixels da câmera tem-se:

$$4384 \times 0.028 = 122,752 \text{ m}$$

$$3288 \times 0.028 = 92,064 \text{ m}$$

Desta maneira, cada fotografia retrata um retângulo de 122,752m X 92,064m, representando uma área de 11.301m².

No recobrimento realizado considerou-se uma sobreposição aproximada longitudinal e lateral de 80% e 60% respectivamente; ao total foram retiradas 235 fotos por toda área de estudo.

4.2.3.2 Levantamento GNSS de Apoio para Aerofotogrametria.

Os pontos de apoio isolados (mínimo de 3) podem ser usados para orientar modelos, mas no geral e neste trabalho serviram para a fototriangulação. A fototriangulação pode ser feita somente com os pontos de apoio, apoiada com levantamento GNSS ou com o georreferenciamento direto (que é a proposta dos VANT). O uso de pré-sinalização aumenta a precisão e é especialmente recomendada em áreas com poucos pontos fotoidentificáveis.

Neste estudo, para a coleta dos pontos de apoio, foram utilizados alvos pré-sinalizados e feições urbanas fotoidentificáveis. O procedimento de escolha dos pontos, sua distribuição e coleta em campo foram determinados analisando o plano de voo; ao total foram selecionados 16 pontos de apoio bem definidos, que poderiam ser ocupados em campo, mas, *in loco* pela dificuldade de acessar áreas particulares foram coletados 14 pontos de apoio (Figura 22).

Figura 22: Pontos de Apoio coletados em campo, alvos pré-sinalizados (cerâmica de 16x16cm) e feições urbanas fotoidentificáveis.



Fonte: O autor

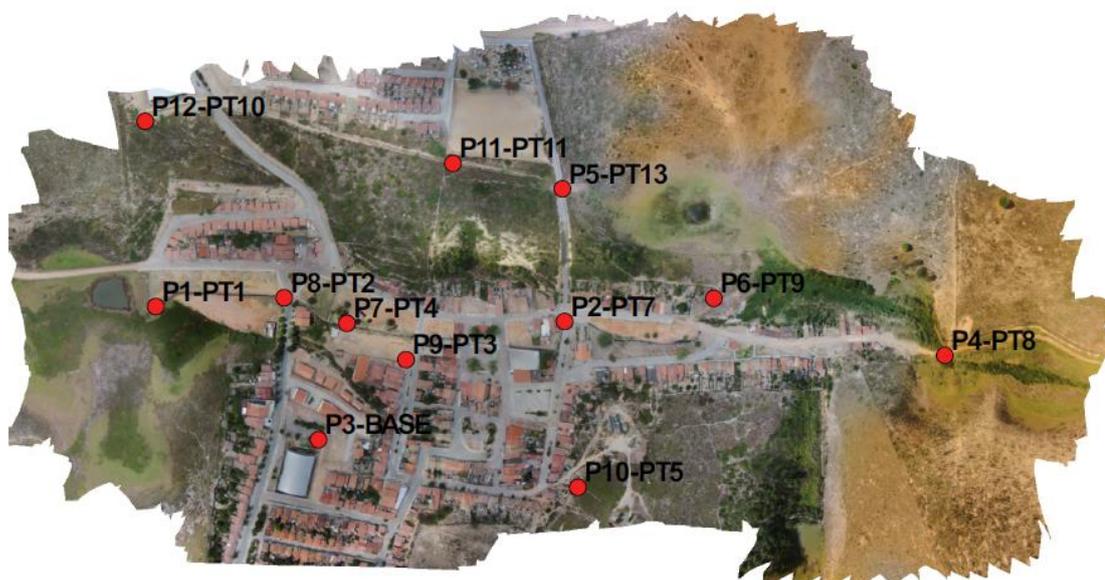
A metodologia para escolha e identificação de pontos de apoio seguiu alguns cuidados, os principais foram:

- a) Pontos mais próximos das bordas e cantos da imagem;
- b) Pontos bem distribuídos espacialmente, em toda a área do levantamento;
- c) Pontos preferencialmente obtidos das junções de feições lineares como: “quinas” de meio fio das vias internas e externas;

- d) Evitar locais com obstrução dos sinais dos satélites visando evitar o efeito do multicaminhamento, como: edificações, árvores, entre outros que estejam ao redor do ponto escolhido;
- e) Evitar ao máximo ponto próximo a poste, devido a interferências eletromagnéticas que possam ocorrer e problemas de análise com a sombra;
- f) Pontos com acesso facilitado, preferencialmente dentro da cidade;
- g) Pontos com visada do objeto e diferença espectral acentuada no seu entorno.

Foram coletados 14 pontos de apoio ao total, destes, 12 pontos foram utilizados (Figura 23). Ocorreram problemas na coleta de pontos bem distribuídos já que alguns pontos não puderam ser coletados, devido à dificuldade de acesso a propriedades particulares nos limites da área de voo.

Figura 23: Pontos de Apoio utilizados no processamento fotogramétrico.



Fonte: O autor

O levantamento GNSS ocorreu no dia 11 de dezembro de 2016. O equipamento geodésico de multi-frequência, o Hiper Sr da Topcon, foi utilizado para rastrear os vértices de apoio básico (BASE), ajustado posteriormente com as estações da RBMC de Salvador Capitania dos Portos (SSA1) e Irecê

(BAIR). Os equipamentos foram configurados para o método Posicionamento Relativo Estático e o tempo de rastreamento do ponto foi de 4h 40 min, seguindo a orientação do IBGE para levantamentos geodésicos. A taxa de gravação de dados no receptor foi configurada para 1 segundo e a máscara de elevação para 10°(Base e Rover), o relatório de transporte de coordenadas pode ser visto no Apêndice B.

Os pontos de apoio foram ocupados durante aproximadamente 12 a 40 minutos rastreados no método Posicionamento Relativo Estático Rápido pelo equipamento geodésico de multi-frequência Hiper Sr da Topcon. Outras informações, resultados e precisões encontradas estão especificados no relatório de processamento e ajustamento, no Apêndice C.

4.2.3.3 Processamento das Imagens Fotogramétricas e Geração dos Produtos.

Os programas de processamento de dados aerofotogramétricos utilizados a partir de dados obtidos com VANT, não seguem etapas teoricamente bem definidas, como o processamento realizado através de programas utilizados na fotogrametria convencional, por exemplo: orientações interior e exterior, retificação e normalização, geração de modelos numéricos, geração de ortomagens e restituição fotogramétrica digital. Desta maneira, eles se tornam mais difíceis de realizar manipulações mais técnicas em cada parte do processo. A característica principal destes programas é a automatização de todo o processamento, facilitando a manipulação por pessoas leigas no assunto.

O voo realizado não contou com uma pré-calibração da câmera. A calibração automática da câmera de pequeno formato (VISION FC200) foi realizada através dos programas utilizados para o processamento fotogramétrico. A maioria dos programas de fotogrametria para VANT possuem integrado um módulo de calibração automática. O *software* utilizado, o *PhotoScan*, realizou a calibração automática da câmera, encontrando padrões de orientação interior especificados no Apêndice A.

O programa utilizado realiza inicialmente o processo de fototriangulação por georreferenciamento direto, que tem por finalidade determinar as coordenadas do terreno (ou do espaço-objeto) de milhares de pontos fotogramétricos selecionados automaticamente nas imagens fotográficas e as posições e orientações das imagens. Em seguida com esses pontos é obtido um MDS e depois um MDT. Com o modelo, o *software* realiza a ortorretificação das imagens, que visa à correção das imagens para que fiquem ortogonais, realizando a transformação de projeção perspectiva central para ortogonal, corrigindo o deslocamento devido ao relevo. Durante o processo as imagens ortorretificadas formam um mosaico e é gerada a ortofoto final. Atualmente existem diversos programas para a Fotogrametria de VANT. Neste trabalho utilizou-se o *software PhotoScan* no processamento de dados fotogramétricos.

4.2.3.4 Processamento Aerofotogramétrico no *software* PhotoScan.

O *PhotoScan*, da empresa Agisoft, é um programa elaborado para modelagem 3D baseado em imagens arbitrárias, que cria um conteúdo 3D profissional, eficiente em condições controladas e não controladas. Os processos são em sua maioria automatizados. Dentre suas funções é possível realizar fototriangulação aérea e terrestre, geração de nuvens de pontos, modelos 3D, MDS, MDT, ortofoto, além de exportação dos dados para diversos formatos geralmente compatíveis com programas similares.

No trabalho utilizou-se a versão 1.2.6 do *PhotoScan*. A licença deste *software* possuída pelo Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia da UFBA e a estrutura do seu laboratório foram utilizadas para realizar o processamento fotogramétrico.

O *PhotoScan* segue alguns procedimentos principais para o processamento fotogramétrico:

- a) O *software* não torna a criação de um projeto e local de salvamento obrigatório, mas, recomenda-se realizar este procedimento inicialmente.

- b) Definição das configurações de preferência como o sistema de referência geodésico e sistema de projeção, caso haja a necessidade, sendo configurado para Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000, e Sistema Projeção UTM - Fuso 24S.
- c) Inserção de fotos selecionadas, podendo ser removidas as imagens desnecessárias.
- d) Inserção dos dados (arquivo de log): coordenadas do centro de cada imagem do equipamento GNSS e as inclinações *Kappa*, *Phi* e *Ômega* ou *Yaw*, *Pitch*, *Roll* do IMU, de todas as imagens. Essas informações também podem ser lidas diretamente dos dados EXIF de cada imagem.
- e) Inserção dos dados de calibração, se não possuir as especificações da câmera, o *software* realizará a calibração automática da câmera, processo que foi executado no trabalho.
- f) Alinhamento das fotos. Nesta etapa é realizada a identificação de pontos homólogos nas imagens, encontra-se a posição da câmera e a orientação para cada foto, construindo um modelo de nuvem de pontos esparsos. Esta etapa corresponde na fotogrametria convencional à fototriangulação e pode ser escolhida entre baixa, média e alta precisão.
- g) Construção da densa nuvem de pontos. Com base na estimativa posicional da câmera o programa calcula as informações das distâncias aos pontos para cada câmera para serem combinadas numa única nuvem de pontos densa. Esta etapa envolve procedimentos de detecção e relação de pontos.
- h) Construção de representação (modelo) em malha de polígonos 3D. Pode utilizar como base a densa nuvem de pontos construída anteriormente.
- i) Inserção dos pontos de apoio (GCP – *Ground Control Points*) com suas coordenadas no projeto para a fototriangulação. Caso seja usado

o georreferenciamento direto, os pontos de apoio servem para melhorar a exatidão dos produtos finais, nos outros casos servem para dar escala e orientar esses produtos.

- j) Classificação da nuvem de pontos. Nesta etapa, manualmente ou através de um algoritmo utilizado no *software*, pode-se filtrar a nuvem de pontos, “reduzindo” o modelo 3D de MDS para MDT. Ou seja, os pontos que representam os objetos acima do solo são removidos e a superfície terrestre é reconstruída através de um processo de interpolação dos pontos.
- k) Geração de textura. A escolha do modo de mapeamento de textura visa a melhor determinação da textura do objeto, visando manter uma melhor qualidade visual do modelo final, neste caso, a opção escolhida no modo de textura foi ortofoto.
- l) Exportação dos resultados. Nesta etapa foi realizada a geração e exportação da ortofoto e Modelo Digital de Terreno (MDT),

O Relatório com o processamento de todas as imagens do levantamento aéreo, com pontos de apoio para a fototriangulação, pode ser visto com mais detalhes do processo no Apêndice A.

4.2.3.5 Modelo Digital do Terreno – VANT

Após a geração do MDS, a filtragem da nuvem de pontos e geração do MDT, existe a possibilidade de exportação do modelo para diversas estruturas como: nuvem de pontos, curvas de nível e modelo raster. O Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000 e Sistema de projeção UTM Fuso 24 Sul foi adotado nos produtos gerados.

Desta maneira, o modelo raster do MDT foi exportado e geraram-se curvas de nível com equidistância de 5 metros. Ao analisar as curvas de nível observaram-se diversas inconsistências ligadas alta densidade (17 milhões de pontos) e variabilidade da informação altimétrica gerada na nuvem densa, sendo necessária a edição manual destas curvas para que o modelo de terreno

pudesse ser inserido na modelagem hidráulica. Dentre as inconsistências encontradas estavam: polígonos isolados, quebras bruscas nas curvas de nível e conexões inadequadas de segmentos.

Após a edição final das curvas de nível, utilizou-se a extensão *Toporaster* do ArcGis 10 para recriar o modelo de terreno raster em formato de grade regular, e por fim, ser analisado e utilizado na modelagem hidráulica.

4.2.4 Dados hidrológicos

Para simulação, considerou-se a modelagem hidrológica realizada pelo estudo de macrodrenagem do Rio Saracura – Município de Lajedinho /Bahia realizado pela CONDER, 2014. Utilizou-se para a geração das manchas de inundação as vazões máximas referentes aos tempos de recorrência deste estudo hidrológico: 100, 300, 650, 1000 anos como pode ser visto na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Vazão máxima para cada tempo de recorrência estudado.

Tempos de Recorrência (Tr) – Anos	Vazão Máxima – Qmax (m³/s)
100	86,89
300	125,75
650	160,81
1000	183,61

Fonte: Modificado de CONDER, 2014.

A escolha das vazões máximas dos tempos de recorrência para este estudo foi realizada a fim de representar e simular a inundação ocorrida em Lajedinho em 2013, que seria a vazão máxima para o tempo de recorrência de 650 anos, todavia se escolheu a vazão máxima para o tempo de recorrência de 1000 anos para simular uma inundação maior e a vazão máxima dos tempos de recorrência de 100 e 300 anos para simular manchas de inundação menores com a probabilidade maior de ocorrência.

O estudo realizado pela CONDER para obtenção dos parâmetros hidrológicos utilizou a equação de chuvas obtida por interpolação, realizada utilizando o método do inverso da quinta potência da distância e considerando as informações de todas as localidades em que a equação de intensidade-

duração-frequência da precipitação é conhecida. Já o tempo de recorrência para avaliação de vazões máximas foi assumido a partir do estudo do tempo de recorrência do último evento (CONDER, 2014).

4.2.5 Modelagem Hidráulica.

A modelagem hidráulica, um dos procedimentos principais envolvidos nesta pesquisa, visa especificamente à obtenção do nível d'água máximo para cada vazão máxima referente aos tempos de recorrência e a delimitação das manchas de inundação produzidas.

O Sistema de Informação Geográfica ArcGis 10 da empresa Esri, o modelo hidráulico computacional HEC-RAS e sua extensão HEC-GeoRAS, desenvolvidos pelo corpo de engenheiros do exército americano foram escolhidos para utilização neste trabalho. A escolha pelo HEC-RAS e sua extensão HEC-GeoRAS foi feita, devido a estes programas serem de uso livre e suas aplicações serem amplamente realizadas em estudos hidráulicos no meio acadêmico e também para trabalhos técnicos.

A modelagem hidráulica no HEC-RAS exige duas naturezas de dados básicos para iniciar uma simulação: geométrica (MDT), abrangendo às seções transversais a serem modeladas, e os parâmetros hidráulicos.

A modelagem da área de inundação no HEC-RAS necessitou um detalhamento maior das seções transversais para a obtenção dos limites inundáveis. Para isto, a extensão HEC-GeoRAS foi utilizada, a qual permitiu derivar e inserir as seções transversais ao longo do trecho compreendido na planície de inundação; a largura do canal e a delimitação de onde a água pode chegar com uma possível cheia.

Os aspectos geométricos utilizados foram baseados no Modelo Digital de Terreno obtido por Levantamento Geodésico de Campo, pelas imagens SRTM e o imageamento através de plataformas VANT. Com estes dados, se conseguiu conhecer de uma melhor maneira as formas do relevo para realização de uma modelagem mais apropriada, assim sendo, as geometrias foram introduzidas no HEC-RAS. Importante ressaltar que todas as

informações utilizadas estão georreferenciadas ao Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000 e projetadas em UTM fuso 24 Sul.

Outros dados básicos inseridos no HEC-RAS foram os parâmetros hidráulicos e de configuração dos perfis simulados de fluxo permanente necessário aos cálculos do nível d'água máximos. Através destes, foi estabelecida a dimensão espacial da inundação por meio do mapeamento da mancha de inundação, cujo limite foi exportado para o trabalho em ambiente SIG.

4.2.5.1 Geometria e seções transversais.

A geometria necessária para a modelagem hidráulica foi obtida pela extensão HEC-GeoRAS a partir do MDT baseado em estrutura de dados regular. Para obtenção da geometria e seções transversais foram necessários definir o curso principal do rio saracura através do canal, em seguida as margens do canal existente e também os limites máximos por onde se estima preliminarmente que a água possa atingir em situações de cheia no local.

Em seguida, foram traçadas as seções transversais ao longo de todo trecho do canal principal do Rio Saracura. Estas seções foram traçadas seguindo a metodologia da extensão HEC-GeoRAS; o espaçamento dado entre as seções foi em sua maioria uniforme, com 40 metros de distância, resultando em um total de 24 seções. Na Figura 24 podem-se encontrar as 24 seções, distribuídas ao longo de todo o trecho do canal principal do Rio Saracura.

Depois da obtenção de todos os dados geométricos necessários com base no Modelo, é então exportada toda a geometria para o HEC-RAS, onde os procedimentos da modelagem hidráulica serão realizados.

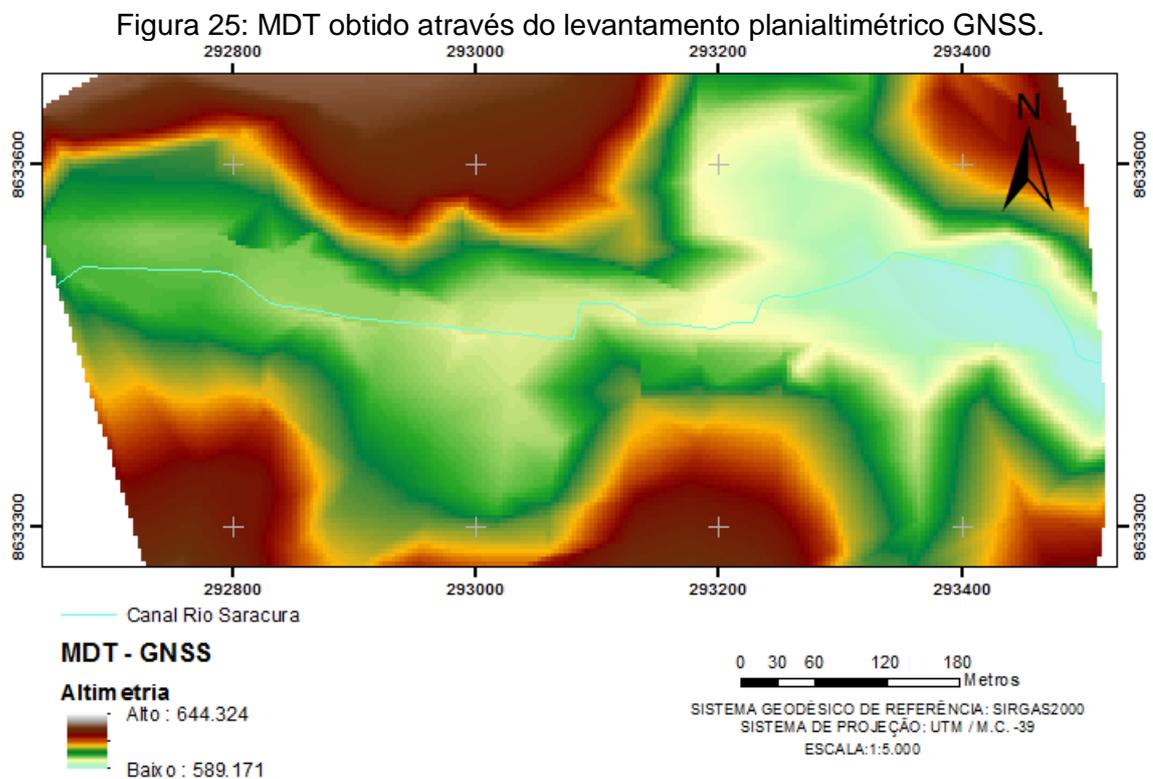
(Equação 4, ver item 2.2). As simulações foram realizadas considerando-se o regime de escoamento permanente unidimensional gradualmente variado, dessa forma, o valor obtido refere-se à área inundada para as máximas cheias provocadas pelos eventos de chuva simulados no estudo. O regime adotado nas simulações foi o Misto, devido ao canal ter trechos de escoamento lento e de escoamento rápido, ou seja, apresentando trechos de regime subcrítico e supercrítico.

As modelagens produzidas foram exportadas do HEC-RAS para o ArcGis 10 – HEC-GeoRas, onde foram gerados os limites de manchas de inundação e os dados de profundidades de cada mancha simulada, para estimativa das áreas e volumes das inundações.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

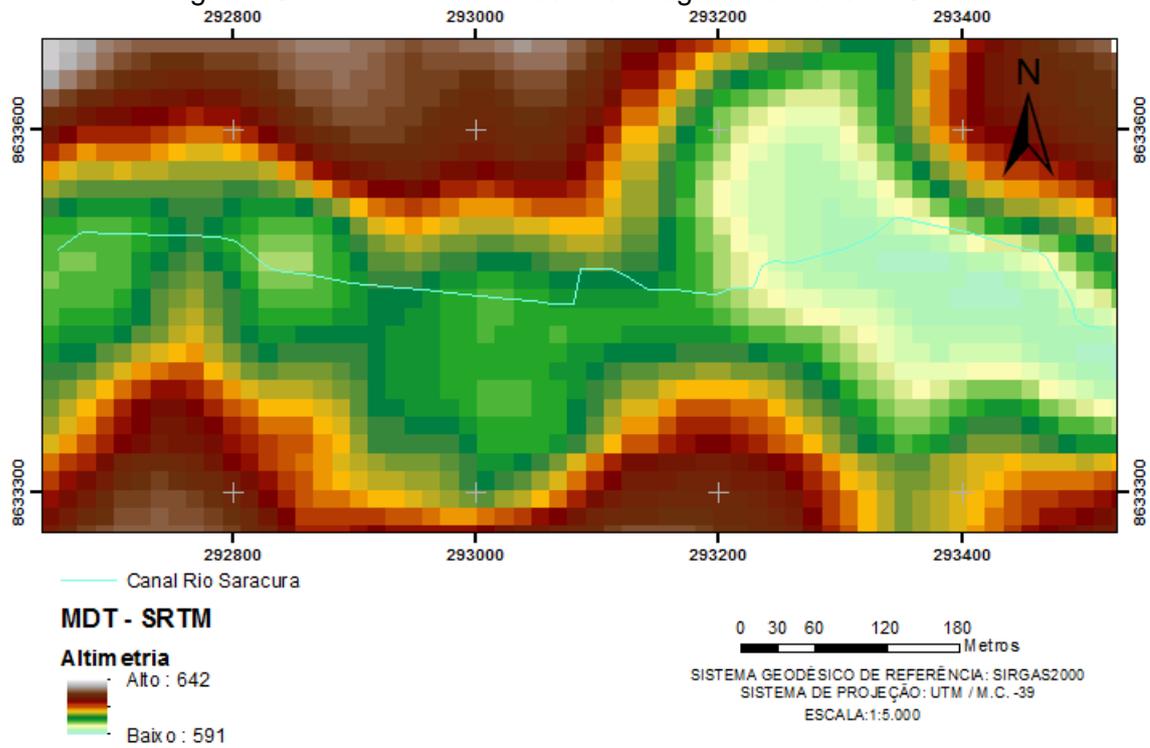
5.1 Modelos Digitais de Terreno

Nas figuras 25, 26 e 27, observam-se Modelos Digitais do Terreno gerados através dos dados de três métodos de aquisição diferentes: o levantamento GNSS, imagens SRTM e imageamento com VANT. Estes modelos foram utilizados na extensão HEC-GeRAS para a geração da geometria e modelagem hidráulica.



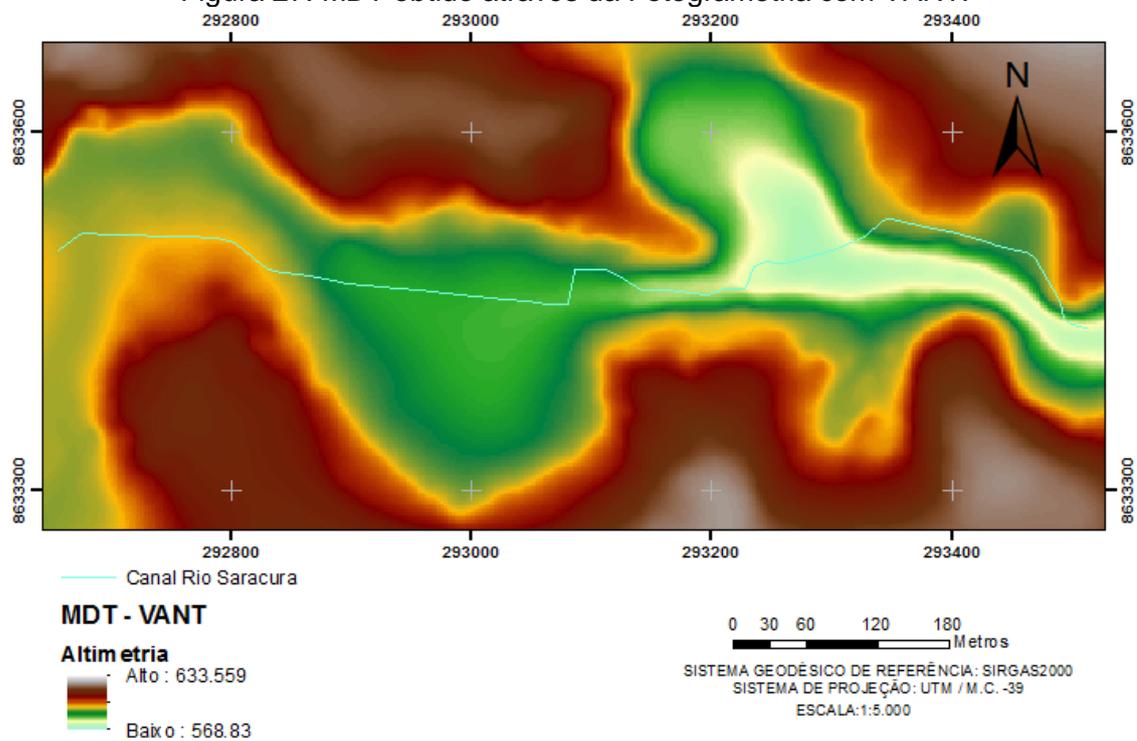
Fonte: O autor

Figura 26: MDT obtido através das Imagens de Radar – SRTM.



Fonte: O autor

Figura 27: MDT obtido através da Fotogrametria com VANT.



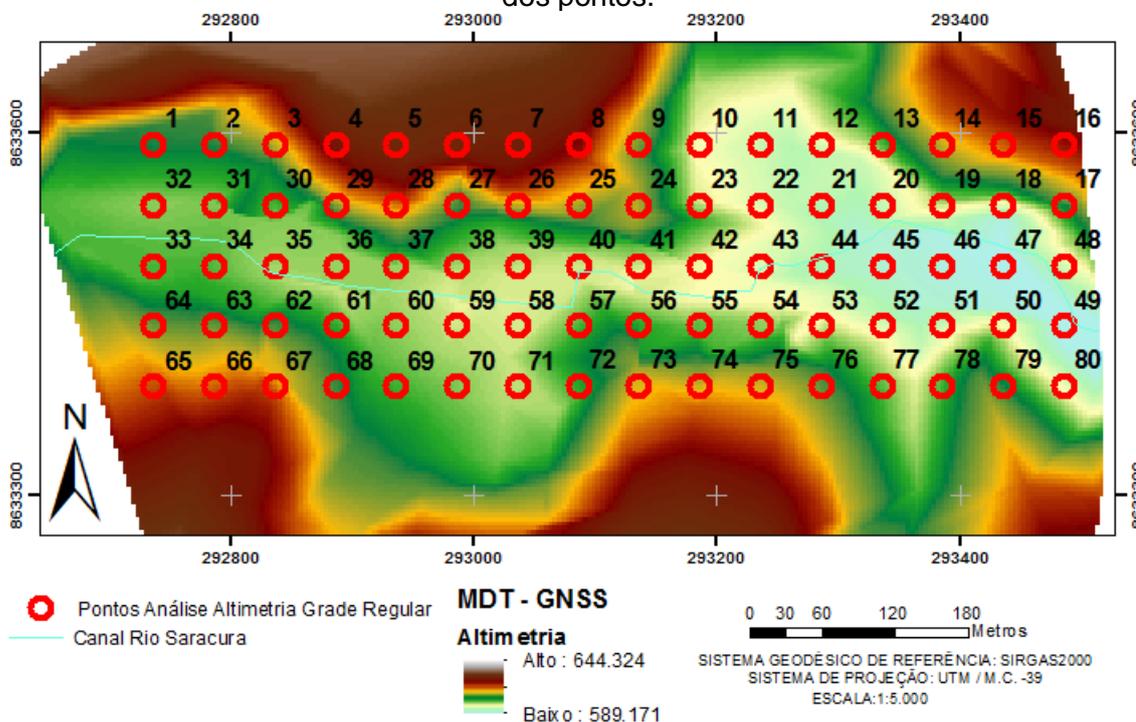
Fonte: O autor

Ao total foram realizadas doze modelagens hidráulicas, quatro para cada Modelo Digital de Terreno produzido, ou seja, quatro modelagens para o MDT produzido através de Levantamento GNSS, quatro modelagens para o MDT produzido através das Imagens SRTM e quatro modelagens para o MDT produzido por imageamento com VANT, para as vazões máximas dos quatro tempos de recorrência escolhidos (100, 300, 650 e 1000 anos).

5.2 Acurácia dos Modelos Digitais do Terreno

Para avaliar a acurácia da altitude do MDT gerado pela Fotogrametria com VANT e através de dados SRTM, considerou-se o MDT gerado através de levantamento GNSS como referência. Desta maneira, criou-se uma grade regular de 80 pontos (Figura 28) onde foi realizada a comparação pontual da altitude do MDT-GNSS com o MDT-VANT e também do MDT-GNSS com o MDT-SRTM.

Figura 28: Grade regular de 80 pontos, construída para as comparações da altitude dos pontos.



Fonte: O autor.

As altitudes geométricas (h) de todos os pontos do levantamento GNSS e do recobrimento com VANT - referidas ao elipsóide WGS-84 - foram convertidas em altitudes ortométricas (H) referidas ao nível médio do mar. Para isso, utilizou-se o Modelo de Ondulação Geoidal MAPGEO2015, do IBGE. Com isso, estima-se que os valores das altitudes ortométricas de todos os pontos do levantamento apresentam uma incerteza absoluta de ± 17 cm.

O MDT SRTM já se encontra com suas altitudes referenciadas ao nível médio dos mares (altitude ortométrica), não sendo necessária qualquer conversão.

Após a análise da comparação pontual foi visto que alguns pontos apresentaram problemas, sendo observada uma grande diferença na altitude; estes pontos foram retirados da análise. O critério utilizado para detectar estes pontos, que estavam contaminando a amostra da análise, foi aceitar as medidas que estavam dentro do intervalo de dois desvios padrões.

Na Tabela 3 pode ser observada a comparação das altitudes ortométricas dos 62 pontos selecionados obtidos do MDT-SRTM e do MDT-GNSS.

Tabela 3: Resultados das diferenças das altitudes entre o MDT-GNSS e o MDT-SRTM dos 62 pontos selecionados.

Ponto	Altitude Ortométrica GNSS (m)	Altitude Ortométrica SRTM (m)	Módulo da Diferença da Altitude Ortométrica (GNSS-SRTM) (m)
5	625.471	629.000	3.53
6	624.782	626.000	1.22
7	623.953	627.000	3.05
8	620.032	624.000	3.97
9	608.519	614.000	5.48
11	596.211	600.000	3.79
12	596.651	598.000	1.35
13	602.351	605.000	2.65
14	611.302	615.000	3.70
15	615.797	621.000	5.20
19	599.826	603.000	3.17
20	595.834	599.000	3.17
21	595.024	596.000	0.98
22	597.240	598.000	0.76
23	600.798	602.000	1.20
24	610.354	611.000	0.65
26	611.067	616.000	4.93
28	614.974	617.000	2.03
29	609.325	611.000	1.67
30	602.822	606.000	3.18
32	601.665	607.000	5.34
33	602.981	607.000	4.02
34	602.707	607.000	4.29
35	601.094	602.000	0.91
36	601.264	605.000	3.74
42	599.010	604.000	4.99
43	596.950	600.000	3.05
44	594.649	596.000	1.35
45	593.085	595.000	1.91
46	592.181	595.000	2.82
48	596.340	602.000	5.66
50	598.650	596.000	2.65
51	596.363	596.000	0.36
52	597.115	598.000	0.88
53	599.912	600.000	0.09
54	601.510	602.000	0.49
55	602.490	605.000	2.51
56	603.699	605.000	1.30
57	603.147	605.000	1.85
58	599.888	605.000	5.11
59	600.084	605.000	4.92
60	601.492	607.000	5.51
61	603.561	606.000	2.44
62	607.570	605.000	2.57
63	608.579	610.000	1.42
64	608.619	609.000	0.38
65	616.754	620.000	3.25
66	616.104	617.000	0.90
67	615.706	612.000	3.71
68	607.184	610.000	2.82
69	603.263	606.000	2.74
70	601.833	605.000	3.17
71	600.489	604.000	3.51
72	603.971	606.000	2.03
73	612.534	611.000	1.53
74	612.037	614.000	1.96
75	611.992	613.000	1.01
76	608.141	607.000	1.14
77	602.654	602.000	0.65
78	603.184	601.000	2.18
79	606.648	603.000	3.65
80	598.286	599.000	0.71

Fonte: O autor.

Desta comparação resultaram as estatísticas descritivas constantes da Tabela 4.

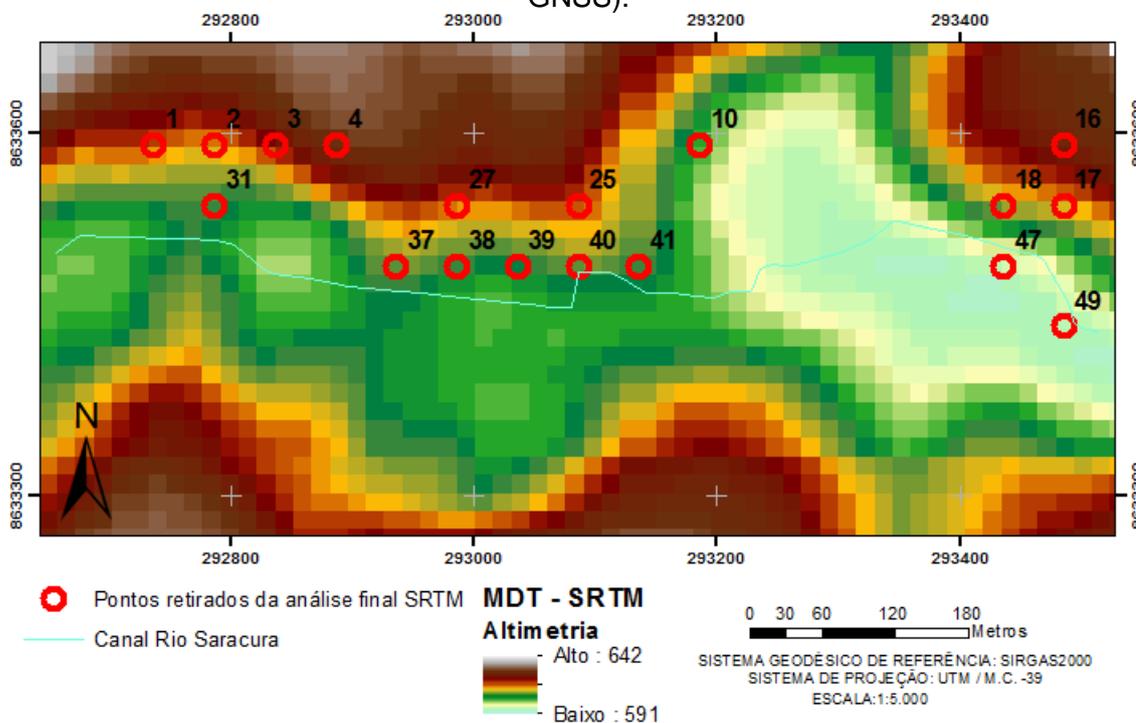
Tabela 4: Resultados - Estatísticas Descritivas das Discrepâncias das Altitudes (GNSS – SRTM).

Estatísticas descritivas das Discrepâncias das Altitudes GNSS - SRTM	
Parâmetros	H
Numero de Pontos	62
Média (m)	2.60
Desvio padrão (m)	1.55
Variância (m ²)	2.39
Discrepância Mínima (m)	0.09
Discrepância Máxima (m)	5.66

Fonte: O autor

Na Figura 29 observa-se a localização dos pontos que foram retirados da análise final devido à discrepância da altitude do MDT-SRTM e do MDT-GNSS ser maior que o dobro do desvio padrão dos 80 pontos da grade estudada. Pode-se perceber que estes pontos em sua maioria estão localizados em áreas de maior declividade.

Figura 29: Localização dos pontos retirados da análise final (MDT-SRTM - MDT-GNSS).



Fonte: O autor

Na Tabela 5 observa-se a comparação das altitudes ortométricas dos 61 pontos selecionados obtidos do MDT-VANT e do MDT- GNSS.

Tabela 5: Resultados das diferenças das altitudes entre o MDT-GNSS e o MDT-VANT dos 61 pontos selecionados.

Ponto	Altitude Ortométrica GNSS (m)	Altitude Ortométrica VANT (m)	Módulo da Diferença da Altitude Ortométrica (GNSS-VANT) (m)
1	606.151	603.339	2.81
2	606.277	610.695	4.42
4	622.184	628.004	5.82
5	625.471	623.221	2.25
6	624.782	624.324	0.46
7	623.953	623.479	0.47
8	620.032	623.832	3.80
9	608.519	603.183	5.34
10	598.389	594.364	4.03
11	596.211	590.909	5.30
12	596.651	589.080	7.57
13	602.351	597.403	4.95
14	611.302	604.125	7.18
17	605.497	598.470	7.03
18	596.964	593.853	3.11
19	599.826	599.082	0.74
20	595.834	591.836	4.00
21	595.024	593.674	1.35
22	597.240	599.561	2.32
23	600.798	602.395	1.60
24	610.354	616.013	5.66
25	610.122	615.090	4.97
27	607.535	611.120	3.59
28	614.974	613.762	1.21
29	609.325	615.589	6.26
30	602.822	609.188	6.37
31	601.890	608.367	6.48
32	601.665	606.686	5.02
36	601.264	607.832	6.57
37	601.292	603.342	2.05
38	600.918	602.985	2.07
39	600.326	598.040	2.29
40	600.091	603.647	3.56
41	599.884	606.311	6.43
44	594.649	599.716	5.07
45	593.085	595.208	2.12
46	592.181	596.550	4.37
47	591.384	594.552	3.17
48	596.340	595.766	0.57
49	591.077	596.504	5.43
52	597.115	604.627	7.51
53	599.912	604.819	4.91
54	601.510	609.091	7.58
56	603.699	610.971	7.27
57	603.147	602.730	0.42
58	599.888	599.664	0.22
60	601.492	602.168	0.68
61	603.561	607.244	3.68
62	607.570	613.886	6.32
64	608.619	615.072	6.45
65	616.754	622.631	5.88
67	615.706	619.618	3.91
68	607.184	607.837	0.65
69	603.263	597.726	5.54
72	603.971	602.817	1.15
73	612.534	618.933	6.40
74	612.037	618.268	6.23
75	611.992	618.787	6.79
76	608.141	611.654	3.51
77	602.654	607.487	4.83
80	598.286	602.037	3.75

Fonte: O autor.

Desta comparação resultaram as estatísticas descritivas constantes da Tabela 6.

Tabela 6: Resultados - Estatísticas Descritivas das Discrepâncias das Altitudes (GNSS – VANT).

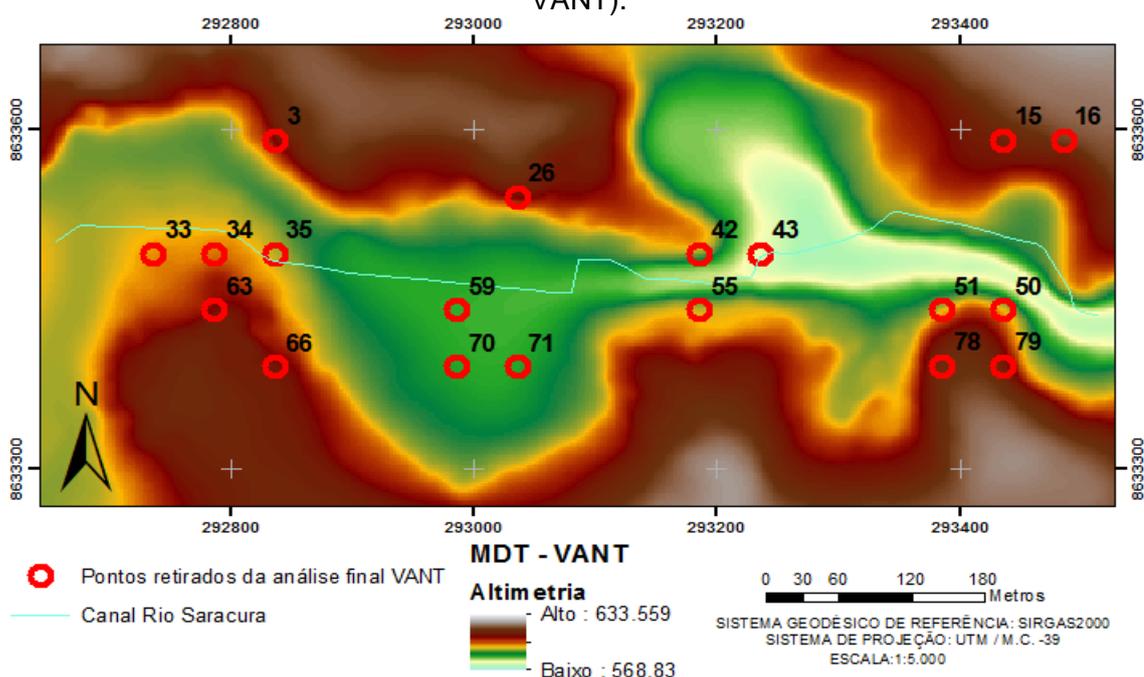
Estatísticas descritivas das Discrepâncias das Altitudes GNSS - VANT	
Parâmetros	H
Numero de Pontos	61
Média (m)	4.12
Desvio padrão (m)	2.23
Variância (m ²)	4.97
Discrepância Mínima (m)	0.22
Discrepância Máxima (m)	7.58

Fonte: O autor.

Na Figura 30 observa-se a localização dos pontos que foram retirados da análise final devido à discrepância da altitude do MDT-VANT e do MDT-GNSS ser maior que o dobro do desvio padrão dos 80 pontos da grade estudada.

Nota-se que estes pontos em sua maioria estão localizados em áreas de maior declividade, já os pontos 43, 59, 70 e 71 podem estar relacionadas com falhas de filtragem do MDS para obtenção do MDT.

Figura 30: Localização dos pontos retirados da análise final (MDT-SRTM - MDT-VANT).



Fonte: O autor.

Os resultados das comparações das altitudes dos pontos do MDT-VANT e do MDT-GNSS divergem do esperado no trabalho. Presumiam-se discrepâncias centimétricas nos valores das altitudes, o que não houve, este fato afetou diretamente os resultados da modelagem hidráulica utilizando este modelo.

5.3 Calibração do coeficiente de Manning

A calibração do modelo foi realizada através do ajuste do parâmetro de rugosidade, com a finalidade de obter uma modelagem mais precisa em relação ao fenômeno estudado.

Esta calibração foi balizada na comparação entre as alturas do nível d'água medidas em campo e as simuladas. Desta maneira, foram realizadas diversas simulações com todos os parâmetros fixos, inclusive o MDT obtido por posicionamento GNSS (referência); variando na modelagem, apenas o coeficiente de Manning (0.035, 0.05, 0.07, 0.1 e 0.12 m-1/3.s). Após o término das simulações, foi comparada a altura do nível d'água dos 10 pontos medidos em campo com as alturas simuladas e feita uma média da diferença entre os pontos em metros (Tabela 7).

Tabela 7: Média e Desvio Padrão da diferença entre as alturas do nível d'água (m) medidas em campo e simuladas com a variação do coeficiente de Manning.

NUMERAÇÃO DO PONTO	Manning 0.035 (m-1/3.s)	Manning 0.050 (m-1/3.s)	Manning 0.07 (m-1/3.s)	Manning 0.10 (m-1/3.s)	Manning 0.12 (m-1/3.s)
2124	1.48m	1.18m	0.88m	0.50m	0.28m
2127	0.80m	0.62m	0.36m	0.01m	0.20m
2110	0.98m	0.83m	0.67m	0.37m	0.18m
4000	0.28m	0.53m	0.85m	1.22m	1.42m
5000=JB7	0.01m	0.10m	0.32m	0.63m	0.81m
5004	0.29m	0.38m	0.60m	0.91m	1.09m
5005	0.52m	0.43m	0.21m	0.01m	0.28m
5015	1.68m	1.68m	1.66m	1.34m	1.15m
5016	0.39m	0.29m	0.06m	0.26m	0.45m
5021=JB5	0.81m	0.80m	0.56m	0.18m	0.02m
Média (m)	0.72m	0.68m	0.62m	0.55m	0.59m
Desvio Padrão (m)	0.54m	0.46m	0.45m	0.47m	0.49m

Fonte: O autor.

Analisando a Tabela 7, pode-se perceber que ao aumentar o coeficiente de Manning, alguns pontos se aproximaram das alturas medidas em campo e outros se afastaram. Consta-se então, que a redução da diferença das alturas não foi constante, por este motivo, utilizou-se a média para encontrar o coeficiente mais apropriado para o estudo de caso. Desta maneira, o coeficiente $n = 0.1$ ($m^{-1/3}.s$) foi escolhido para executar as modelagens por ter uma diferença mais baixa na comparação entre os pontos, com 0.55m em média de diferença.

O levantamento do coeficiente de *Manning* (n) no Rio Saracura-BA, para utilização nas equações de *Saint Venant*, torna-se de grande importância para os cálculos hidrodinâmicos quando da propagação de eventos como a inundação. Com a variação de n , a área afetada no resultado da modelagem é modificada substancialmente, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8: Área da mancha de inundação com a variação do coeficiente de *Manning* e a vazão máxima.

Coeficiente de Manning (n) / Vazão Máxima (Qmax)	Manning 0.035 (m-1/3.s)	Manning 0.050 (m-1/3.s)	Manning 0.07 (m-1/3.s)	Manning 0.10 (m-1/3.s)	Manning 0.12 (m-1/3.s)
86,89 (m ³ /s)	56984.29m ²	60720.94m ²	64788.95m ²	69196.84m ²	72230.38m ²
125,75 (m ³ /s)	62675.09m ²	66112.56m ²	70465.01m ²	75689.93m ²	78799.85m ²
160,81 (m ³ /s)	66328.91m ²	69938.18m ²	74810.27m ²	80107.74m ²	83304.80m ²
183,61 (m ³ /s)	68573.72m ²	72305.02m ²	77267.70m ²	82516.46m ²	85956.07m ²

Fonte: O autor.

Inclui-se também na análise a variação da vazão máxima para observar mais especificamente como o coeficiente de rugosidade influencia diferentes vazões (Tabela 8). Observou-se então que a variação em área assemelha-se a uma progressão aritmética, alternando em média 4.000m² com a modificação do coeficiente de Manning. Para uma vazão de 183,61 (m³/s), a maior diferença em área chega a 17.382.35 m², esta seria obtida comparando o resultado do coeficiente de $n = 0.035$ ($m^{-1/3}.s$) e $n = 0.120$ ($m^{-1/3}.s$).

5.4 Modelagem Hidráulica.

No decorrer do trabalho foram realizadas e analisadas doze modelagens hidráulicas com o intuito de entender como se comportará o fluxo da água para

as determinadas vazões. Desta maneira, para servir como exemplo, mostra-se a análise da modelagem hidráulica utilizando o Modelo Digital do Terreno (MDT) obtido através de Levantamento Geodésico (GNSS) com Vazão Máxima para o Tempo de Recorrência de 100 anos.

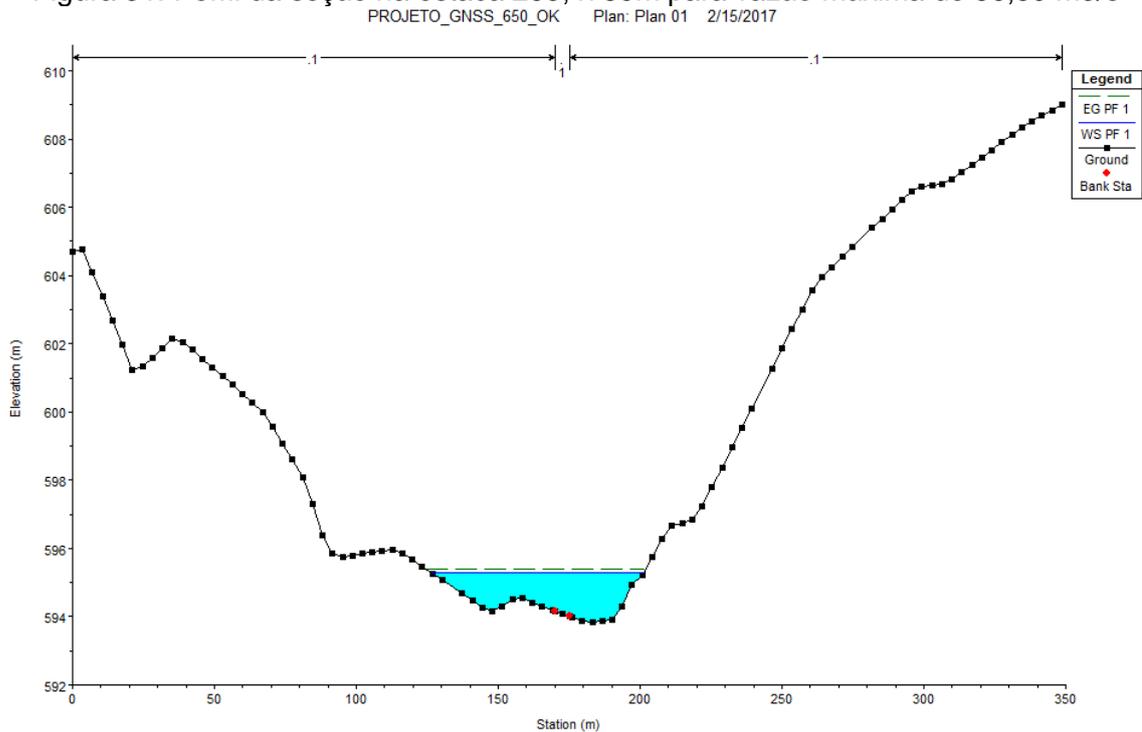
Os gráficos, Figura 31 e 32, mostram o perfil da seção transversal em cada trecho, percebe-se então até onde o nível da água pode chegar para esta vazão máxima associada ao tempo de recorrência de 100 anos.

Para melhor entendimento, foi adotado o nível da água na cor azul; a energia presente na água na cor verde; e a identificação de nível crítico ou subcrítico na cor vermelha, se a linha d'água (azul) estiver abaixo desta linha vermelha pontilhada quer dizer que o escoamento é supercrítico e se a linha estiver acima quer dizer que é um escoamento subcrítico. No perfil da seção da estaca 957,4235⁴m (Figura 32) pode-se perceber que o escoamento é subcrítico.

Os dois pontos pretos ao extremo do gráfico significam a definição do limite de inundação mais provável traçado ao construir a geometria. Os pontos vermelhos significam o canal do trecho urbano delimitado na geometria, como pode ser observado na Figura 32, existem trechos do canal que não estão localizados no ponto mais baixo do sistema, conforme indicado no estudo da CONDER (2014).

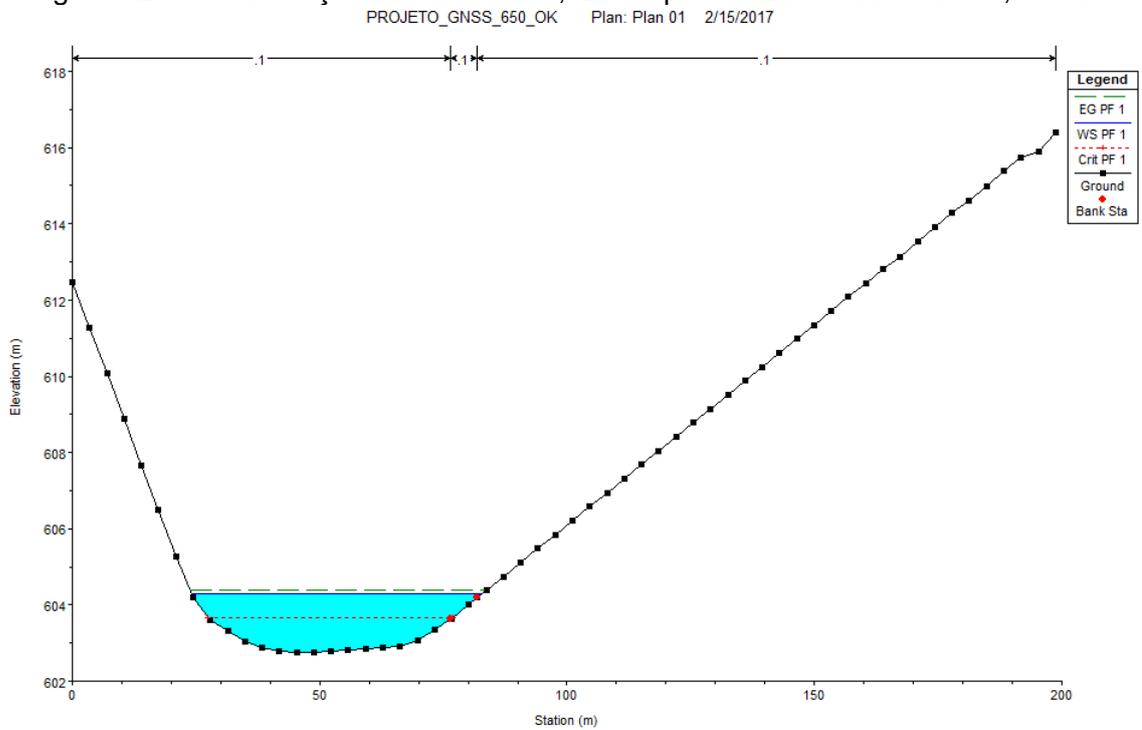
⁴ Esta informação representa a distância longitudinal em metros a partir do início da poligonal definida para o curso d'água na modelagem.

Figura 31: Perfil da seção na estaca 263,4785m para vazão máxima de 86,89 m³/s



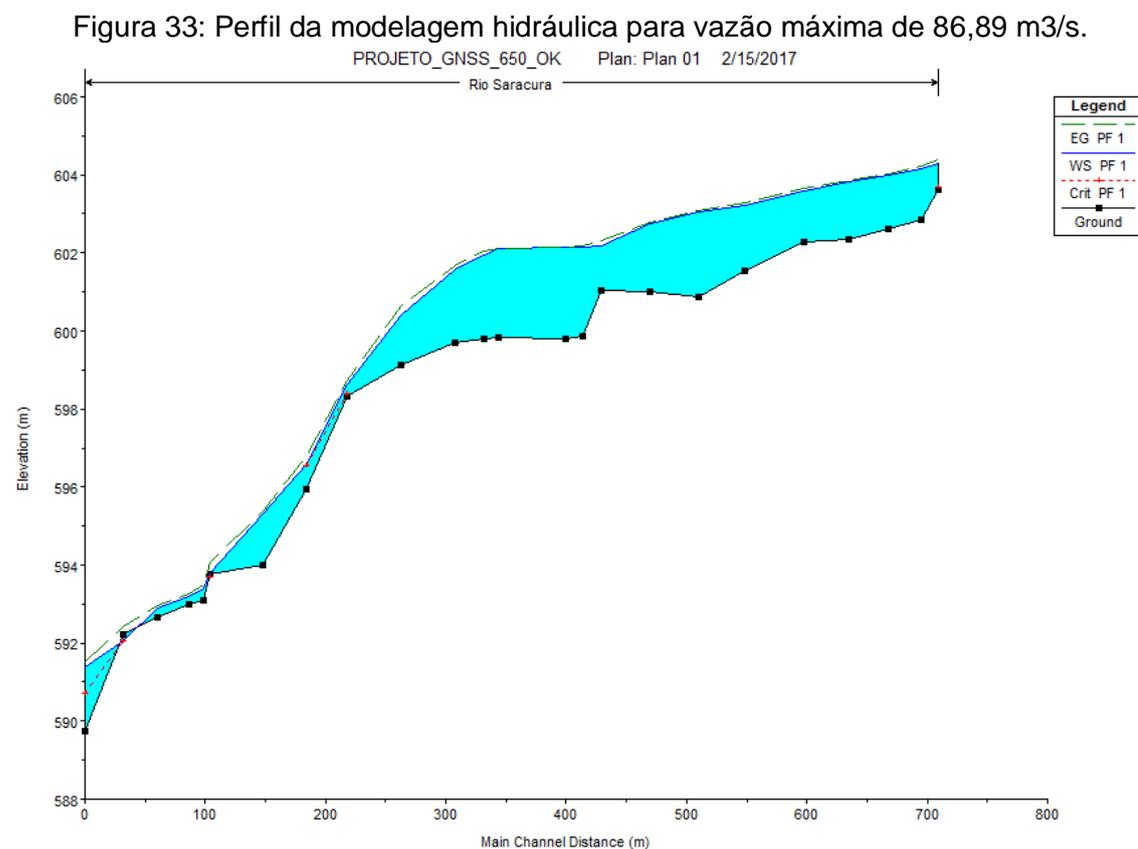
Fonte: O autor.

Figura 32: Perfil da seção na estaca 957,4235m para vazão máxima de 86,89 m³/s.



Fonte: O autor.

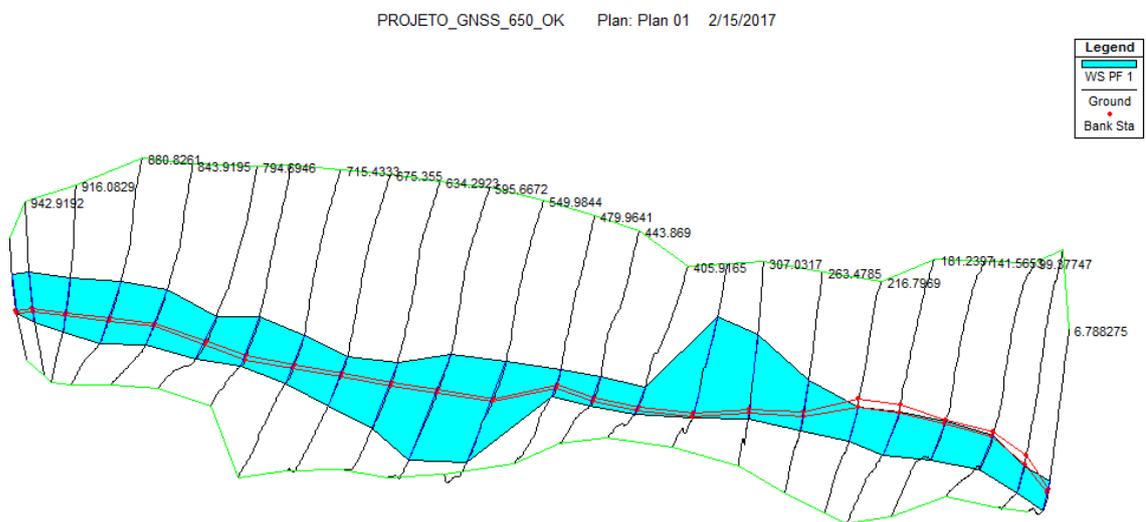
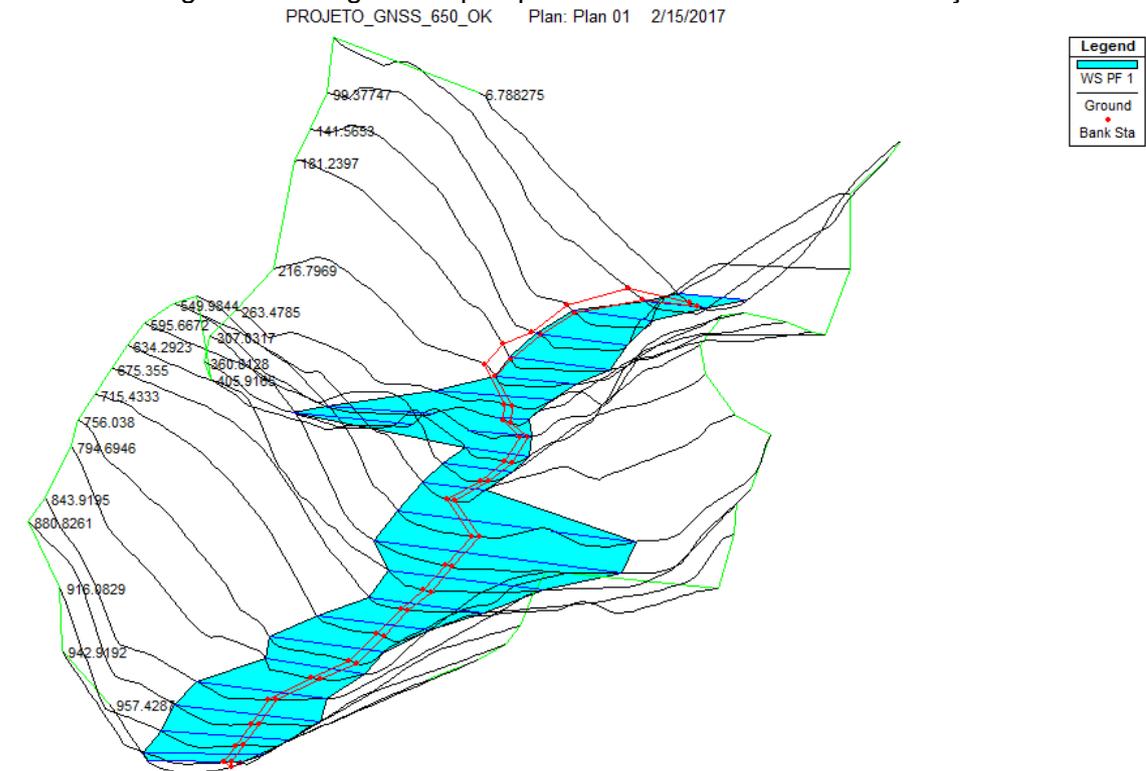
O gráfico (Figura 33) mostra o perfil da modelagem hidráulica (Elevação pela Distância), mostrando todas as 24 seções transversais traçadas (ponto preto). A escala vertical (elevação) neste gráfico é 1/200 e a escala horizontal é 1/75, desta maneira, o exagero vertical é de aproximadamente 2.7. Aproximadamente entre a distância de 300m e a de 400m a velocidade da água aumenta já que a declividade é maior, ou seja, nesta região a enxurrada foi intensa havendo mais destruição por causa da força da água, em contrapartida não houve muito acúmulo de água. O inverso pode ser observado entre a distância 450m a 650m onde o acúmulo de água foi maior, mas, a velocidade da água foi menor, devido à declividade menos acentuada.



Fonte: O autor.

Na Figura 34 podemos ver o resultado da modelagem em 3D visto de perspectivas diferentes. Estas figuras são geradas no próprio HEC-RAS ao final da modelagem hidráulica e mostram as seções traçadas e a delimitação da inundação no relevo.

Figura 34: Imagem em perspectiva 3D da mancha de inundação.



Fonte: O autor.

Apesar do canal, representado na Figura 35 pelas linhas vermelhas, não ter sido apresentado com detalhamento de projeto, é possível observar que o

mesmo não comporta a vazão de cheia do tempo de recorrência estudado, mostrando-se insuficiente para confinar o escoamento em sua calha.

No quadro 1 podem-se perceber as informações para cada seção transversal traçada, como a sua posição e elevação. Observe-se ainda no mesmo quadro a variação da inclinação do terreno em metros ao longo das seções (coluna E.G Elev) e a variação da velocidade da água em cada trecho em metros/segundo (coluna Vel Chnl).

Quadro 1: Informações resultantes da modelagem hidráulica.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Saracura	957.4287	PF 1	86.89	603.62	604.29	603.67	604.38	0.013203	0.61	66.87	58.66	0.31
Saracura	942.9192	PF 1	86.89	602.86	604.17		604.22	0.007664	1.03	89.19	76.08	0.29
Saracura	916.0829	PF 1	86.89	602.62	603.98		604.02	0.005400	0.87	100.75	80.77	0.24
Saracura	880.8261	PF 1	86.89	602.33	603.83		603.86	0.003572	0.75	119.76	94.25	0.20
Saracura	843.9195	PF 1	86.89	602.29	603.60		603.65	0.007975	1.04	89.37	85.35	0.30
Saracura	794.6946	PF 1	86.89	601.54	603.22		603.27	0.006443	1.13	88.17	66.23	0.28
Saracura	756.038	PF 1	86.89	600.86	603.06		603.09	0.002965	0.89	117.96	75.06	0.20
Saracura	715.4333	PF 1	86.89	600.99	602.75		602.79	0.004915	0.96	100.63	73.77	0.24
Saracura	675.355	PF 1	86.89	601.05	602.17		602.32	0.041421	2.15	52.76	75.09	0.66
Saracura	634.2923	PF 1	86.89	599.86	602.15		602.18	0.002627	0.88	136.93	101.47	0.19
Saracura	595.6672	PF 1	86.89	599.81	602.14		602.15	0.000883	0.51	229.79	161.68	0.11
Saracura	549.9844	PF 1	86.89	599.83	602.10		602.11	0.001105	0.57	199.53	144.55	0.12
Saracura	479.9641	PF 1	86.89	599.80	601.96		602.06	0.010792	1.71	62.66	41.08	0.38
Saracura	443.869	PF 1	86.89	599.71	601.59		601.69	0.012379	1.64	62.19	45.02	0.39
Saracura	405.9165	PF 1	86.89	599.12	600.39		600.63	0.045975	2.49	40.59	41.21	0.71
Saracura	360.8128	PF 1	86.89	598.31	598.64	598.38	598.72	0.028656	0.74	70.01	117.38	0.44
Saracura	307.0317	PF 1	86.89	595.93	596.58	596.56	596.79	0.092905	1.84	44.15	89.24	0.86
Saracura	263.4785	PF 1	86.89	594.00	595.30		595.38	0.017553	1.51	68.42	74.86	0.44
Saracura	216.7969	PF 1	86.89	593.75	593.78	593.71	594.07	0.088013	0.18	36.85	51.91	0.46
Saracura	181.2397	PF 1	86.89	593.11	593.39		593.51	0.028491	0.43	56.54	65.39	0.37
Saracura	141.5653	PF 1	86.89	592.99	593.18		593.28	0.015278	0.26	64.63	59.30	0.27
Saracura	99.37747	PF 1	86.89	592.67	592.88		592.97	0.012467	0.25	65.47	51.13	0.24
Saracura	50.12491	PF 1	86.89	592.22	592.05	592.05	592.44	0.108359		31.27	40.18	0.00
Saracura	6.788275	PF 1	86.89	589.75	591.39	590.70	591.51	0.014002	1.51	59.01	44.10	0.40

Fonte: O autor.

Priorizar-se-á agora a comparação das manchas de inundação geradas, um dos objetivos do trabalho, no intuito de compreender como se comporta a modelagem hidráulica para cada modelo do terreno.

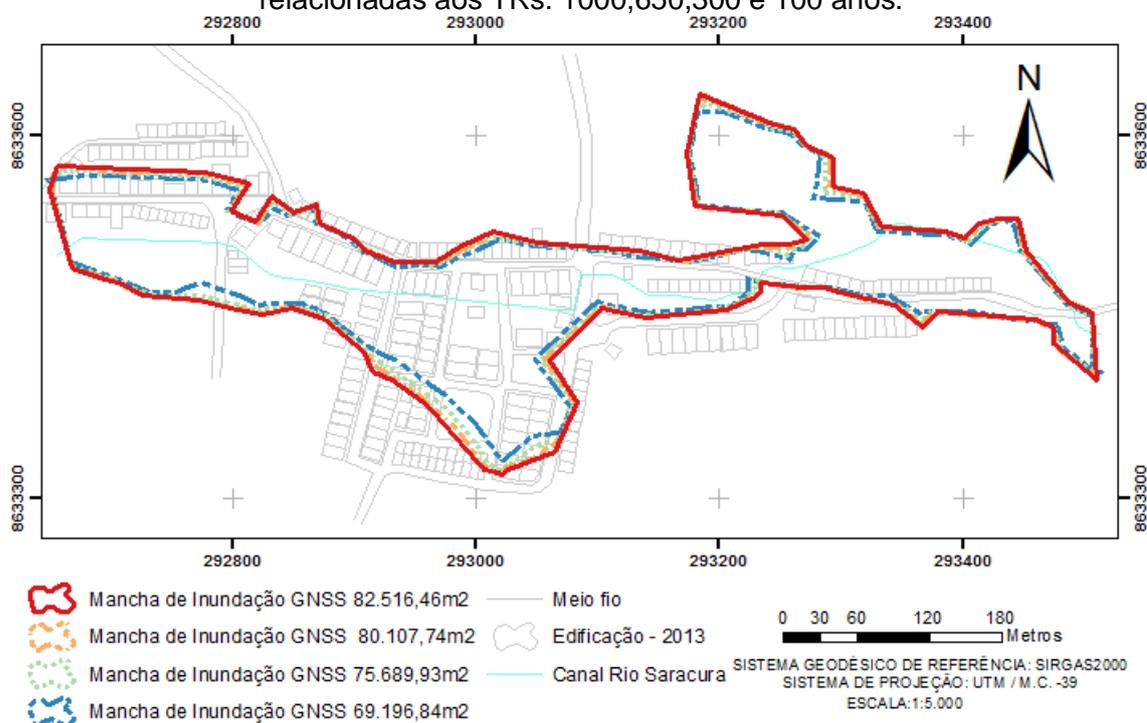
5.5 Comparação entre as manchas de inundação para as vazões máximas dos Tempos de Recorrência.

Antes de comparar as manchas de inundação, produzidas por MDTs diferentes, entre si, é de fundamental importância realizar a análise das regiões

de inundação utilizando o mesmo modelo de terreno, variando apenas as vazões máximas.

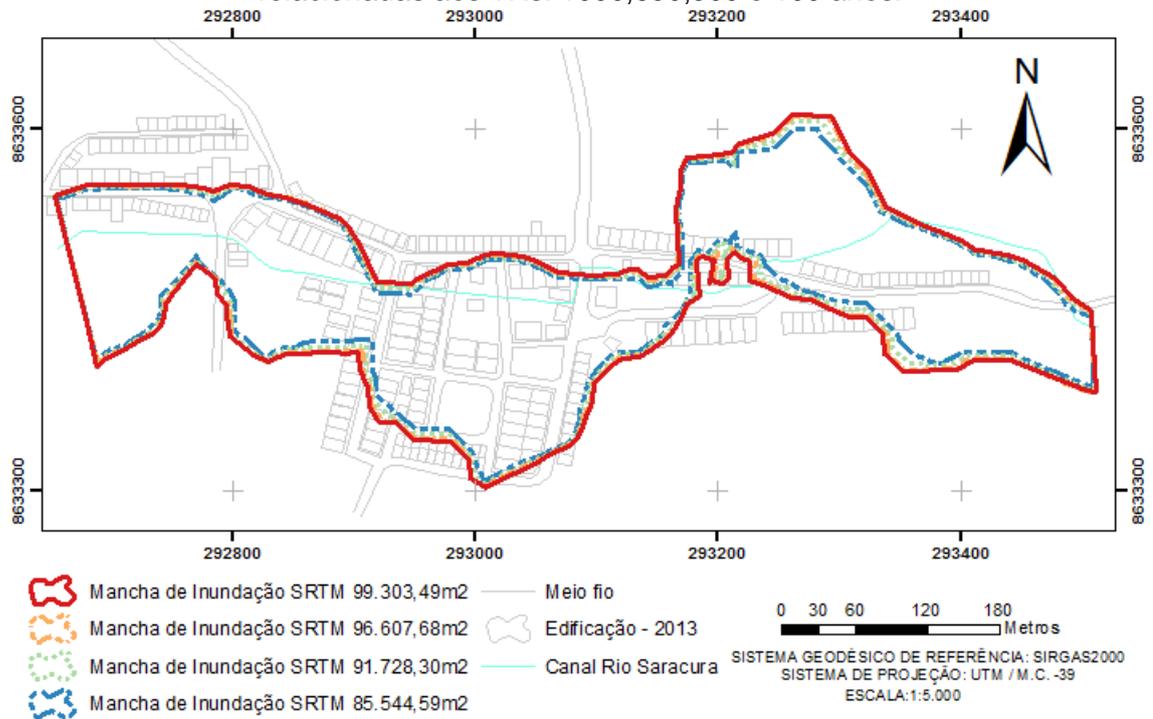
Nas Figuras 35,36 e 37 podem-se perceber as diversas poligonais produzidas para diferentes modelos e vazões máximas. Com o intuito de ter a noção de como estes eventos podem afetar a população urbana, realizou-se a vetorização das imagens de satélites das feições de edificações presentes em Lajedinho antes do evento ocorrido em 2013.

Figura 35: Poligonais geradas utilizando o MDT-GNSS para as vazões máximas relacionadas aos TRs: 1000,650,300 e 100 anos.



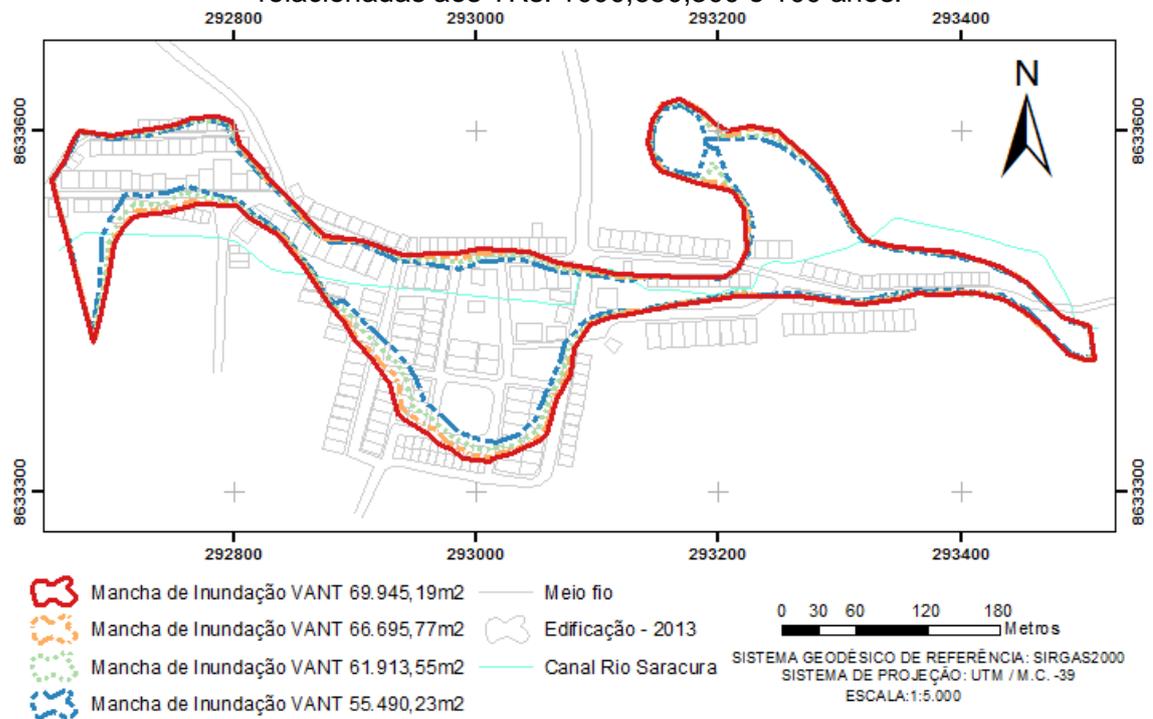
Fonte: O autor.

Figura 36: Poligonais geradas utilizando o MDT-SRTM para as vazões máximas relacionadas aos TRs: 1000,650,300 e 100 anos.



Fonte: O autor.

Figura 37: Poligonais geradas utilizando o MDT-VANT para as vazões máximas relacionadas aos TRs: 1000,650,300 e 100 anos.



Fonte: O autor.

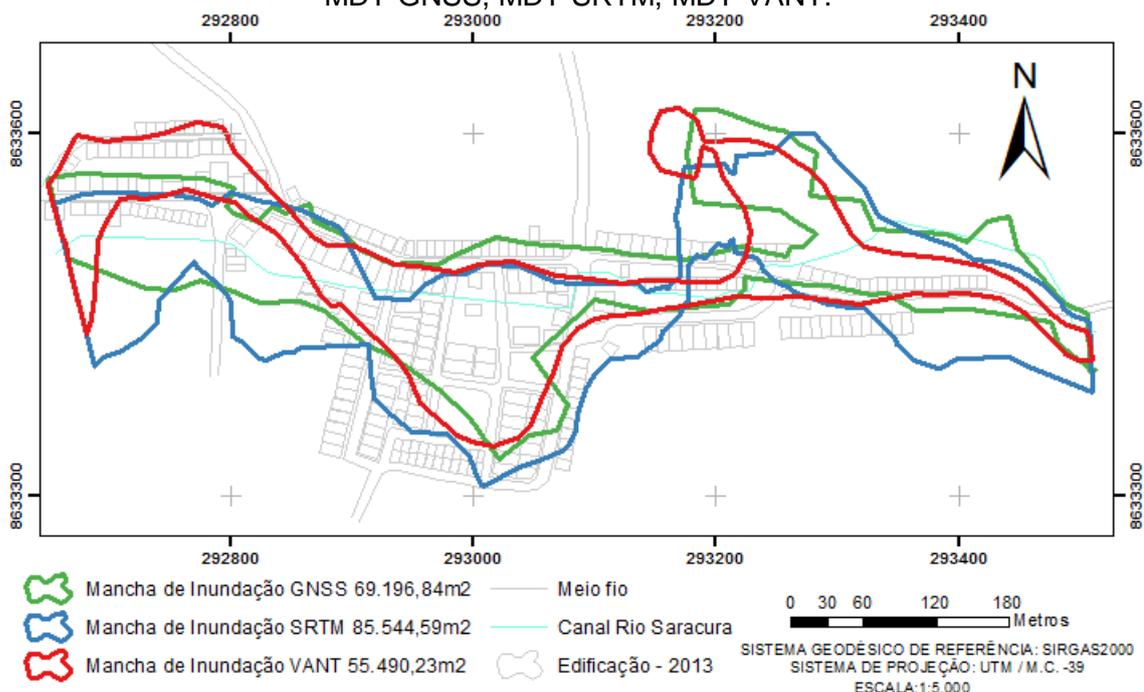
Como já era esperado, pode-se constatar que com o aumento da vazão máxima da modelagem a região de inundação aumenta. Percebe-se que, de maneira geral, a forma da poligonal se mantém, o aumento da vazão máxima faz com que as regiões mais rasas ao redor da poligonal sejam ocupadas.

5.6 Comparações entre as manchas de inundação produzidas pelos três MDTs estudados e as vazões máximas dos Tempos de Recorrência.

Visando uma comparação mais apropriada das manchas de inundação geradas pelo MDTs obtidos por diferentes métodos, foram construídos mapas para observar as variações para os diferentes valores de vazão.

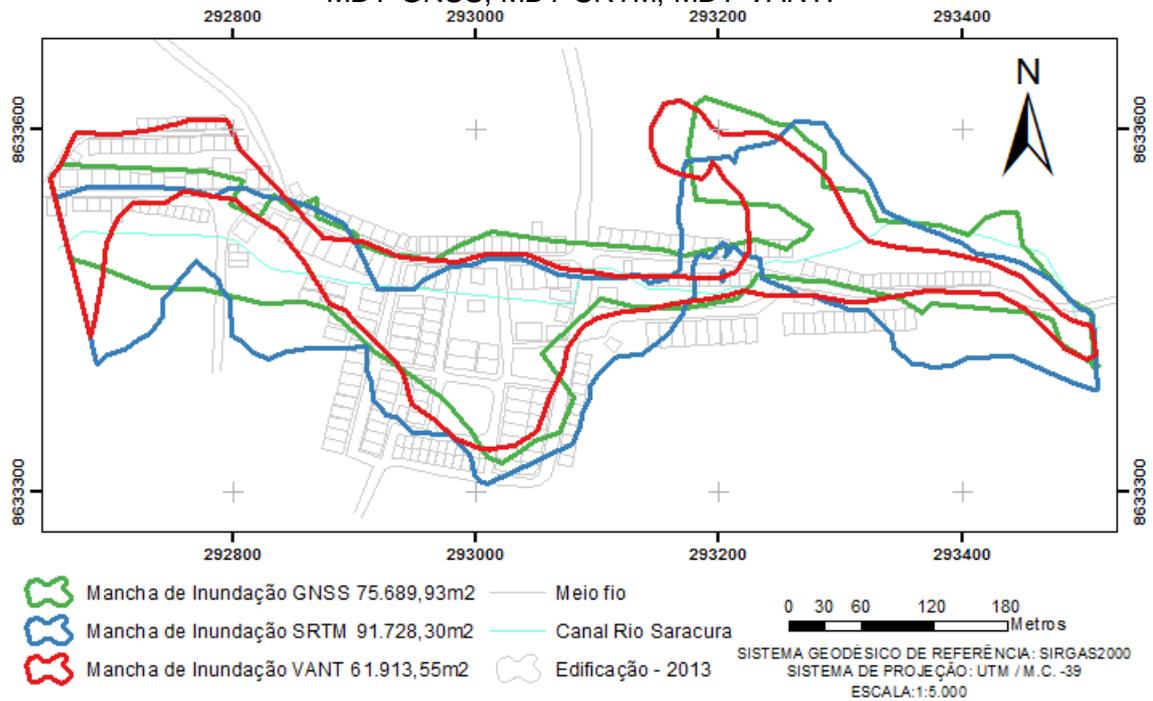
A seguir, observam-se nas Figuras 38, 39, 40 e 41, os mapas da modelagem hidráulica do Rio Saracura para manchas de inundação produzidas através das vazões máximas associadas aos tempos de recorrência de 100, 300, 650 e 1000 anos, considerando o MDT obtido por posicionamento GNSS, por imagens SRTM e imageamento com VANT no município de Lajedinho.

Figura 38: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 100 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.



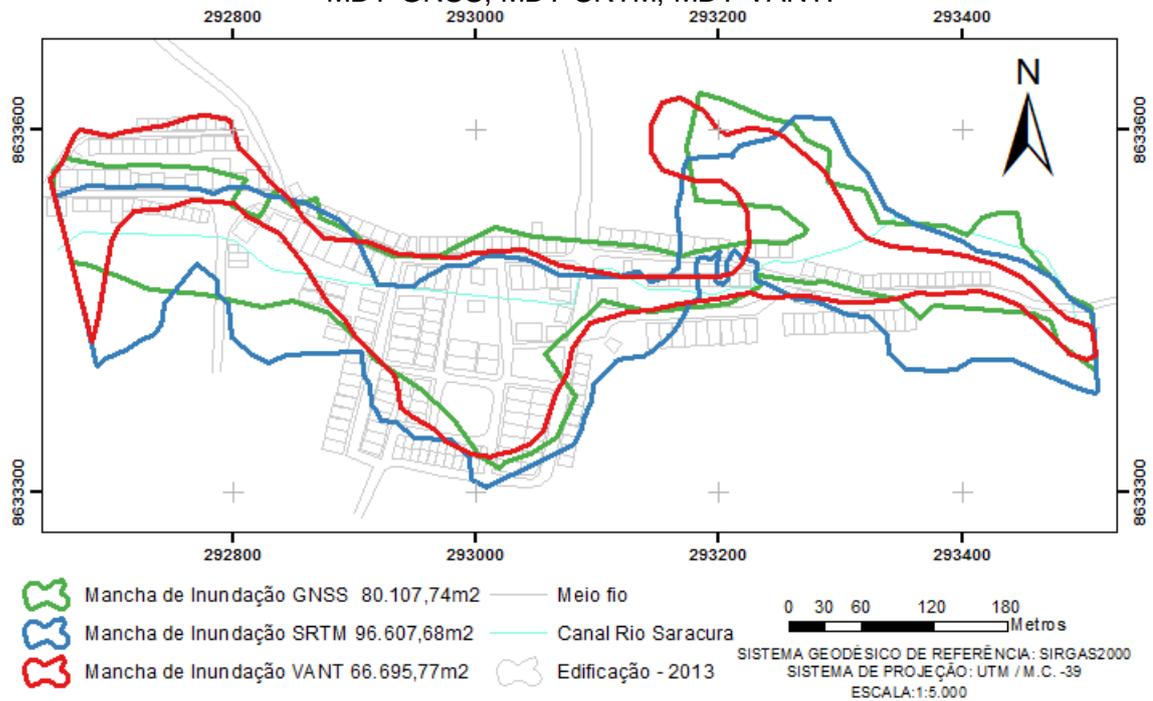
Fonte: O autor.

Figura 39: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 300 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.



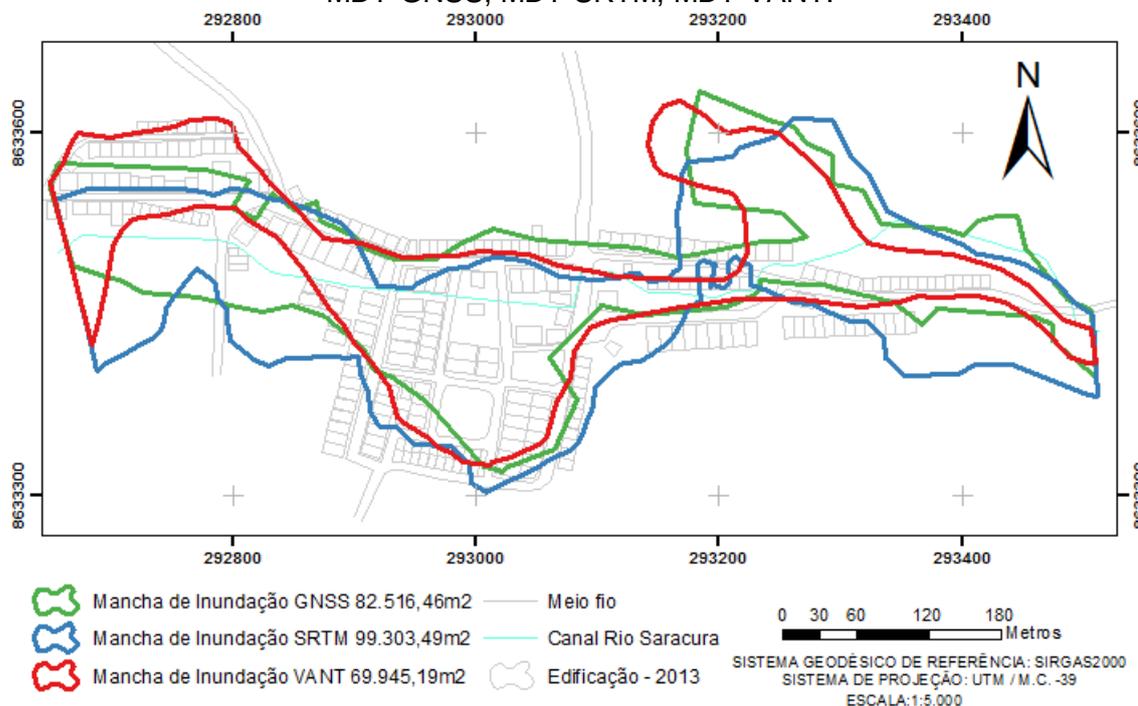
Fonte: O autor.

Figura 40: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 650 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.



Fonte: O autor.

Figura 41: Manchas de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 1000 anos) utilizando o MDT-GNSS, MDT-SRTM, MDT-VANT.



Fonte: O autor.

A análise dos resultados encontrados mostra que o canal existente no rio Saracura não comportou a vazão de cheia dos tempos de recorrência estudados, mostrando-se insuficiente para confinar o escoamento em sua calha.

Outro fator interessante comprovado nos resultados é que existem trechos do canal que não estão localizados nos pontos de altitudes mais baixas, o que foi indicado no estudo de CONDER, (2014). Desta maneira, para todas as modelagens, observa-se que existem locais em que a mancha de inundação gerada não atinge o canal existente. Este fato só foi possível devido à modelagem no HEC-RAS considerar o modelo de terreno inserido nele, assim como, as características das seções transversais para determinar as manchas. Na modelagem foi também introduzido o canal existente, mas, mesmo assim, no HEC-RAS, a área de inundação foi produzida nas áreas mais baixas do rio, onde o canal “deveria” ser construído.

Observando os mapas (Figuras 38,39, 40 e 41) e o perfil da modelagem hidráulica (Figura 33), constata-se que nos lugares onde a mancha de

inundação foi mais estreita (atinge uma menor área) a declividade é mais acentuada, resultando em uma maior velocidade da água, ou seja, nesses lugares, apesar das áreas de inundação terem sido menores, a “força” da água foi maior, resultando em uma enxurrada que pôde levar até carros e casas no decorrer do trajeto.

Na Tabela 9, observa-se a comparação em área, das diversas poligonais referentes ao método de aquisição do MDT utilizado na modelagem e as vazões máximas.

Tabela 9: Área das manchas de inundação de acordo com o MDT e Vazões máximas utilizados na modelagem.

Tempo de Recorrência (TR)(anos) - Vazão Máxima (Qmax)	Método de aquisição do MDT utilizado na modelagem		
	Poligonal MDT(GNSS) (m ²)	Poligonal MDT(SRTM) (m ²)	Poligonal MDT(VANT) (m ²)
TR 100 - 86,89 (m³/s)	69196.85m ²	85544.59m ²	55490.23m ²
TR 300 - 125,75 (m³/s)	75689.93m ²	91728.30m ²	61913.55m ²
TR 650 - 160,81 (m³/s)	80107.74m ²	96607.69m ²	66695.77m ²
TR 1000 - 183,61 (m³/s)	82516.46m ²	99303.49m ²	69945.19m ²

Fonte: O autor.

Analisando a Tabela 9, verifica-se que as áreas das poligonais ao utilizar o MDT-SRTM são maiores que utilizando o MDT-GNSS, inversamente, as áreas das manchas utilizando o MDT-VANT são menores que utilizando o MDT-GNSS.

A Tabela 10 mostra a diferença na área encontrada em metros quadrados (m²) utilizando o MDT-SRTM e o MDT-GNSS na modelagem hidráulica, observa-se que o percentual de diferença varia entre 16,90% a 19,11% em área. Esta diferença justifica-se já que a precisão altimétrica do equipamento no posicionamento GNSS é de +/- 4 mm e a discrepância média das coordenadas altimétricas do MDT-GNSS e MDT-SRTM é de 2.60m.

Tabela 10: Discrepância da área da Mancha de Inundação utilizando MDT-SRTM e MDT-GNSS, relacionada à vazão máxima do Tempo de Recorrência.

Tempo de Recorrência (TR)(anos) - Vazão Máxima (Qmax)	Método de aquisição do MDT utilizado na modelagem			
	Poligonal MDT(GNSS) (m ²)	Poligonal MDT(SRTM) (m ²)	Diferença GNSS - SRTM (m ²)	Percentual (%) Diferença: GNSS - SRTM
TR 100 - 86,89 (m ³ /s)	69196.85m ²	85544.59m ²	16347.75m ²	19.11%
TR 300 - 125,75 (m ³ /s)	75689.93m ²	91728.30m ²	16038.37m ²	17.48%
TR 650 - 160,81 (m ³ /s)	80107.74m ²	96607.69m ²	16499.94m ²	17.08%
TR 1000 - 183,61 (m ³ /s)	82516.46m ²	99303.49m ²	16787.03m ²	16.90%

Fonte: O autor.

Ao analisar a Tabela 11, verifica-se a diferença na área encontrada em metros quadrados (m²) utilizando o MDT-VANT e o MDT-GNSS na modelagem hidráulica, observa-se que o percentual de diferença varia entre 17,97% a 24,70% em área. Esta diferença justifica-se já que a discrepância média das coordenadas altimétricas do MDT-GNSS e MDT-VANT é de 4.12m

Tabela 11: Discrepância da área da Mancha de Inundação utilizando MDT-VANT e MDT-GNSS, relacionada à vazão máxima do Tempo de Recorrência.

Tempo de Recorrência (TR)(anos) - Vazão Máxima (Qmax)	Método de aquisição do MDT utilizado na modelagem			
	Poligonal MDT(GNSS) (m ²)	Poligonal MDT(VANT) (m ²)	Diferença GNSS - VANT (m ²)	Percentual (%) Diferença: GNSS - VANT
TR 100 - 86,89 (m ³ /s)	69196.85m ²	55490.23m ²	13706.61m ²	24.70%
TR 300 - 125,75 (m ³ /s)	75689.93m ²	61913.56m ²	13776.37m ²	22.25%
TR 650 - 160,81 (m ³ /s)	80107.74m ²	66695.77m ²	13411.97m ²	20.11%
TR 1000 - 183,61 (m ³ /s)	82516.46m ²	69945.19m ²	12571.27m ²	17.97%

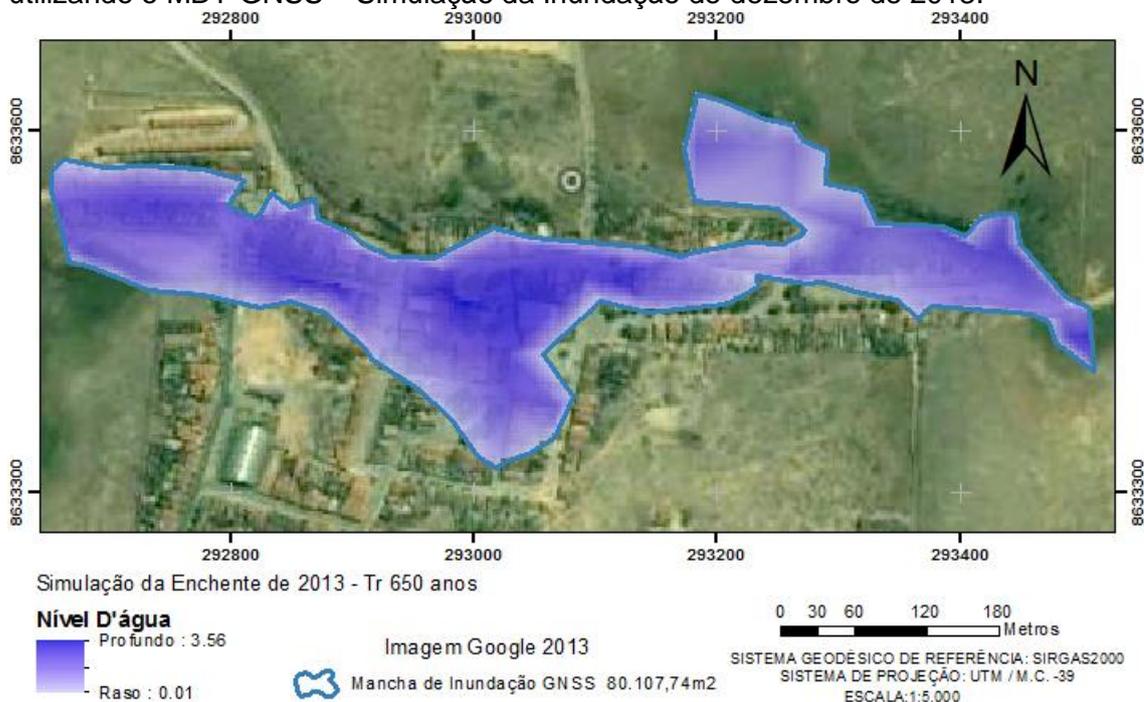
Fonte: O autor.

Observa-se então que para modelagem hidráulica os modelos de terreno que foram utilizados nos procedimentos afetam diretamente o resultado na geração da mancha de inundação.

5.7 Comparação e análises da simulação da mancha de inundação de dezembro de 2013 com dados de relatórios da época.

A figura 42 mostra a mancha de inundação obtida através do MDT-GNSS (mais preciso) utilizando a vazão máxima do tempo de recorrência de 650 anos que equivale à inundação ocorrida em dezembro de 2013 em Lajedinho segundo informações de CONDER, (2014).

Figura 42: Mancha de Inundação e nível d'água para a vazão máxima (Tr 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de dezembro de 2013.



Fonte: O autor.

Analisando as edificações inseridas no mapa, observa-se que o impacto da inundação simulada no espaço urbano é enorme, podendo atingir aproximadamente 200 edificações construídas. As áreas de risco são enormes nestes cenários em Lajedinho, o mapa mostra (Figura 42) que o nível da d'água pode atingir mais de 3,56 metros de profundidade em determinados locais, ou seja, edificações que ficam localizadas em altitudes mais baixas podem ser tomadas por completo pela água, o que, segundo registro da época, ocorreu na inundação de dezembro de 2013.

A equipe da UFBA que realizou o levantamento planialtimétrico (GNSS) em Lajedinho coletou dez pontos com o objetivo de determinar a altura máxima

de inundação e gerar a poligonal de inundação, conforme dados apresentados na Tabela 12.

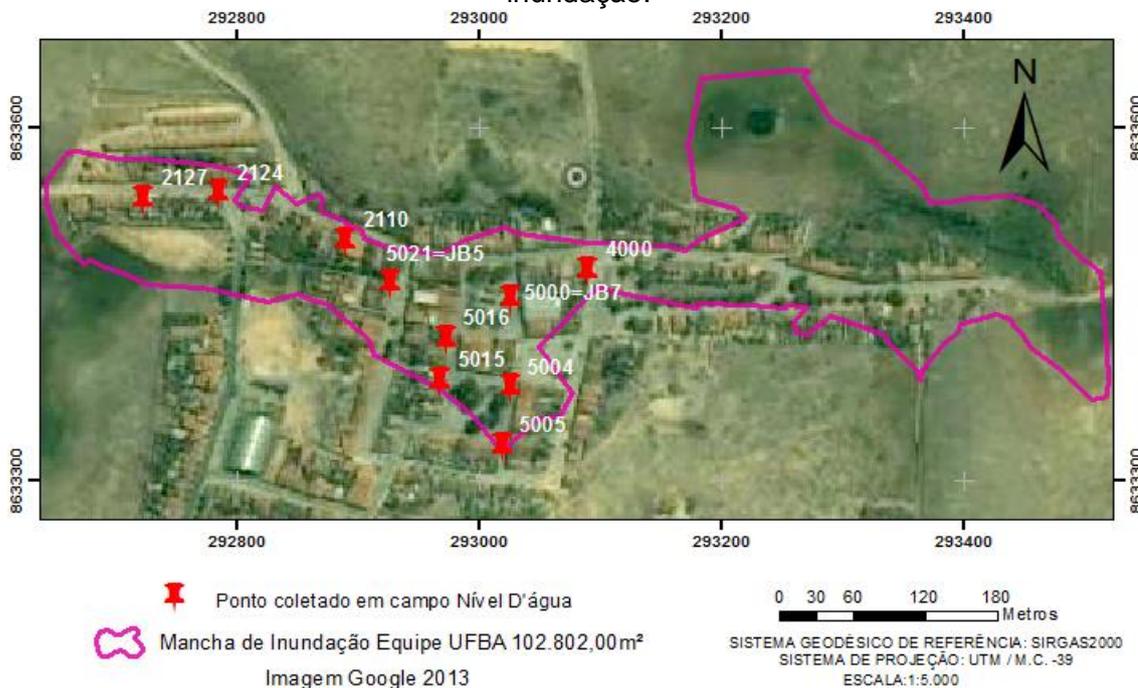
Tabela 12: Pontos onde a equipe da UFBA coletaram as cotas de inundação.

Ponto	E (m)	N (m)	Altitude (m)	Medida Trena (m)	Altitude da Inundação (m)
2124	292786.502	8633542.750	601.798	2.79	604.588
2127	292724.069	8633537.913	601.605	2.87	604.475
2110	292890.234	8633502.504	601.328	2.38	603.708
4000	293090.653	8633476.996	599.950	1.52	601.470
5000=JB7	293026.523	8633453.075	599.623	2.58	602.203
5004	293026.138	8633376.859	600.600	1.35	601.950
5005	293019.672	8633327.616	602.165	0.60	602.765
5015	292969.125	8633382.896	602.437	1.68	604.117
5016	292973.808	8633419.146	600.855	1.70	602.555
5021=JB5	292926.989	8633465.872	601.116	2.00	603.116
Média (m)					603.095

Fonte: Modificado UFBA, 2013.

Segundo o relatório da missão (UFBA, 2013) esses pontos foram escolhidos em locais onde se observou marcas evidentes deixadas pela lama, vestígios da inundação. A distribuição espacial destes pontos e a mancha de inundação gerada por eles podem ser observadas na Figura 43.

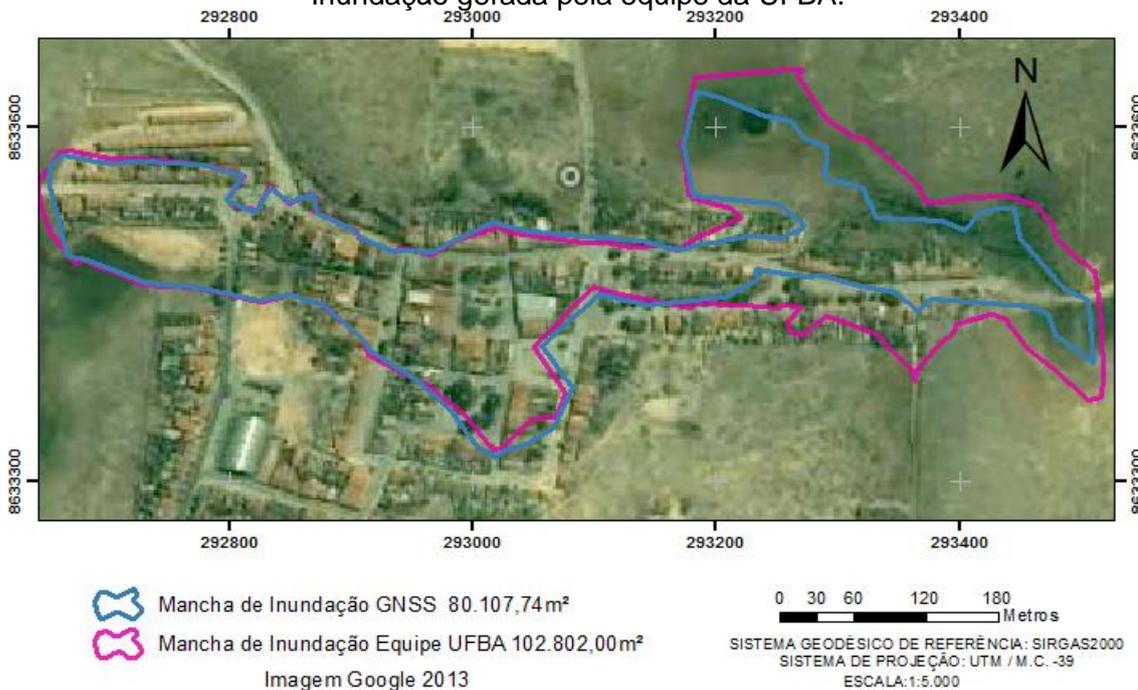
Figura 43: Espacialização dos pontos onde a equipe da UFBA coletou as cotas de inundação.



Fonte: O autor.

A Figura 44 compara os resultados das manchas de inundação obtidas através de duas metodologias distintas.

Figura 44: Mancha de Inundação para a Vazão Máxima (Tr: 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de Dezembro de 2013 com a Mancha de Inundação gerada pela equipe da UFBA.



Fonte: O autor.

A poligonal em cor azul representa a mancha de inundação gerada a partir da modelagem hidráulica, que utilizou o MDT gerado com base nos dados de levantamento planialtimétrico GNSS. A poligonal de cor rosa representa a mancha de inundação gerada pela Equipe da UFBA (2013), a partir da média (603,095m) dos dez pontos coletados em locais onde se observou marcas evidentes deixadas pela lama, vestígios da inundação. A Tabela 13 representa os dados de área das poligonais das manchas de inundação comparadas para esta simulação.

Tabela 13: Comparação da área da Mancha de Inundação para a Vazão Máxima (Tr 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de Dezembro de 2013 com a Mancha de Inundação gerada pela equipe da UFBA.

Tempo de Recorrência (TR)(anos) - Vazão Máxima (Qmax)	Parâmetro	Método de aquisição do MDT utilizado na modelagem			
		Poligonal GNSS	Poligonal Equipe UFBA Interpolação	Diferença Interpolação - GNSS	PERCENTUAL (%) Diferença Interpolação - GNSS
TR 650 - 160,81 (m ³ /s)	Área	80107.74m ²	102802.00m ²	22694.25m ²	22.08%
	Perímetro	2541.20m	2617.04m	75.84m	2.90%

Fonte: O autor.

Analisando a Tabela 13 e considerando que a área mais adequada seria a gerada pela modelagem hidráulica com base no levantamento planimétrico através de posicionamento GNSS, esta área quando comparada com a área da poligonal gerada pela equipe da UFBA através da interpolação dos pontos coletados em campo, apresenta diferença em área de valores que chegam ao percentual de 22,08% e em perímetro de 2.90%.

Alguns motivos que justificam essa discrepância de valores são: o levantamento realizado pela UFBA utilizou uma quantidade insuficiente de pontos coletados para determinação da poligonal; a distribuição dos pontos coletados foi inadequada, pois observou-se que a maioria dos pontos foram coletados em locais semelhantes (ao leste, a montante); a mancha foi definida a partir de um plano semelhante ao horizontal, não considerando as particularidades do relevo; e a extensão do rio considerada para gerar a mancha de inundação foi diferente para os dois modelos. Como a modelagem através do programa HEC-RAS considera parâmetros hidráulicos, associados ao perfil do terreno, é possível obter uma simulação mais próxima da realidade. Um motivo que pode afetar também nos resultados, seria que, na modelagem

no HECRAS foi considerado o fluxo unidirecional, não detectando possíveis diferenças na altura do nível de água transversalmente.

Os procedimentos para realizar uma modelagem hidráulica com o intuito de prever áreas inadequadas para o uso e ocupação do solo são importantíssimos para minizar o impacto na sociedade e tornar o mais próximo do real. Analisando ainda a discrepância em área (Tabela 13) encontrada pelas duas poligonais (22.694,25m²), considerando um campo de futebol oficial com área de 6.400m² (110m X 64m), conclui-se que ao utilizar a poligonal realizada pela equipe da UFBA para planejar a ocupação do solo de Lajedinho, estaria-se tornando em áreas de risco de inundação (sendo impossibilitada a ocupação da população) uma região aproximada de 3,5 campos de futebol oficial, caso já existissem residências na área, teriam que ser removidas gerando um impacto ainda maior.

A situação pode ser ainda pior e envolver a vida das pessoas se considerarmos esta área de 22.694,25m² um erro de omissão, ou seja, esta área não foi prevista na simulação realizada, mas, na verdade é uma área de risco, o que colocaria a população residente nesta área susceptível ao risco de vida.

5.8 Simulação da inundação na área atual da cidade de Lajedinho.

O Estatuto da Cidade em seu artigo 41º versa que é obrigada a construção de Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) para as cidades incluídas no cadastro nacional de Municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas que é o caso da cidade de Lajedinho.

Dentre outros objetivos, o Plano Diretor aborda o zoneamento da cidade, indicando as atividades que podem ser executadas e áreas que não podem ser ocupadas. Atualmente o Plano Diretor de Lajedinho está em construção, diversas pessoas afetadas pela inundação de 2013 foram relocadas para outras residências em áreas apropriadas, todavia, ocorre que algumas residências ainda continuam em áreas de risco.

Utilizando a ortofoto gerada pelo imageamento com VANT realizado em 11 e 23 de dezembro de 2016 foi construído um mapa (Figura 45) para simular a inundação na cidade atual.

Figura 45: Mancha de Inundação para a Vazão Máxima (Tr 650 anos) utilizando o MDT-GNSS – Simulação da Inundação de Dezembro de 2013 na área atual da cidade de Lajedinho.



Fonte: O autor.

Pode-se perceber, comparando com a imagem de satélite de 2013 que diversas residências foram retiradas, mas, ocorre que atualmente ainda há residências em áreas de risco e que estão sendo ocupadas. Caso ocorra uma inundação da mesma magnitude ou maior podem causar um grande impacto urbano em Lajedinho, inclusive risco de vida humana.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A integração entre modelos hidráulicos e os SIG permitem conhecer melhor a dinâmica da hidrografia. A tomada de decisões baseadas nos resultados destes modelos fornece aos especialistas e gestores as informações espaciais importantes para análise e uma ação efetiva, possibilitando a minimização dos impactos decorrentes das grandes tragédias provocadas por enchentes e inundações. Constatou-se que a utilização das geotecnologias através do SIG (ArcGis 10 e extensão Hec-GeoRas) integradas com os *softwares* hidrológicos e hidráulicos (HEC-RAS) conseguem auxiliar na identificação e caracterização mais eficientemente das áreas susceptíveis a riscos hidrológicos.

Este estudo mostra-se interdisciplinar, envolvendo diversas áreas da ciência Hidrológica e Hidráulica como também o Sensoriamento Remoto, Geodésia e Fotogrametria, através desta união trata de um assunto de interesse de toda a sociedade: a preservação do meio ambiente e da vida humana. Ao final desta pesquisa podem-se tirar algumas conclusões e recomendações importantes:

1- A modelagem hidráulica com bases em MDT de imagens SRTM e imageamento com VANT deve ser avaliada especificamente para o objetivo e escala do trabalho que se destina, observou-se que sua utilização gerou uma relativa diferença no tamanho e forma da área quando comparado com uma modelagem hidráulica mais próxima do real, a produzida através de informações do terreno baseada em dados de posicionamento GNSS.

2- A análise das discrepâncias das coordenadas do MDT-GNSS e MDT-SRTM atingiram resultados melhores que os esperados nesta pesquisa, já que a maioria dos estudos para as coordenadas altimétricas em imagens SRTM chegaram aproximadamente a 6 metros de precisão. Mesmo com relevo acidentado, a média das discrepâncias foi de 2.60m sendo menores que as discrepâncias utilizando o MDT-VANT. Apesar das diferenças em área chegarem a 19,11%, esta pesquisa mostra que é viável a utilização das

imagens SRTM para ter uma noção geral da delimitação da mancha de inundação da região de estudo.

3- Uma hipótese feita no início do trabalho foi que as manchas de inundação obtidas da modelagem hidráulica com base no modelo digital de terreno gerado através do imageamento com plataforma VANT seriam bem mais próximas às manchas de inundação com base no Posicionamento GNSS, já que os modelos obtidos por Fotogrametria com VANT podem atingir níveis sub-métricos de precisão. Podem-se elencar alguns fatores principais para este fato não ter ocorrido, são eles: o sensor embarcado no VANT DJI Phantom Vision 2 não é o mais adequado para utilização na fotogrametria, esta câmera possui muitas distorções devido ao efeito “olho de peixe” (distorções panorâmicas na imagem) que deformam os objetos presentes na imagem, influenciando no resultado do processamento, por conseguinte, na obtenção das coordenadas planimétricas e altimétricas. Desta maneira, a qualidade geométrica das fotos não foi mantida durante todo o imageamento da área de estudo, mesmo com a aerotriangulação de 12 pontos de apoio não foi suficiente para atingir níveis sub-métricos de precisão. O RMS (Root Mean Square) indica a acurácia do mapeamento aéreo, na ortofoto gerada foi de 1.7m (Apêndice A). A estabilidade do VANT também influenciou nos resultados, o VANT, por ser instável, interfere na captura de imagens para mapeamento de alta precisão. Destaca-se que na época que o Phantom 2 foi adquirido pela UFBA, a empresa DJI desenvolvia VANT com a finalidade de atingir o mercado de mídia e hobbie e não o de Fotogrametria. Outro fator importante constatado que afetou diretamente os resultados com o MDT-VANT foi à classificação da nuvem de pontos, o algoritmo utilizado no *software* não conseguiu filtrar a nuvem de pontos com qualidade aceitável.

4- A utilização de dados de posicionamento GNSS para simulação da inundação ocorrida em 2013 realizada para a vazão máxima do tempo de recorrência de 650 anos, é considerada a mais precisa e suas análises se aproximam da inundação registrada na época, principalmente no que diz respeito à profundidade atingida pela água e velocidade da enxurrada em determinadas regiões.

5- Importante destacar que a intenção inicial da pesquisa foi de utilizar os modelos de grade irregular triangular no formato TIN para a realização das modelagens, apesar da utilização do MDT-GNSS e MDT-VANT em formato TIN não apresentar problema nos procedimentos da modelagem, ocorre que, nos resultados ao utilizar o Modelo TIN baseados em imagens SRTM encontrou-se trechos da mancha sem conexão, não respeitando o formato da inundação. Ao utilizar o modelo de grade regular não foi apresentado este problema. O motivo mais provável para ocorrência deste erro deve-se ao fato da necessidade de primeiramente ser extraídas as curvas de nível e através destas utilizar método da triangulação de Delaunay para gerar Modelo TIN.

6- Apesar do canal não ter sido apresentado com detalhamento de projeto, é possível observar, a partir da simulação hidráulica, que o mesmo não comporta a vazão de cheia do tempo de recorrência estudado, mostrando-se insuficiente para confinar o escoamento em sua calha. Além disso, constatou-se que a construção do canal do rio Saracura, no trecho urbano da cidade de Lajedinho, não foi realizada na localização mais adequada, pois o canal não foi construído nas altitudes mais baixas da região.

7- Uma das grandes dificuldades enfrentadas ao estimar as vazões volumétricas de cursos d'água naturais por meio de equações de energia consiste em saber se os valores de coeficientes de resistência ao escoamento são aqueles que realmente retratam o comportamento do escoamento. Desta maneira, as caracterizações do coeficiente de rugosidade de *Manning*, em função da profundidade da lâmina d'água, são indispensáveis para a calibração de um modelo hidráulico, que se baseia em equações hidrodinâmicas. Este procedimento torna a modelagem hidráulica mais próxima da realidade.

8- Como o foco do estudo não é a parte da modelagem hidrológica, optamos por utilizar os dados do estudo hidrológico realizados pela CONDER, (2014). Este estudo hidrológico, possivelmente por ser um estudo técnico, não explica especificamente toda a metodologia utilizada para encontrar os dados hidrológicos. Por exemplo, o estudo não diz quais são as localidades que a equação de intensidade-duração-frequência é conhecida, se foram consideradas as localidades da região ou outras. Importante indicar também

que a precisão dos resultados da modelagem hidráulica desta pesquisa referente à simulação para o evento de 2013, está relacionada diretamente com o estudo hidrológico da CONDER, (2014). Indica-se ainda, a possibilidade da vazão máxima ser determinada a partir de dados pluviométricos para diferentes períodos de retorno de diversas maneiras, uma delas está em utilizar o modelo HEC-HMS, de acesso livre, também produzido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

9- Ao utilizar a metodologia de determinação da mancha de inundação através da coleta de pontos cotados, deve-se observar a quantidade e a distribuição das amostras por toda a área, levando em consideração os principais quesitos: declividade do relevo e tamanho da área atingida.

Destaca-se nos resultados do trabalho que a população de Lajedinho ainda encontra-se residindo em áreas de risco. Caso ocorra uma inundação da mesma magnitude ou superior poderá causar danos irreparáveis à população. Este trabalho será encaminhado para a administração pública para auxiliar os gestores na reconstrução da cidade e confecção do PDDU do município de Lajedinho.

A metodologia adotada e proposta na pesquisa pode ser reproduzida para outras regiões, com as devidas adequações, e produzir resultados satisfatórios. Os seus resultados podem auxiliar os gestores e planejadores a atuar nestas áreas através de intervenções planejadas, no sentido de interferir, corrigir e principalmente atuar na prevenção dos acidentes causados por desastres hidrológicos, principalmente a inundação. Sendo uma ferramenta importante para subsidiar o planejamento, a exemplo dos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano, exigência do Governo Federal (Lei nº 10.257/2001).

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.

Neste capítulo abordam-se sugestões para trabalhos futuros identificados ao longo da elaboração da dissertação.

1. Há a possibilidade da realização de estudo através do uso de modelos digitais de terreno híbridos realizados através de mais de um método de aquisição a fim de obter melhores precisões e ser aplicados à modelagem hidráulica na definição de áreas de risco de inundação.
2. Sugere ser estudada a utilização dos modelos de grade irregular triangular em comparação com modelos de grade regulares aplicados a modelagem hidráulica, investigando de uma melhor maneira o fato dos resultados da modelagem utilizando o modelo TIN baseados em imagens SRTM não ter conseguido respeitar o formato da mancha de inundação, apresentando áreas desconectadas no estudo de caso em Lajedinho.
3. O estudo comparativo de custos de preços relativos às três técnicas utilizadas também é interessante de ser compreendido, para saber a viabilidade econômica de cada técnica.
4. Sugere-se o estudo mais detalhado das câmeras de pequeno formato embarcadas nos VANT, assim como seu processo de calibração, já que os sensores são os itens mais importantes na Fotogrametria.

8 REFERÊNCIAS.

BRASIL. Estatuto da Cidade. **Lei federal de n.º 10.257 de 2001.**

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios** / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades / Cities Alliance - **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais** / Celso Santos Carvalho e Thiago Galvão, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006.

BRITO, F. O deslocamento da população brasileira para as metrópoles. Dossiê Migração. **Estudos Avançados**, v. 20, n. 57, São Paulo. SciELO, maio/agosto 2006, 13p. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 30 novembro. 2015.

CAMPOY, P., CORREA, J.F., MONDRAGÓN, I., MARTÍNEZ, C., OLIVARES, M., MEJÍAS, L. and ARTIEDA, J. **Computer vision onboard UAVs for civilian tasks**, J. Intell. Robot. Syst., 54(1-3), 105-135, 2009.

CARMO, R. L. ANAZAWA, T. M. **Mortalidade por desastres no Brasil: o que mostram os dados**. Ciênc. Saúde coletiva, v. 19, n. 9, p. 3669-3681, 2014.

CENTENO, J. A. S.; MITSHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. *In*: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE. p. 3645-3652., 2007

CONDER, Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. **Estudo de macrodrenagem do Rio Saracura – Município de Lajedinho /Bahia**, 2014

COUTINHO, M. M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina / ES** [manuscrito] x, 245 f.: il. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2015.

DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Circular de Informações Aeronáuticas AIC N 21/10**, 23 Setembro, 2010.

DRUZINA, A. G. da S. **Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo Modelo Digital de Elevação**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de

Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, (79p), 2007.

EIRD - Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR). **Terminología sobre reducción del riesgo de desastres**. Ginebra: UNISDR, 2009.

EISENBEISS, H. **UAV Fotogrametria**. Dissertação ETH n^o 18515, do Instituto de Geodésia e Fotogrametria, ETH Zurich, Suíça, Mitteilungen 105p, 2009.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. In: Introdução à Ciência da Geoinformação, 2005.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Geométrica**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 1a ed. Curitiba, PR., 1987.

GRIBBIN, John E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. 3^o ed. São Paulo . Ed. Cengage Learning, 2009.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em Geomorfologia. **Revista Geografia Acadêmica**, v.2, n. 2, p.73-83, 2008.

HODGSON D. **The urbanization of the world (course materials)**. Fairfield University, Fairfield, 2011. Disponível em: <<http://www.faculty.fairfield.edu/faculty/hodgson/Courses/so11/population/urbanization.htm>> Acesso em: 30 nov. 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS**, 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Censo Demográfico, 2010: Lajedinho**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=291900>>. Acesso em: 08 out. 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Pesquisa de Informações Básicas Municipais**, 2013.

INCRA, INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Manual Técnico de Posicionamento**. Brasília, 2013. 1^a Edição.

LI, Z.; ZHU, Q. e GOLD, C., **Digital Terrain Modeling, Principles and Methodology**. Boca Raton: CRC Press. 526–dc22, 2005.

MARCELINO, E.V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. CRS/INPE. Santa Maria, 2008. 39 p. Disponível em: <

m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

MILLER, C; LAFLAMME, R. 1958. The digital terrain model – theory and applications, **Photogrammetric Engineering**, 24: 433-442.

MURPHY, R.R., STEIMLE, E., GRIFFIN, C., CULLINS, C., HALL, M. and PRATT, K. Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at Hurricane Wilma, **J. Field Robot.**, 25(3), 164-180, 2008.

MURPHY, R.R., STEIMLE, E., HALL, M., LINDEMUTH, M., TREJO, D., HURLEBAUS, S., MEDINA-CETINA, Z. and SLOCUM, D., Robot-assisted bridge inspection, **J. Intell. Robot. Syst.**, 64(1), 77-95. 2011.

NASA, GOV. USA, SRTM, 2017.

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm> Acesso em 21 de fevereiro de 2017.

NEX F.; REMONDINO F. UAV for 3D mapping applications: a review. Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia (SIFET). **Appl Geomat**: p.15, 2014.

ONU, Organização das Nações Unidas, Carta Rio +20, Departamento de Informação Pública das Nações Unidas, junho de 2012, Rio de Janeiro, Disponível em: ofuturoquequeremos.org.br. Acesso em: 13 out. 2015.

PEREZ, L. Blog MundoCartoGeo, **Modelos Digitales De Elevacion En Estudios Hidrologicos. Criterios de selección, evaluación y limitaciones**, 2017. Disponível em: <http://mundocartogeo.blogspot.com.br/2016/08/modelos-digitales-de-elevacion-en.html#mo> Acesso em: 12 de fevereiro de 2017.

PERRY, J.H.; RYAN, R.J., Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities, **GIScience & Remote Sensing**, 48(1), 99-111, 2011.

PONTES, P. R. M. **Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais**. 159 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RATHINAM, S., KIM, Z.W. and SENGUPTA, R., Vision-based monitoring of locally linear structures using an unmanned aerial vehicle, **Journal of Infrastructure Systems**, 14(1), 52-63, 2008.

SANTOS, K. A. dos. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude: estudo de caso, bacia do Rio Mundaú**. Recife, Universidade Federal de Pernambuco. Dissertação (Mestrado), 2013.

SAUSEN, T. M. LACRUZ, M. S. P. Sensoriamento remoto para desastres. Org. São Paulo, **Oficina de Textos**, 2015.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. 2^a ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SEI, SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DO ESTADO DA BAHIA. **Estatísticas dos municípios baianos: Território de Identidade Piemonte do Paraguaçu**. Salvador, SEI: v. 4, n. 2,, p. 113-128, 2014

SILVA. C. A. **Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados por VANT e sua aplicação no cálculo do volume de pilhas de rejeito da Pedra Cariri**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, 146p. 2015a.

SILVA, D. C.; **Módulo 1 do Curso de Mapeamento com VANT**. XII Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura (CONEA), Salvador, BA, 2015b.

STRASSER, M. A., RIBEIRO N. A., SILVA, R., MASCARNHAS, F. **Estudo da variação do coeficiente de rugosidade de Manning em rios da Bacia Amazônica por meio de modelagem hidrodinâmica**. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

TEIXEIRA, N. N. **Geodésia**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Geotecnologias – Soluções de Inteligência Geográfica. EEEMBA, Salvador, BA, 2010a.

TEIXEIRA, N. N. **Posicionamento e Navegação por Satélites**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Geotecnologias – Soluções de Inteligência Geográfica. EEEMBA, Salvador, BA, 2010b.

UFBA, UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. **Relatório de Campo. Lajedinho: inundação de 2013**. Salvador: Escola Politécnica da UFBA, 39 p. 2013.

UNESCO, Glossário Internacional de Hidrologia.
<<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDPT.HTM>
acessado em 23 de julho de 2016.>

USACE, US Army Corps of Engineers, USACE, HEC-RAS River Analysis System - **Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA. 2016.

9 APÊNDICES.

Apêndice A: Levantamento Fotogramétrico com VANT - Lajedinho-Ba

LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO COM VANT - LAJEDINHO-BA

LEVANTAMENTO EXECUTADO PARA DISSERTAÇÃO DE SANTIAGO HENRIQUE
A. S. NASCIMENTO

13 January 2017



Survey Data

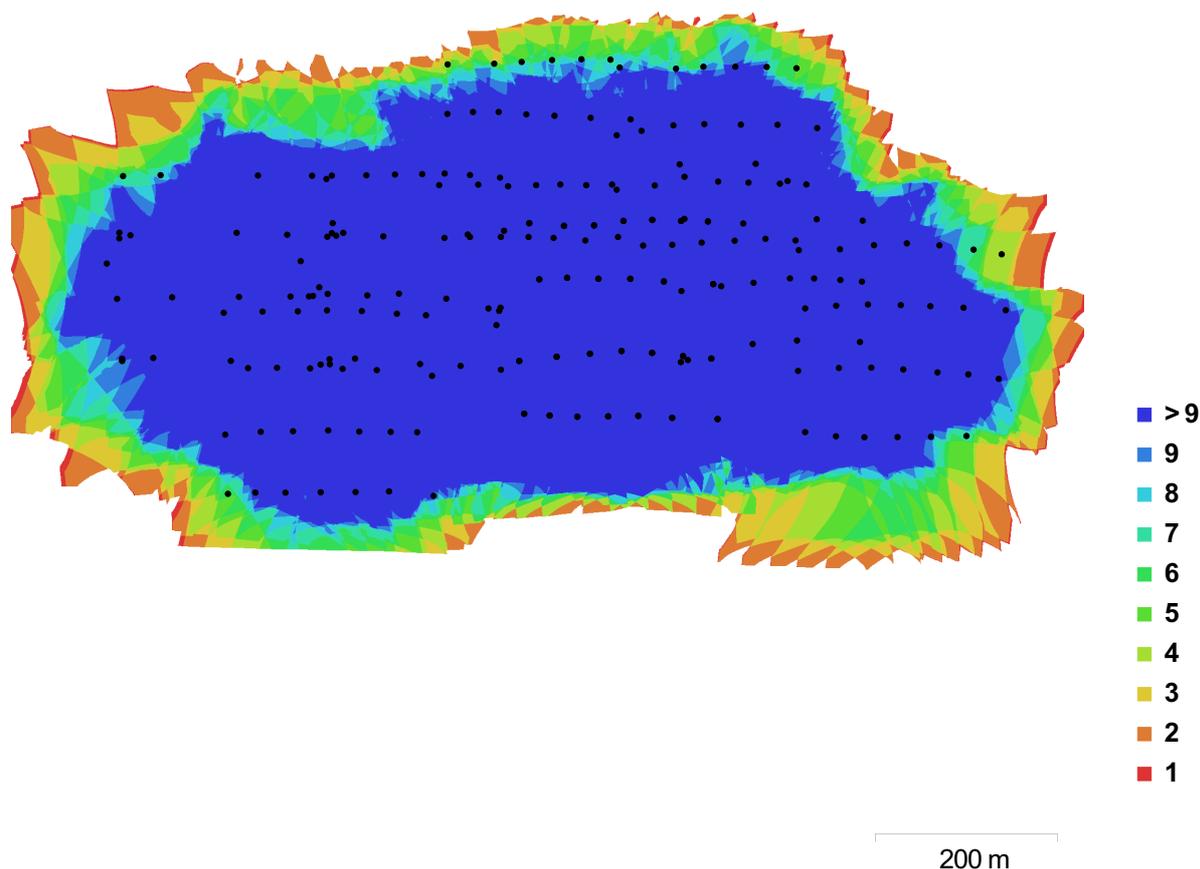


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	233	Camera stations:	233
Flying altitude:	149 m	Tie points:	305,946
Ground resolution:	3.73 cm/pix	Projections:	996,982
Coverage area:	0.567 km ²	Reprojection error:	12.5 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
PHANTOM VISION FC200 (5 mm)	4608 x 3456	5 mm	1.34 x 1.34 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

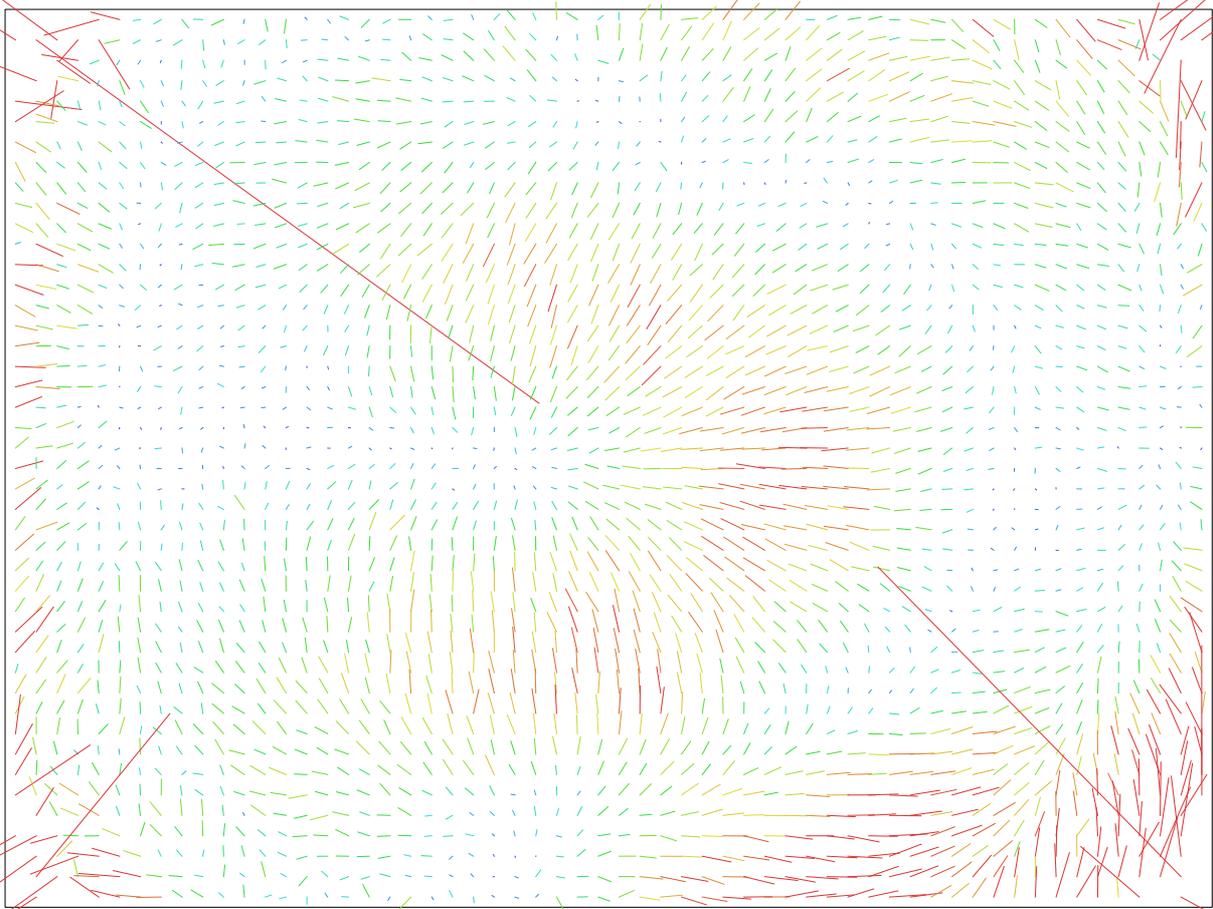


Fig. 2. Image residuals for PHANTOM VISION FC200 (5 mm).

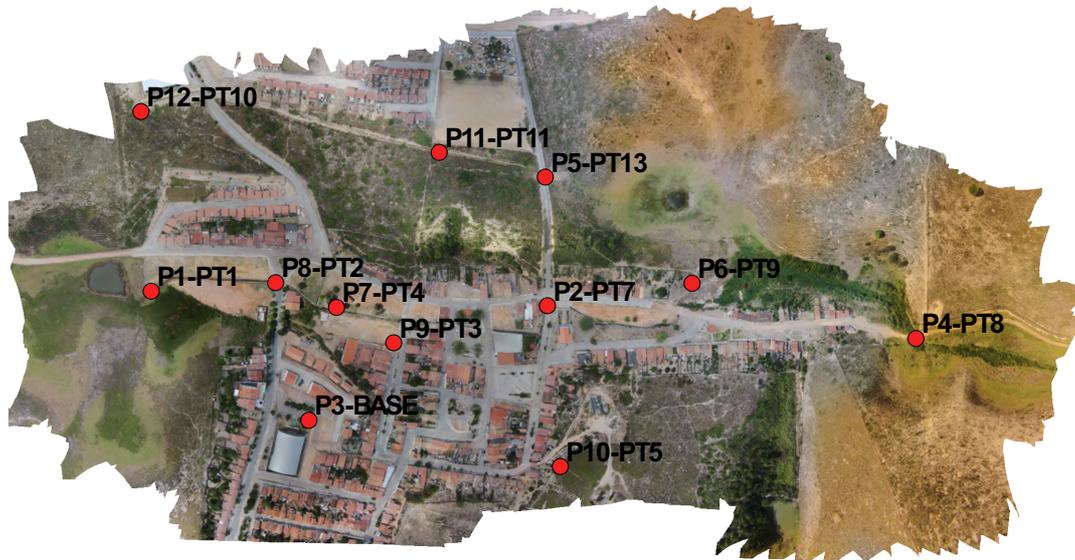
8 pix

PHANTOM VISION FC200 (5 mm)

233 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
4608 x 3456	5 mm	1.34 x 1.34 μm	No
Type:	Frame	F:	3806.82
Cx:	83.046	B1:	19.8875
Cy:	11.4301	B2:	7.16586
K1:	-0.634606	P1:	-0.0036354
K2:	0.39502	P2:	0.000305037
K3:	-0.117041	P3:	-0.134858
K4:	0.00426062	P4:	0

Ground Control Points



● Control points

● Check points

200 m

Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)	Image (pix)
12	0.991772	1.44028	6.45305	1.74872	6.68579	31.860

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
P1-PT1	0.120155	-0.181349	0.242532	0.325801	1.880 (18)
P2-PT7	-0.434342	-0.528167	1.90755	2.02642	7.350 (56)
P4-PT8	-1.01365	-0.129318	-2.45739	2.66138	97.404 (29)
P5-PT13	-0.363608	0.297552	-1.93747	1.99362	5.212 (33)
P3-BASE	1.87759	-2.66761	1.9078	3.77904	16.760 (21)
P6-PT9	-0.660366	-1.21402	5.37501	5.54983	17.235 (48)
P7-PT4	0.684892	0.217731	6.31253	6.35331	8.218 (40)
P8-PT2	0.411741	0.0745284	6.72388	6.73688	9.501 (37)
P9-PT3	0.679837	0.595352	1.09592	1.42044	21.964 (43)
P10-PT5	-1.12942	-1.75955	-17.4125	17.5376	42.986 (13)
P11-PT11	0.256313	1.40713	-3.35272	3.64505	25.148 (13)
P12-PT10	-2.00924	3.22526	-7.27915	8.2113	0.490 (2)
Total	0.991772	1.44028	6.45305	6.68579	31.860

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model

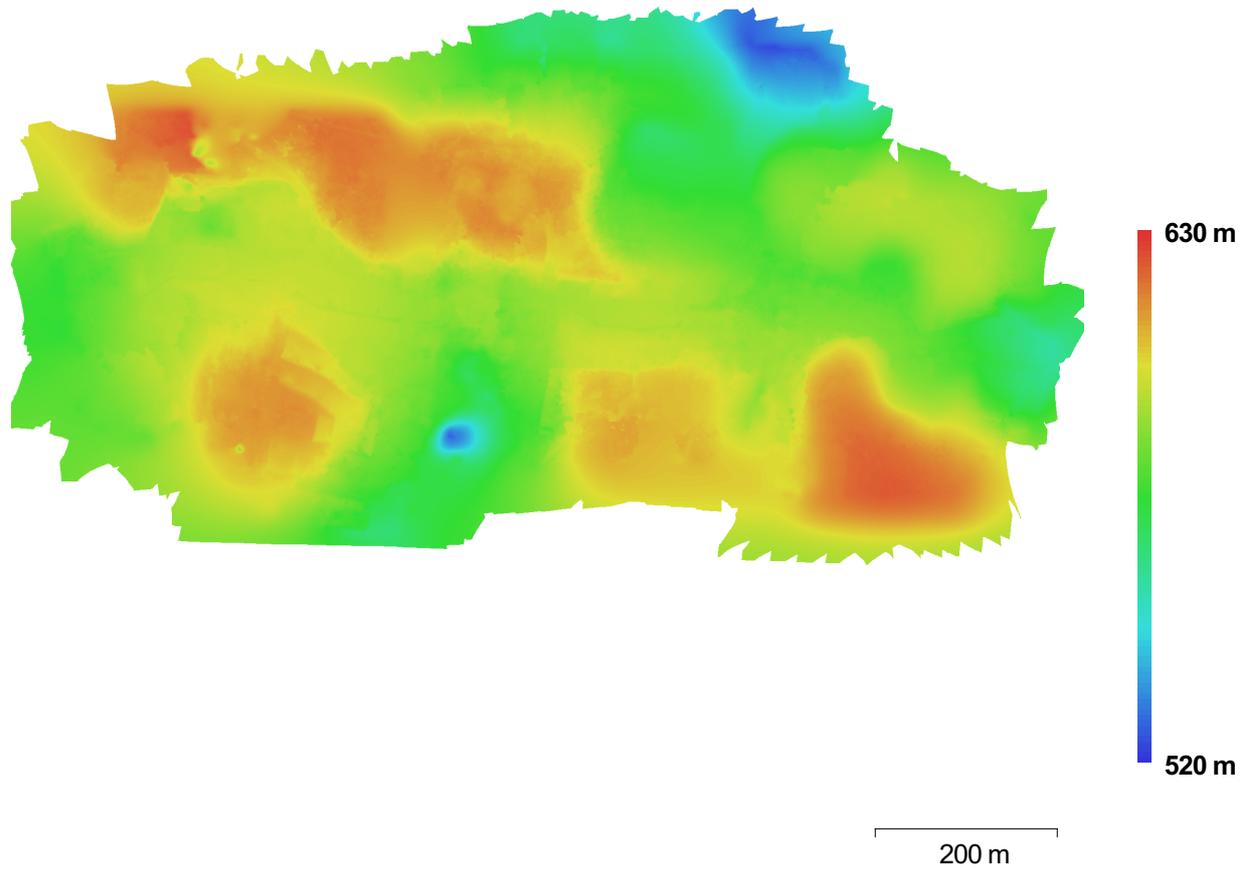


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 14.9 cm/pix
Point density: 45 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	233
Aligned cameras	233
Markers	12
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTMzone 24S (EPSG::31984)

Point Cloud

Points	305,946 of 682,343
RMS reprojection error	1.70062 (12.5165 pix)
Max reprojection error	815.063 (7368.03 pix)
Mean key point size	8.71034 pix
Effective overlap	2.90589

Alignment parameters

Accuracy	Medium
Pair preselection	Reference
Keypoint limit	2,000,000
Tie point limit	100,000
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	10 minutes 10 seconds
Alignment time	8 minutes 58 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p3
Optimization time	4 seconds

Depth Maps

Count	233
-------	-----

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	3 hours 24 minutes

Dense Point Cloud

Points	26,424,675
--------	------------

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	3 hours 24 minutes
Dense cloud generation time	9 minutes 22 seconds

Model

Faces	5,243,960
Vertices	2,625,178

Reconstruction parameters

Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	5,284,935
Processing time	1 minutes 40 seconds

Texturing parameters

Mapping mode	Orthophoto
UV mapping time	1 minutes 19 seconds

Tiled Model

Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Tile size	8192
Processing time	1 hours 13 minutes

DEM

Size	8,461 x 4,486
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTMzone 24S (EPSG::31984)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	1 minutes 5 seconds
Orthomosaic	
Size	31,632 x 16,660
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTMzone 24S (EPSG::31984)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
Reconstruction parameters	
Surface	DEM
Enable color correction	No
Processing time	11 minutes 6 seconds
Software	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

Apêndice B: Relatório: Processamento Geodésico-Transporte de Coordenadas da Base de campo.

CABEÇALHO DO PROJETO

Project name: PROJETO

Creation time: 12/26/2016 5:39:49 PM

Linear unit: Meters

Angular unit: DMS

Projection: UTMSouth-Zone_24 : 42W to 36W

Time Zone: E. South America Standard Time

AJUSTAMENTO

COORDENADAS UTM

Name	Grid Northing (m)	Grid Easting (m)	Elevation (m)
BAIR	8748697.572	187930.16	723.919
BASE CAMPO LAJEDINHO	8633355.715	292823.363	611.789
SSA1	8565561.75	552438.838	-2.091
TEMP			

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Name	Latitude	Longitude	Elevation (m)
BAIR	11°18'20.33089"S	41°51'30.66979"W	723.919
BASE CAMPO LAJEDINHO	12°21'21.17754"S	40°54'19.36291"W	611.789
SSA1	12°58'30.56970"S	38°30'59.34470"W	-2.091
TEMP			

DESVIO PADRÃO

Name	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
BAIR	0.001	0.001	0.001	0.005

BASE CAMPO LAJEDINHO	0.019	0.023	0.03	0.052
SSA1	0.001	0.001	0.001	0.004
TEMP				

FATOR DE ESCALA

Name	Grid to Ground Scale Factor	Convergence
BAIR	0.999309032	0°33'39.0541"
BASE CAMPO LAJEDINHO	0.999964991	0°24'28.3152"
SSA1	1.000365789	-0°06'30.8358"
TEMP		

PRECISÃO

Name	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	North RMS(m)	East RMS(m)	Vert RMS (m)	CorrXY
BAIR-BASE CAMPO LAJEDINHO	-115341.882	104893.235	-113697.521	0.019	0.029	0.048	-0.4591
BASE CAMPO LAJEDINHO-SSA1	-67793.965	259615.475	-66710.266	0.025	0.042	0.061	-0.3974

DISTÂNCIA - SOLUÇÃO - ÓRBITA E PDOP

Name	Distance (m)	Solution Type	Orbit	PDOP	HDOP	VDOP
BAIR-BASE CAMPO LAJEDINHO	155848.013	Fixed,Wide Lane	Broadcast	1.485	0.708	1.305
BASE CAMPO LAJEDINHO-SSA1	268383.665	Fixed,Wide Lane	Broadcast	1.506	0.714	1.326

DURAÇÃO E INTERVALO

Point Name	Original Name	Start Time	Stop Time	Duration	Method	Interval (msec)	Antenna Type
BASE CAMPO LAJEDINHO	13534_1211k_KUUI	12/11/2016 7:08	12/11/2016 11:48	4:39:16	Static	1000	HiPer SR
BAIR	BAIR	12/10/2016 21:00	12/11/2016 21:00	24:00:00	Static	15000	TRM59800.00 NONE

SSA1	SSA1	12/10/2016 21:00	12/11/2016 21:00	24:00:00	Static	15000	TRM59800.00 NONE
------	------	------------------	------------------	----------	--------	-------	------------------

PONTOS DE CONTROLE

Name	Grid Northing (m)	Grid Easting (m)	Elevation (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
BAIR	8748697.572	187930.16	723.919	0.001	0.001	0.001	0.005
SSA1	8565561.75	552438.838	-2.091	0.001	0.001	0.001	0.004

Apêndice C: Relatório: Processamento Geodésico-Levantamento dos pontos de apoio para o levantamento Fotogramétrico com VANT.

CABEÇALHO DO PROJETO

Project name: PROJETO_ROVER

Creation time: 12/26/2016 5:39:49 PM

Linear unit: Meters

Angular unit: DMS

Projection: UTMSouth-Zone_24 : 42W to 36W

Datum: SIRGAS

Time Zone: E. South America Standard Time

AJUSTAMENTO

COORDENADAS UTM

Name	Grid Northing (m)	Grid Easting (m)	Elevation (m)
BASE CAMPO LAJEDINHO	8633355.715	292823.363	611.789
PT1	8633496.261	292651.837	592.996
PT2	8633505.465	292788.276	592.325
PT3	8633438.364	292917.797	591.711
PT4	8633477.822	292854.883	590.926
PT5	8633303.592	293102.723	607.514
PT6	8633485.854	293435.093	581.529
PT7	8633480.586	293087.833	589.646
PT8	8633443.773	293493.358	581.314
PT9	8633506.042	293246.969	588.862
PT10	8633691.923	292642.701	624.955
PT11	8633648.512	292968.149	619.209
PT12	8633806.41	293173.067	625.08
PT13	8633622.301	293085.369	614.634

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Name	Latitude	Longitude	Elevation (m)
-------------	-----------------	------------------	----------------------

BASE CAMPO LAJEDINHO	12°21'21.17754"S	40°54'19.36291"W	611.789
PT1	12°21'16.56479"S	40°54'25.00658"W	592.996
PT2	12°21'16.29695"S	40°54'20.48885"W	592.325
PT3	12°21'18.51024"S	40°54'16.21806"W	591.711
PT4	12°21'17.21179"S	40°54'18.29098"W	590.926
PT5	12°21'22.93813"S	40°54'10.12947"W	607.514
PT6	12°21'17.08465"S	40°53'59.08654"W	581.529
PT7	12°21'17.17579"S	40°54'10.58064"W	589.646
PT8	12°21'18.46729"S	40°53'57.16808"W	581.314
PT9	12°21'16.38431"S	40°54'05.30791"W	588.862
PT10	12°21'10.19639"S	40°54'25.26280"W	624.955
PT11	12°21'11.68426"S	40°54'14.50214"W	619.209
PT12	12°21'06.59407"S	40°54'07.68312"W	625.08
PT13	12°21'12.56419"S	40°54'10.62883"W	614.634

DESVIO PADRÃO

Name	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
BASE CAMPO LAJEDINHO	0.019	0.023	0.03	0.052
PT1	0.008	0.011	0.014	0.024
PT2	0.021	0.025	0.033	0.058
PT3	0.02	0.024	0.032	0.055
PT4	0.02	0.024	0.032	0.056
PT5	0.02	0.024	0.031	0.055
PT6	0.02	0.024	0.032	0.059
PT7	0.021	0.025	0.033	0.059
PT8	0.021	0.025	0.032	0.056
PT9	0.021	0.025	0.033	0.057
PT10	0.022	0.025	0.033	0.057
PT11	0.02	0.024	0.032	0.055
PT12	0.022	0.027	0.035	0.06
PT13	0.022	0.026	0.034	0.06

FATOR DE ESCALA

Name	Grid to Ground Scale Factor	Convergence
BASE CAMPO LAJEDINHO	0.999964991	0°24'28.3152"
PT1	0.999961162	0°24'29.3741"
PT2	0.999961757	0°24'28.3977"
PT3	0.999962324	0°24'27.5549"
PT4	0.999961879	0°24'27.9567"
PT5	0.999965752	0°24'26.3944"
PT6	0.999963373	0°24'23.8391"
PT7	0.999962871	0°24'26.3040"
PT8	0.999963637	0°24'23.4730"
PT9	0.999963562	0°24'25.1490"
PT10	0.999966131	0°24'29.2219"
PT11	0.999966898	0°24'26.9657"
PT12	0.999968868	0°24'25.3401"
PT13	0.99996678	0°24'26.1647"

PRECISÃO

Name	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	North RMS(m)	East RMS(m)	Vert RMS (m)	CorrXY
LAJEDINHO-PT1	140.547	-171.526	142.497	0.001	0.001	0.002	-0.5911
LAJEDINHO-PT2	149.75	-35.087	150.682	0.001	0.001	0.002	-0.6754
LAJEDINHO-PT3	82.649	94.434	84.369	0.001	0.001	0.002	-0.6825
LAJEDINHO-PT4	122.108	31.52	123.517	0.001	0.001	0.002	-0.6534
LAJEDINHO-PT5	-52.123	279.361	-51.939	0.001	0.001	0.003	-0.846
LAJEDINHO-PT6	130.139	611.73	129.345	0	0.001	0.002	-0.8599
LAJEDINHO-PT7	124.871	264.47	124.872	0.001	0.001	0.002	-0.7795
LAJEDINHO-PT8	88.058	669.995	87.883	0.001	0.001	0.002	-0.7139
LAJEDINHO-PT9	150.327	423.606	148.8	0.001	0.001	0.002	-0.6704
LAJEDINHO-PT10	336.208	-180.661	326.843	0.001	0.001	0.001	-0.6429
LAJEDINHO-PT11	292.797	144.787	283.405	0	0.001	0.001	-0.7359

LAJEDINHO-PT12	450.695	349.705	434.961	0.001	0.001	0.002	-0.7133
LAJEDINHO-PT13	266.586	262.006	257.968	0.001	0.001	0.002	-0.671

DISTÂNCIA - SOLUÇÃO - ÓRBITA E PDOP

Name	Distance (m)	Solution Type	Orbit	PDOP	HDOP	VDOP
LAJEDINHO-PT1	222.54	Fixed	Broadcast	1.581	0.786	1.372
LAJEDINHO-PT2	155.027	Fixed	Broadcast	1.322	0.638	1.158
LAJEDINHO-PT3	127.085	Fixed	Broadcast	1.267	0.601	1.115
LAJEDINHO-PT4	127.82	Fixed	Broadcast	1.4	0.655	1.237
LAJEDINHO-PT5	284.204	Fixed	Broadcast	1.996	0.741	1.854
LAJEDINHO-PT6	626.129	Fixed	Broadcast	2.147	0.744	2.014
LAJEDINHO-PT7	293.294	Fixed	Broadcast	1.797	0.723	1.645
LAJEDINHO-PT8	676.42	Fixed	Broadcast	1.435	0.676	1.266
LAJEDINHO-PT9	450.057	Fixed	Broadcast	1.394	0.682	1.216
LAJEDINHO-PT10	381.888	Fixed	Broadcast	1.367	0.758	1.137
LAJEDINHO-PT11	326.712	Fixed	Broadcast	1.44	0.772	1.216
BASE CAMPO						
LAJEDINHO-PT12	570.591	Fixed	Broadcast	1.545	0.802	1.32
BASE CAMPO						
LAJEDINHO-PT13	373.784	Fixed	Broadcast	1.452	0.76	1.237

DURAÇÃO E INTERVALO

Point Name	Original Name	Start Time	Stop Time	Duration	Method	Interval (msec)	Antenna Type
BASE CAMPO LAJEDINHO	13534_1211k_KUUI	12/11/2016 7:08	12/11/2016 11:48	4:39:16	Static	1000	HiPer SR
PT2	BASE1211k_VQQY	12/11/2016 7:39	12/11/2016 7:56	0:16:42	Static	1000	HiPer SR
PT8	BASE1211m_VQQY	12/11/2016 9:18	12/11/2016 9:41	0:23:16	Static	1000	HiPer SR
PT6	BASE1211l_VQQY	12/11/2016 8:52	12/11/2016 9:14	0:21:06	Static	1000	HiPer SR
PT4	BASE1211k000_VQQY	12/11/2016 7:58	12/11/2016 8:28	0:30:05	Static	1000	HiPer SR
PT13	BASE1211o000_VQQY	12/11/2016 11:24	12/11/2016 11:38	0:13:40	Static	1000	HiPer SR
PT11	BASE1211o_VQQY	12/11/2016 11:01	12/11/2016 11:21	0:20:41	Static	1000	HiPer SR
PT1	log1211k_AIWA	12/11/2016 7:28	12/11/2016 7:43	0:15:13	Static	1000	HiPer SR

PT3	log1211k000_AIWA	12/11/2016 7:51	12/11/2016 8:13	0:21:56 Static	1000 HiPer SR
PT5	log1211l_AIWA	12/11/2016 8:19	12/11/2016 9:00	0:40:51 Static	1000 HiPer SR
PT7	log1211m_AIWA	12/11/2016 9:06	12/11/2016 9:25	0:18:59 Static	1000 HiPer SR
PT9	log1211m000_AIWA	12/11/2016 9:30	12/11/2016 9:46	0:15:48 Static	1000 HiPer SR
PT12	log1211o_AIWA	12/11/2016 11:16	12/11/2016 11:28	0:11:56 Static	1000 HiPer SR
PT10	log1211n_AIWA	12/11/2016 10:53	12/11/2016 11:08	0:15:08 Static	1000 HiPer SR