



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Bruno Cardoso Duarte

ANÁLISE DO IMPACTO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS
MODELOS DIGITAIS DO TERRENO NA MODELAÇÃO
DE CHEIAS PLUVIAIS EM MEIO URBANO

Dissertação no âmbito do Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e pelo Doutor João Paulo Correia Leitão e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro 2019



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Bruno Cardoso Duarte

Análise do impacto da resolução espacial dos modelos digitais do terreno na modelação de cheias pluviais em meio urbano

Analysis of the digital terrain model's resolution on urban flood modeling

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e pelo Doutor João Paulo Correia Leitão

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam surgir

Coimbra, 7 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Queria começar por agradecer a todos os que contribuíram direta ou indiretamente para que a realização desta tese.

Aos meus orientadores Professor Doutor Nuno Simões e Doutor João Paulo Leitão expresso o meu profundo agradecimento pelo apoio e incentivo dados ao longo desta dissertação bem como a disponibilidade para reunir, em caso de dúvidas. Agradeço a oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Professor Doutor João Vieira agradeço por ter criado e disponibilizado o *template* desta dissertação, o que poupou muitas horas de formatação.

Quero agradecer a Lucas Maluf, David Pauta e Chiara Schiavo por me terem auxiliado na compreensão e no esclarecimento de dúvidas relativamente aos programas de simulação e claro, pelos bons momentos passados enquanto estiveram em Coimbra.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado desde o início desta caminhada académica.

Aos meus companheiros de equipa e direção do Grupo Alegre e Unido, obrigado por me fazerem abstrair dos momentos de maior stress durante os nossos treinos.

À minha família e namorada um agradecimento especial pelo carinho e apoio incondicional que me foi dado ao longo deste processo e por me terem amparado em momentos de maior dificuldade. Sem vocês nada disto seria possível!

Quero também fazer um agradecimento especial à minha mãe que ao longo desta dissertação representou um pilar fundamental para o término deste trabalho. Agradeço toda a força e determinação demonstrados em momentos muito difíceis da vida, que constituíram ensinamentos valiosos que sempre guardarei comigo.

RESUMO

Nos últimos anos, todo o mundo tem sido afetado por um grande número de inundações urbanas. As inundações urbanas provocam grandes prejuízos materiais, põem em risco vidas humanas e em alguns casos causam mortes. A crescente urbanização e ocorrência de eventos de pluviosidade intensa e de curta duração, decorrentes das alterações climáticas, são os principais fatores que contribuem para a ocorrência cada vez mais frequente de cheias urbanas. No sentido de reduzir a frequência destes acontecimentos, torna-se imperativo o estudo, cada vez mais pormenorizado, das características das bacias urbanas que possam influenciar a geração de cheias. A qualidade dos dados de entrada, como os modelos digitais do terreno (MDT), utilizados na simulação de sistemas de drenagem pluvial e modelação das condições de inundação, tem grande influência nos resultados.

Com o objetivo de avaliar a influência da resolução dos modelos digitais do terreno nos modelos de simulação numérica de drenagem urbana nos caudais gerados e na geração de áreas de inundação foram criados dois modelos de drenagem urbana da bacia urbana de Coimbra, um unidimensional (1D) e outro de drenagem dual 1D/2D, recorrendo ao programa de simulação MIKE. Em cada modelo foram testados diferentes MDT gerados a partir de dados de levantamento topográfico (escala 1:10000 e 1:1000) e de uma imagem de LiDAR.

Os resultados mostram que os caudais gerados são maiores para os modelos construídos com base na imagem de LiDAR, consequência dos maiores declives calculados a partir deste MDT. No que diz respeito às áreas de inundação, neste caso, conclui-se que os modelos com dados do LiDAR tendem a formar planícies de inundação menores, uma vez que os declives obtidos por esses modelos digitais são maiores e permitem que a água depois de sair, para o modelo do terreno, escoe e volte a entrar na rede de coletores. Nos MDT com menor resolução os declives calculados são menores e assim a água tende a acumular-se em zonas mais planas, formando maiores planícies de inundação.

Palavras-chave: MDT; Drenagem Urbana; Drenagem Dual, Inundações, MIKE FLOOD, MIKE URBAN.

ABSTRACT

In recent years, the world has suffered by a large number of urban floods. Urban floods cause high material losses, jeopardize human lives and in some cases may cause deaths. The increasing urbanization and occurrence of intense rainfall events due to climate change are the main factors that contribute to the increasing frequency of urban floods. In order to reduce the frequency of these events, it is imperative to study, in more detail, the characteristics of the urban basins that may influence the generation of floods. The quality of the input data, such as digital terrain models (DTM), used in the simulation of stormwater drainage systems and modeling of flood conditions, has a major impact on the results.

In order to evaluate the influence of the digital terrain model's resolution in numerical simulation of urban drainage in the generated flows and in the generation of floodplains, two urban drainage models were created from the urban basin of Coimbra, one - dimensional (1D) and dual drainage 1D/2D, using the MIKE simulation program, different DTM generated from topographic survey data (scale 1: 10000 and 1: 1000) and a LiDAR image were used.

The results show that the generated flow rates are higher for the models generated based on the LiDAR image, as a consequence of the larger slopes calculated from this DTM. Concerning flood areas, in this case, it is concluded that the higher resolution data tend to form smaller flood plains, since the slopes of these digital models are higher and allow the water, after leaving, to the terrain model, exit and re-enter in the sewer system. A DTM with lower resolution the calculated slopes are smaller and thus the water tends to accumulate in flatter zones, forming larger floodplains.

Keywords: DTM, Urban Drainage, Dual Drainage, Floods, MIKE FLOOD, MIKE URBAN

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Quadros	viii
Abreviaturas	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivo.....	1
1.3 Estrutura da dissertação	1
2 Revisão Bibliográfica.....	2
2.1 Drenagem urbana.....	2
2.1.1 Efeitos da urbanização e alterações climáticas nos sistemas de drenagem.....	3
2.2 Modelos de simulação.....	5
2.2.1 Classificação dos modelos	5
2.3 Modelação de sistemas de drenagem.....	7
2.4 <i>Softwares</i> de simulação de drenagem pluvial.....	12
2.5 <i>Inputs</i> dos modelos de simulação de drenagem	12
2.5.1 Cadastro do sistema de drenagem	12
2.5.2 Dados de meteorológicos	13
2.5.3 Modelos digitais do terreno.....	13
2.6 Técnicas de recolha de modelos digitais do terreno	16
3 Metodologia.....	18
3.1 Caracterização da zona de estudo	18
3.2 Dados	19
3.3 Simulação computacional	21
3.3.1 Fase preliminar	21

3.3.2	Simulação a uma dimensão (1D).....	22
3.3.3	Simulação de drenagem dual 1D/2D	24
4	Resultados	27
4.1	Fase preliminar	27
4.2	Resultados simulação 1D	28
4.3	Resultados simulação de drenagem dual 1D/2D	36
5	Conclusões	41
5.1	Conclusões	41
5.2	Trabalhos futuros.....	42
	Referências Bibliográficas	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Classificação de sistemas de drenagem.	2
Figura 2.2-Percentagem de população que vive em zonas urbanas em Portugal, Europa e sul da Europa (United Nations 2018).....	4
Figura 2.3- Efeito da urbanização no caudal de ponta(Adaptado de: Butler e Davies 2011). ...	4
Figura 2.4-Classificação de modelos hidrológicos (Fonte: Refsgaard, 1996).	6
Figura 2.5-Modelo fisicamente baseado distribuído, MIKE SHE (Fonte: Hipólito e Vaz, 2013).	7
Figura 2.6-Representação das componentes hidrológica e hidráulica de um modelo de drenagem pluvial (Adaptada de: Zoppou, 2001).	8
Figura 2.7-Representação dos processos envolvidos na geração de escoamento superficial (Fonte: Butler and Davies 2011).....	10
Figura 2.8-Reservatórios lineares em série (Fonte: Chow et al. 1988).....	11
Figura 2.9- Perfil longitudinal de uma conduta e caixas de visita (produzida no MIKE URBAN).	13
Figura 2.10- Diferenças entre MDS e MDT (Fonte: ACP-EU, 2014).....	14
Figura 2.11-a) Representação de um mapa de contornos; b) Representação de um <i>raster</i>	15
Figura 2.12-a) Representação de uma rede triangular irregular; b) Pormenor da rede triangular irregular.	15
Figura 2.13- Comparação dos diferentes métodos de aquisição de MDT(Fonte: Li et al. 2005).	17
Figura 2.14- Representação da técnica utilizada na recolha de imagens de LiDAR (Fonte: Li et al. 2005).....	17
Figura 3.1-Localização da zona de estudo.	19
Figura 3.2- Configuração da rede de drenagem e respetivas sub-bacias.	20
Figura 3.3-Chuvada de projeto com tempo de recorrência de 100 anos.....	20
Figura 3.4- a) Configuração da rede de drenagem e respetivas sub-bacias. b) Utilização do solo na zona de estudo.....	22
Figura 3.5-Representação esquemática do conceito de reservatório linear (DHI 2015b).....	23
Figura 3.6-Área de estudo, caixas de visita e condutas analisadas.....	24
Figura 3.6-Exemplo do processo de refinamento da malha triangular.	25
Figura 3.7-Malha triangular resultante do processo de refinamento.	26
Figura 4.1- Comparação dos declives resultantes dos diferentes MDT.....	27
Figura 4.2- Comparação dos tempos de atraso das sub-bacias para os diferentes MDT.	28
Figura 4.3- Variação da altura de água na caixa de visita n_1001.	30
Figura 4.4- Variação da altura de água na caixa de visita n_924.	31

Figura 4.5- Variação da altura de água na caixa de visita n_612.	32
Figura 4.6- Variação do caudal na conduta c_177.....	34
Figura 4.7- Variação do caudal na conduta c_193.....	34
Figura 4.8- Variação do caudal na conduta c_196.....	35
Figura 4.9- Planícies de inundação TR=2 anos.	37
Figura 4.10- Planícies de inundação TR=20 anos.	38
Figura 4.11- Planícies de inundação TR=100 anos.	39

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – MDT disponíveis de acesso livre (Adaptado de: Singh, 2017).....	15
Quadro 4.1 – Resultados da simulação 1D.....	29
Quadro 4.2 – Valores máximos de altura de água e percentagem de erro.....	33
Quadro 4.3 – Valores máximos de caudal e percentagem de erro.....	35
Quadro 4.4 – Resultados da simulação de drenagem dual 1D/2D.	36
Quadro 4.5 – Áreas inundadas.....	40

ABREVIATURAS

DEM – *Digital Elevation Model*

DHI – *Danish Hydraulic Institute*

DSM – *Digital Surface Model*

DTM – *Digital Terrain Model*

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

IDW – *Inverse Distance Weighted Interpolation*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital do Terreno

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SWMM – Storm Water Management Model

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Na atualidade é cada vez mais frequente a ocorrência de inundações que se fazem notar a uma escala global (p.e., Mumbai em julho de 2005, Riviera Francesa em setembro de 2015, Coimbra em maio de 2006 e Albufeira em novembro de 2015). Estes eventos são caracterizados por uma grande acumulação de água num determinado local e têm na sua origem fenómenos de precipitação intensa, cada vez mais frequentes, e que associada ao aumento da impermeabilização do solo (consequência do aumento da urbanização) tendem a ser mais frequentes. Os impactos que se fazem sentir na população consequentes de inundações, podem ter efeitos devastadores como a destruição de infraestruturas, alagamento de propriedades, instabilidade de solos e em casos de grande magnitude pode até levar à morte de indivíduos. Contudo, ao longo do tempo, os modelos computacionais têm experimentado uma grande evolução tornando-se mais completos e precisos. Aliada a esta evolução, existem cada vez mais fontes de informação disponível. Estas evoluções permitem estudar com grande rigor os fenómenos que provocam inundações e propor medidas que permitam acabar com as inundações ou, pelo menos, mitigar os seus efeitos.

1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação é estudar a influência da resolução dos modelos digitais do terreno na simulação de inundações urbanas decorrentes de eventos de pluviosidade. Pretende-se perceber qual a influência da resolução dos modelos digitais do terreno nos diferentes modelos de simulação numérica nos caudais gerados e na geração de áreas de inundação.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos. No seguimento do capítulo introdutório, que apresenta uma introdução ao tema, os objetivos que este trabalho se propõe a atingir e a estrutura desta dissertação, surge o segundo capítulo que expõe uma revisão da literatura acerca de temas como a drenagem urbana, modelos de simulação, modelação de sistemas de drenagem, *softwares* de simulação de drenagem pluvial, *inputs* dos modelos de simulação de drenagem e técnicas de recolha de modelos digitais do terreno. No capítulo 3 é exposta a metodologia utilizada para a realização das simulações computacionais. O capítulo quarto apresenta os resultados da aplicação da metodologia usada no capítulo anterior. As conclusões retiradas a partir dos resultados surgem no quinto capítulo. No último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas usadas na produção desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Drenagem urbana

Um sistema de drenagem tem como principal objetivo conduzir água contaminada para fim adequado de forma a evitar riscos para a saúde pública e danos para propriedades e pessoas (Patrick Willems et al., 2012). Os sistemas de drenagem tornaram-se indispensáveis assim que o Homem tentou controlar o ambiente que o rodeava. Algumas evidências arqueológicas mostram que os edifícios de antigas civilizações, como as Mesopotâmica, Grega, Romana e a Minoica, apresentavam sistemas de drenagem rudimentares (Butler e Davies, 2011). As atividades humanas têm um grande impacto no ciclo natural da água e por isso torna-se imprescindível implementar sistemas de drenagem, principalmente em grandes áreas urbanas (Butler e Davies, 2011).

Dependendo da forma como o caudal, que aflui a um sistema de drenagem, é encaminhado para o seu destino final, pode classificar-se como natural um sistema que escoe por gravidade segundo a pendente do terreno e que naturalmente se encaminhe para uma ribeira, riacho ou para um rio. Em oposição, um sistema em que o caudal é conduzido por uma rede de tubagens e acessórios designa-se por sistema de coletores. Estes podem subdividir-se em unitários, separativos e mistos. Um sistema de drenagem unitário ou combinado é aquele que admite numa única rede águas residuais domésticas e águas pluviais. Por outro lado, os separativos possuem duas redes coletoras distintas, uma destinada a águas residuais domésticas e industriais e outra destinada a recolher apenas águas pluviais. Em casos específicos os dois tipos de sistemas anteriores podem coexistir no mesmo contexto urbano sendo designado por sistema misto. Um exemplo são as cidades com centros históricos que possuem sistemas unitários na parte histórica e sistemas separativos na periferia dessa zona.

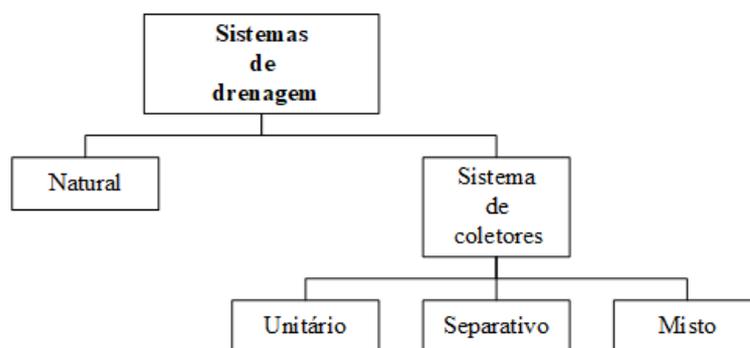


Figura 2.1-Classificação de sistemas de drenagem.

2.1.1 Efeitos da urbanização e alterações climáticas nos sistemas de drenagem

A maior disponibilidade de serviços de saúde, emprego e maior atividade económica conferem às áreas urbanas características atrativas para as populações. Em 2016, 75% da população europeia (EU 28) vivia em zonas urbanas (Eurostat, 2018). Portugal segue esta tendência europeia apesar de apresentar números mais baixos (Figura 2.2). Em todo o mundo a população que vive em zonas urbanas é de aproximadamente 56% e até ao ano de 2030 é estimado que 60% da população mundial viverá em zonas urbanas sendo, que um terço viverá em cidades com mais de um milhão de habitantes (United Nations, 2016). O aumento da urbanização traduz-se consequentemente num aumento da produção de águas residuais domésticas (Butler e Davies, 2011). Por outro lado o aumento da construção de edifícios, infraestruturas e vias de comunicação, como consequência do crescimento populacional em áreas urbanas, fará necessariamente aumentar a substituição do coberto natural por zonas impermeáveis (Markovic et al., 2014). A impermeabilização do terreno resulta numa diminuição da infiltração que causa um aumento do volume e velocidade do escoamento superficial o que provoca um pico de cheia mais pronunciado e que acontece mais cedo (Figura 2.3). Em adição a esta problemática, tem vindo a verificar-se uma alteração dos padrões de precipitação que se traduz num aumento significativo de chuvadas de grande intensidade resultantes das alterações climáticas (Willems et al., 2012a). Semadeni-Davies et al. (2008) afirmam que o extravasamento dos coletores das redes de drenagem está intimamente ligado ao rápido aumento da urbanização e ao aquecimento global que, em muitos casos, provoca inundações.

Os resultados do quinto relatório do IPCC mostram que as chuvadas de grande intensidade, com maior frequência, causam sobrecarga dos coletores, inundação dos sistemas de drenagem pluvial e extravasamento de sistemas unitários. Este efeito pode ser explicado pelo facto dos sistemas de drenagem urbana, ao longo de décadas, terem sido dimensionados sem ter em conta eventos extremos de precipitação como os que se verificam hoje em dia e assim tornam-se um fator contributivo para a ocorrência de cheias (Patrick Willems et al., 2012).

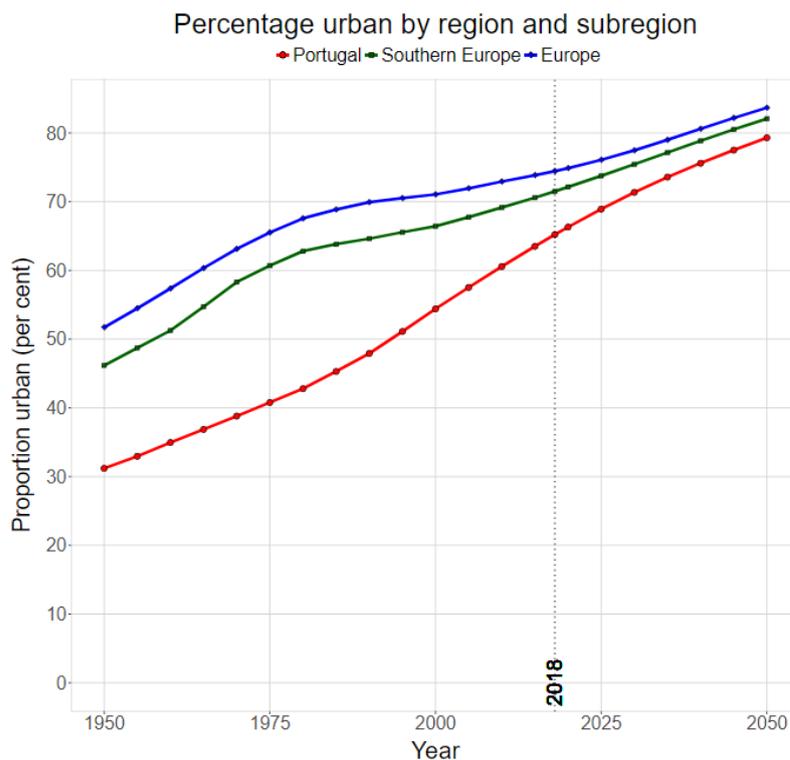


Figura 2.2-Percentagem de população que vive em zonas urbanas em Portugal, Europa e sul da Europa (United Nations 2018).

A crescente urbanização e maior frequência de chuvadas de grande intensidade contribuem para um aumento de inundações urbanas que podem causar destruição de infraestruturas, contaminação de água e aumento de doenças relacionadas com a água (Shepherd et al., 2011; Lane et al., 2013; Wahl et al., 2015). É expectável que nas próximas décadas a ocorrência de inundações urbanas se torne mais frequente uma vez que os efeitos que lhe dão origem também seguem uma tendência crescente.

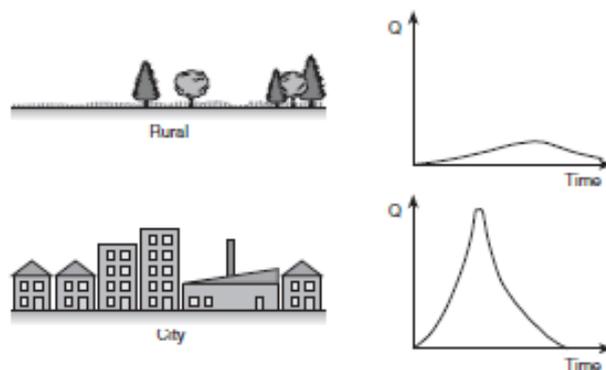


Figura 2.3- Efeito da urbanização no caudal de ponta(Adaptado de: Butler e Davies 2011).

2.2 Modelos de simulação

Na década de 60, com o advento dos computadores, a revolução digital permitiu revolucionar a simulação numérica e estatística. Nas décadas seguintes foram desenvolvidos modelos matemáticos e os modelos físicos foram alvo de um grande crescimento, por exemplo a conceção do *Storm Water Management Model* (SWMM) (@EPA).

Em modelação, um modelo hidrológico permite simular processos naturais de fluxos de água, sedimentos, poluentes, numa determinada zona ou bacia hidrológica e, permite ainda, quantificar o impacto da atividade antropogénica nesses processos (Singh e Frevert, 2006). Os modelos podem ser úteis visto que podem simular efeitos prováveis da tomada de diferentes medidas estruturais, podem ser usados para simular diferentes cenários e comparar diferentes opções em fase de dimensionamento (eWater, 2013).

2.2.1 Classificação dos modelos

De acordo com Refsgaard (1996) um modelo hidrológico, na ótica de utilizador, é composto por duas componentes principais, uma hidrológica e uma tecnológica. A componente hidrológica de um modelo assenta em princípios e leis físicas para a definição de variáveis, descrições de processos e outros aspetos relevantes para o modelo. Enquanto que a parte tecnológica do modelo, diz respeito à programação e à interface do utilizador. Os diversos modelos existentes podem ser classificados quanto a estas duas componentes.

A classificação apresentada neste trabalho diz respeito a uma classificação de acordo com a descrição do processo hidrológico, mas classificações que têm em conta o nível tecnológico podem ser encontradas em Refsgaard (1996) ou mais recente em (Price e Vojinovic, 2011).

Refsgaard (1996) expõe definições importantes a cerca de modelação hidrológica e uma proposta de classificação de modelos. Wurbs (1998) enumera diferentes modelos que estão relacionados com os recursos hídricos, realça a sua disponibilidade, o seu papel na simulação e além disso apresenta uma análise à disseminação dos modelos a instituições de gestão de água. Singh e Frevert (2006), no capítulo introdutório do livro, apresentam um apanhado de aplicações, desenvolvimentos e tecnologias de modelos hidrológicos. Existem, na literatura, diversos modos de classificar modelos, neste trabalho optou-se por se seguir a classificação feita por Refsgaard (1996), representada na Figura 2.4, por se tratar de uma classificação bem aceite no seio da comunidade científica.

Os modelos podem começar por ser classificados de uma maneira clássica em estocásticos e determinísticos. Um modelo estocástico tem pelo menos uma componente aleatória, não explícita no modelo e por isso conjuntos de dados e parâmetros de entrada idênticos darão resultados diferentes. Em modelação determinística usando o mesmo conjunto de dados e parâmetros de entrada iremos obter sempre os mesmos *outputs*, uma vez que não é incluída qualquer componente aleatória. Os modelos determinísticos podem ser classificados como distribuídos nos quais o modelo tem em conta as variações de variáveis e parâmetros no espaço. Por outro lado, um modelo determinístico agregado considera a área de estudo na sua totalidade e as variáveis e parâmetros são representados por valores médios.

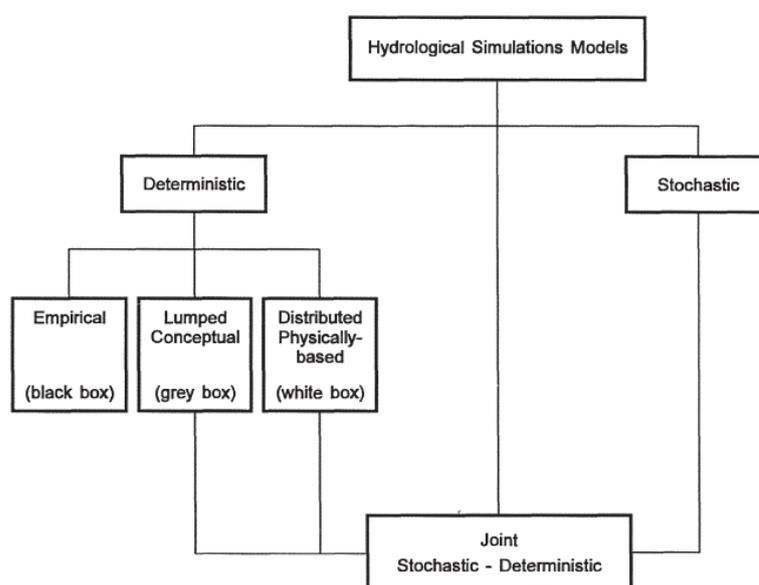


Figura 2.4-Classificação de modelos hidrológicos (Fonte: Refsgaard, 1996).

Tendo em conta uma representação dos processos hidrológicos, um modelo determinístico pode ser classificado em empírico, concetual ou físico. Um modelo empírico, ou *black box*, é uma mera calibração entre dados de entrada e de saída sem nenhuma consideração ou descrição de processos físicos do tipo:

$$Y = aX^b \quad (1)$$

em que a e b são parâmetros de calibração entre dados de entrada (X) e de saída (Y). Em hidrologia o modelo empírico mais conhecido é o do hidrograma unitário e os modelos que aplicam o hidrograma unitário (Refsgaard, 1996). Um modelo físico, usa representações matemáticas, como as de fluxo de massa, quantidade de movimento e energia, para representar os processos físicos que ocorrem na zona de estudo. Um modelo concetual é uma junção dos dois modelos anteriores, isto é, usa uma representação dos processos físicos, como a interceção,

infiltração, evaporação, escoamento superficial, etc., no entanto estes processos são descritos com recurso a calibração dos dados de entrada e de saída.

Os modelos conceituais podem ainda ser classificados como agregados, designando-se por modelos *grey box*, e são utilizados principalmente em modelação precipitação-escoamento. Este tipo de modelos são adequados para simular processos de transformação de precipitação em escoamento quando existe uma série de dados suficientemente longa que permita calibrar o modelo (Refsgaard, 1996). Na prática os modelos físicos são também distribuídos e assim são designados de modelos *white box*. Este tipo de modelo usa as equações de continuidade para calcular os fluxos de água e energia. Podem ser usadas as equações de Saint Venant para o escoamento superficial, as de Richard para o fluxo da zona insaturada e as de Boussinesq para o fluxo de água subterrâneo (Refsgaard, 1996). Os modelos fisicamente baseados representam de forma detalhada (Figura 2.5), e possivelmente mais correta, os processos hidrológicos e permitem usar quase toda a informação disponível sobre a bacia modelada (Refsgaard, 1996). Estes modelos podem, em teoria, ser aplicados a todos os tipos de problemas hidrológicos.

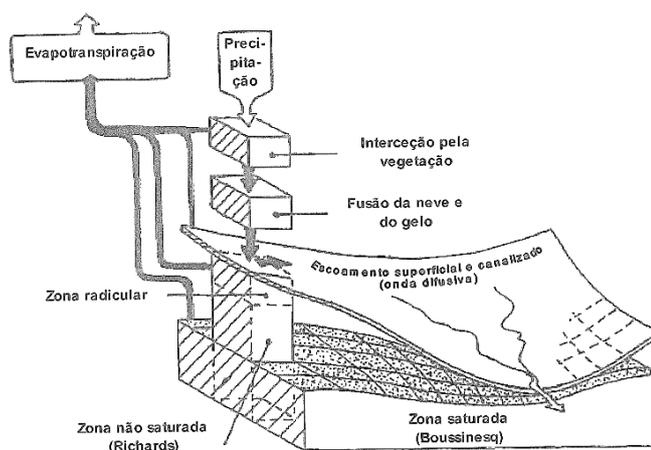


Figura 2.5-Modelo fisicamente baseado distribuído, MIKE SHE (Fonte: Hipólito e Vaz, 2013).

A maior parte dos processos hidrológicos podem ser representados por modelos de simulação determinísticos. Contudo todos os dados e variáveis de entrada podem ser incompletos ou têm associado um grau de incerteza. Por estas razões foram desenvolvidos modelos híbridos que têm uma parte determinística e outra estocástica.

2.3 Modelação de sistemas de drenagem

Como discutido anteriormente a modelação de qualquer sistema resulta sempre numa aproximação da realidade. Os modelos de simulação são usados para testar a resposta de um sistema de drenagem a diferentes condições, quer na fase de dimensionamento, quer na análise

de sistemas já existentes. O modelador, na fase de dimensionamento de um sistema de drenagem avalia a conformidade do sistema de drenagem com os requisitos impostos por lei. Na análise de sistemas já existentes o objetivo é apurar como o sistema reage a diferentes situações (Marques et al., 2013). O comportamento observado dos fluxos de água no sistema hidrográfico pode ser descrito em função do tempo e espaço e representada por equações matemáticas baseadas em princípios e leis como a conservação da massa e quantidade de movimento. Estes princípios e leis são aceites e confirmados por observações (Clemens, 2001).

Os modelos de drenagem urbana são compostos por duas componentes, a hidrológica e a componente hidráulica (Figura 2.6). A componente hidrológica compreende todos os processos associados à geração de escoamento superficial a partir de determinada quantidade de precipitação. Parte da precipitação que cai sobre uma bacia é retida em depressões, infiltra no terreno, é interceptada pela vegetação, evapora e o excedente escorre através do terreno. A quantidade de chuva que é interceptada pela vegetação e retida pelas depressões do terreno é denominada por perdas iniciais e têm algum significado no começo da chuvada. Em oposição as perdas contínuas ocorrem durante todo o período de precipitação e mesmo até quando esta cessa. São designados de perdas contínuas os processos de infiltração e evaporação (Butler e Davies, 2011). No contexto de chuvadas de grande intensidade e curta duração os efeitos das perdas iniciais e da evaporação podem ser considerados desprezáveis.

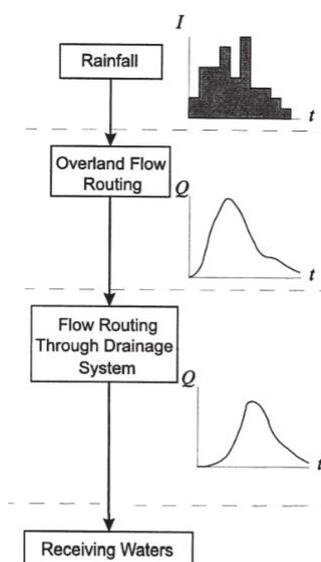


Figura 2.6-Representação das componentes hidrológica e hidráulica de um modelo de drenagem pluvial (Adaptada de: Zoppou, 2001).

Quando a precipitação ocorre sobre solo permeável alguma dessa precipitação infiltra devido às forças gravitacional e de capilaridade (Methods e Durrans, 2007). A velocidade e quantidade de água que infiltra depende do tipo de cobertura, compactação e humidade do solo (Butler e

Davies, 2011). Existe, na literatura, uma grande quantidade de equações para descrever o processo de infiltração. Numa abordagem empírica, surge a equação de Kostiakov em 1932, a equação de Horton em 1939 ambas baseadas em observações no terreno e em 1961 a de Holtan baseada no conceito de reservatório linear. As equações de Smith e Parlange, Philip e Green-Ampt descrevem o processo físico de infiltração através de leis físicas conhecidas. A equação de Green-Ampt é um método baseado na aplicação teórica da lei de Darcy e da conservação da massa (Methods e Durrans 2007). O método mais usado para representar a capacidade de infiltração é a equação de Horton:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k(t-t_0)} \quad (2)$$

em que $f(t)$ (mm/h) representa a capacidade de infiltração, f_c (mm/h) a taxa de infiltração quando o solo está saturado, f_0 (mm/h) a taxa de infiltração no tempo inicial e k (min^{-1} ou h^{-1}) o coeficiente de decaimento que depende das características do solo e da vegetação existente.

A partir do momento em que a quantidade de chuva, que cai sobre uma bacia, é maior que a quantidade que é perdida por infiltração, retida por depressões e a que evapora, começa a ocorrer escoamento superficial. O caudal que, depois de todos os processos de infiltração, evaporação e retenção superficial, escoam para a rede de drenagem designa-se de escoamento direto ou por precipitação útil (Lencastre e Franco, 1992). A Figura 2.7 representa os processos envolvidos na geração de escoamento superficial e a forma como este aflui à rede de drenagem.

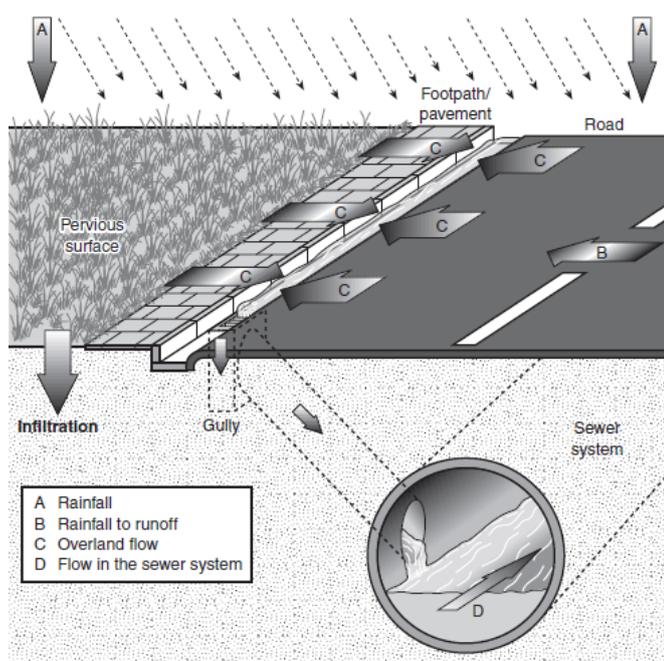


Figura 2.7-Representação dos processos envolvidos na geração de escoamento superficial (Fonte: Butler and Davies 2011).

No caso de chuvadas de curta duração e de grande intensidade, o escoamento superficial pode ser representado por $R = (i - f)$, em que i (mm/h) representa a intensidade de precipitação e f (mm/h) a taxa de infiltração (Chow, Maidment, e Mays 1988).

Nos primórdios do estudo dos processos de precipitação-escoamento, o engenheiro Thomas Mulvaney publica, em 1851, uma equação que previa o caudal de ponta de uma chuvada numa determinada bacia (Beven 2012). Esta equação ficou conhecida como Método Racional e é representada pela equação 3:

$$Q_p = CiA \quad (3)$$

em que Q_p representa o caudal de ponta, C o coeficiente de escoamento (dependente das características da bacia hidrográfica), i a intensidade de precipitação no tempo de concentração e A a área da bacia. Este método, apesar de ser expedito, pode ser considerado como a primeira geração de modelos hidrológicos em que o caudal de ponta é a variável de saída, a intensidade de precipitação e a área da bacia são as variáveis de entrada e o coeficiente C um parâmetro do modelo (Xu, 2002).

A forma de representar o escoamento superficial depende da disponibilidade de dados (Xu, 2002). Pode-se representar de forma empírica, com métodos como o do hidrograma unitário ou do tempo-área, de uma forma fisicamente baseada pelo modelo da onda cinética e de forma concetual através de métodos como o do reservatório linear (Butler e Davies 2011). O conceito de reservatório linear foi inicialmente aplicado a processos de transformação de precipitação em escoamento por Richmond Zoch em 1934 (Chow, Maidment, e Mays 1988). O conceito de reservatório linear preconiza que a resposta de uma bacia a um determinado perfil de precipitação se assemelha à resposta de um reservatório ou mais reservatórios ligados em série (Figura 2.7) (Butler e Davies 2011). A cada reservatório afluem caudais resultantes de precipitação, de reservatórios a montante, e vazam caudais de escoamento superficial. O armazenamento do reservatório é expresso pela equação:

$$S = KQ \quad (4)$$

em que S representa a capacidade de armazenamento do reservatório (m^3), K o coeficiente de armazenamento (seg.) e Q o fluxo de saída (m^3/s) (Chow, Maidment, e Mays 1988). Assim, a variação do armazenamento do reservatório pode ser expressa pela equação 5:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (5)$$

em que a $I(t)$ representa o caudal afluyente ao reservatório (m^3/s). E para reservatórios em série Nash propôs a equação:

$$q_n(t) = \frac{1}{K(n-1)!} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{K}} \quad (6)$$

em que q_n é o caudal de saída do reservatório de ordem n (m^3/s) (Chow, Maidment, e Mays 1988).

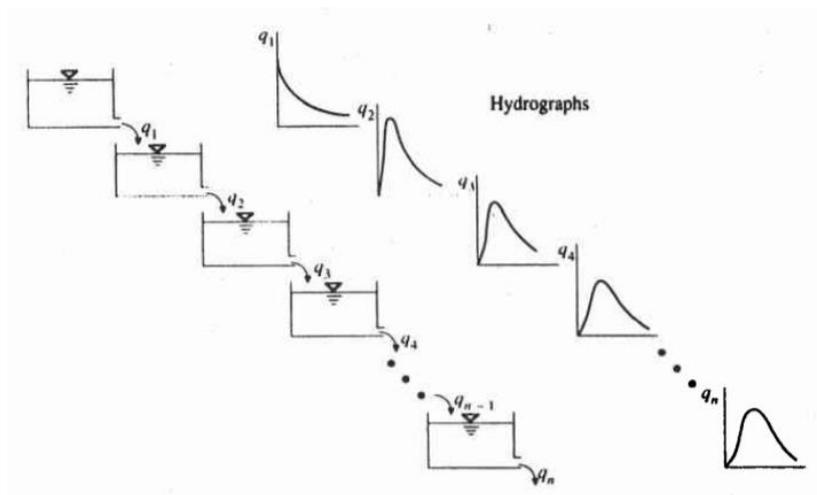


Figura 2.8-Reservatórios lineares em série (Fonte: Chow et al. 1988).

As equações de Saint-Venant são as equações mais usadas para descrever o comportamento do escoamento com superfície livre (Marques et al., 2013). Estas equações são uma simplificação das equações de Navier-Stokes e permitem representar o caudal e o nível de água como função do tempo e espaço (Chow et al. 1988). Estas simplificações decorrem do facto que em escoamento com superfície livre a componente vertical do escoamento superficial é muito menor que a dimensão horizontal (Simões, 2012). As equações de Saint-Venant podem ser reescritas na forma conservativa do seguinte modo:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_o - S_f) \quad (8)$$

em que A representa a área molhada, Q o caudal, t o tempo, x a direcção longitudinal, h a altura de água, g a aceleração da gravidade, S_o o declive do canal e S_f a função de atrito.

2.4 Softwares de simulação de drenagem pluvial

O primeiro software de simulação dinâmica de sistemas de drenagem pluvial desenvolvido, em 1971, foi o *Storm Water Management Model* (SWMM) e desde então tem sofrido várias evoluções (Marques et al. 2013). Este *software*, de livre acesso, é um dos mais usados na modelação de sistemas de drenagem urbana. Atualmente permite estudar o impacto dos sistemas de drenagem sustentáveis (@EPA).

Desenvolvido na Dinamarca pela DHI há 25 anos, o MIKE é um software que pode ser usado em diversas aplicações, destacando-se a simulação de sistemas de drenagem pluvial utilizando modelos unidimensionais e bidimensionais (@DHI).

Outros exemplos de softwares de simulação são o InforWorks CS comercializado pela InnoViz, o HEC-HMS produzido pelo *US Army Corps of Engineers*, o SOBEK desenvolvido por um conjunto de institutos de investigação, universidades e institutos públicos Holandeses e o LISFLOOD-FP criado pela Universidade de Bristol.

2.5 Inputs dos modelos de simulação de drenagem

A recolha de dados de entrada dos modelos de simulação de sistemas de drenagem é uma tarefa fundamental consumidora de tempo e dinheiro e passível de introduzir erros e desvios significativos no modelo a ser construído. Os modelos de simulação de sistemas de drenagem urbana carecem de dados de entrada como por exemplo o cadastro da rede de drenagem, modelos digitais do terreno, dados meteorológicos e dados populacionais.

2.5.1 Cadastro do sistema de drenagem

O cadastro do sistema de drenagem deve contemplar elementos como a rede de coletores e órgãos acessórios (dispositivos de entrada e câmaras de visita). Devem ser recolhidos dados referentes às caixas de visita como a sua posição, geometria, cota de soleira e a cota do terreno. No caso das condutas devem ser recolhidos dados em relação à geometria, material e às cotas de interceção com as caixas de visita. A Figura 2.9 mostra os dados necessários para construir um modelo de uma rede de drenagem já existente.

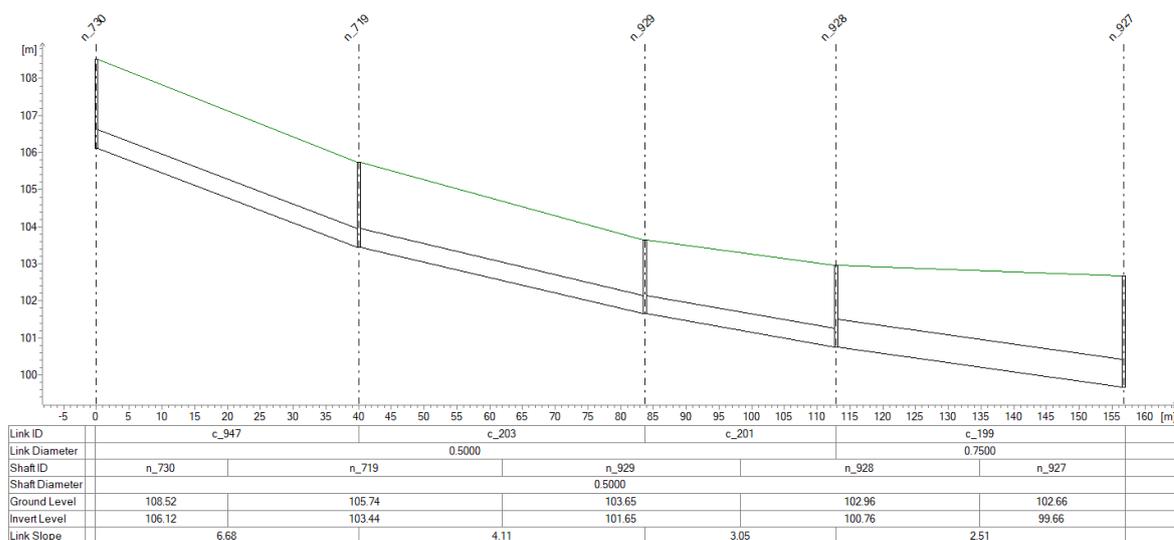


Figura 2.9- Perfil longitudinal de uma conduta e caixas de visita (produzida no MIKE URBAN).

2.5.2 Dados de meteorológicos

Os dados meteorológicos tipicamente recolhidos são a temperatura, precipitação, evapotranspiração, humidade e velocidade do vento. Na simulação de sistemas de drenagem urbana a precipitação é um dado importante e pode ser medido diariamente, podendo também ser obtido a escalas temporais com maior resolução. Estes dados podem ser altamente variáveis no tempo e espaço (Price e Vojinovic, 2011). A recolha deste tipo de dados é executada de forma direta por pluviómetros e de forma indireta por radar ou satélites. Os dados obtidos por pluviómetros necessitam de ser interpolados de forma a obter uma representação espacial da precipitação. A interpolação pode ser feita usando o método dos polígonos de Thiessen, IDW (*Inverse Distance Weighted*) e Kriging (Price e Vojinovic, 2011). Os dados obtidos por pluviómetros podem não representar bem os máximos e mínimos de precipitação (Singh 2017). A desvantagem da medição por pluviómetros pode ser ultrapassada usando dados obtidos por radar. O radar fornece dados sobre todos os pontos da zona com elevada resolução espacial e temporal. Apesar da maior resolução, os feixes eletromagnéticos do radar podem sofrer interferências devido a condições atmosféricas como tempestades, montanhas e edifícios (Price e Vojinovic 2011).

2.5.3 Modelos digitais do terreno

O aparecimento de modelos hidrológicos mais complexos permite conhecer, de forma distribuída, as características como a direção e velocidade do fluxo superficial de água (Moore, Grayson, e Ladson; 1991). A topografia do terreno influencia em grande parte as características do fluxo superficial de água. Torna-se então necessário conhecer de forma precisa a topografia do terreno. Os modelos digitais do terreno podem representar com grande resolução as

propriedades do terreno. Estes modelos permitem uma análise, em computador, das três dimensões que de outra forma requeriam grande capacidade de análise humana (Maune, 2001).

Um modelo digital do terreno (MDT) é um mapa topográfico digital que representa a superfície terrestre a três dimensões, ou seja, representa a elevação do terreno excluindo as estruturas construídas pelo homem e vegetação (Price e Vojinovic 2011). Como demonstra a Figura 2.10, um modelo que represente a elevação de todas as superfícies refletivas como edifícios e vegetação é definido como modelo digital de superfície (MDS) (Maune 2001).

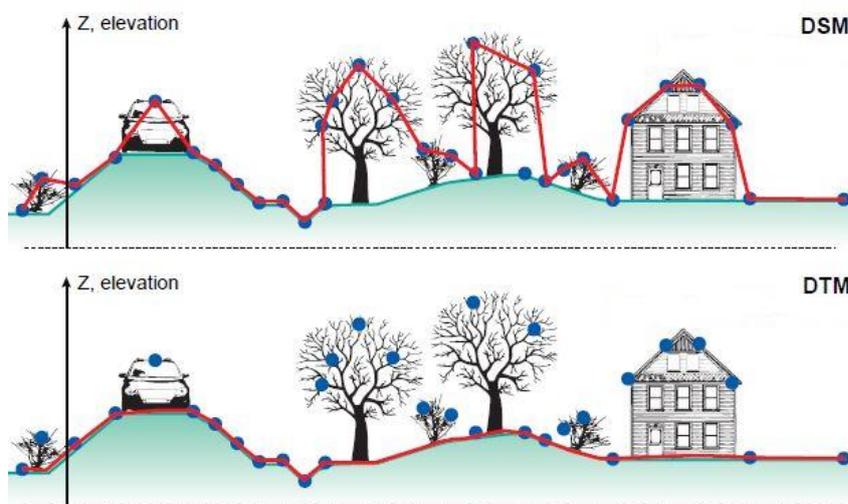


Figura 2.10- Diferenças entre MDS e MDT (Fonte: ACP-EU, 2014).

Os MDT podem ser representados por estruturas diferentes: modelo de contornos ou de isolinhas (Figura 2.11 a), malha quadrada de elevação ou *raster* (Figura 2.11 b) e rede triangular irregular ou TIN (*Triangular Irregular Network*) (Figura 2.12). Um modelo de contorno descreve as elevações do terreno através de curvas de nível. Um *raster* é um MDT formado por uma rede quadrada de igual espaçamento. Uma rede triangular irregular é uma representação do terreno por vetores resultantes da ligação de pontos irregularmente distribuídos, representados por coordenadas cartesianas (Price e Vojinovic, 2011).

Um MDT do tipo *raster* e TIN pode ser obtido a partir de modelos de contornos digitais através de interpolação. Esta metodologia pode levar a erros significativos, especialmente se o terreno for plano e por isso existirem poucas curvas de nível (Beven, 2012). A interpolação é um processo que consiste em estimar um uma série de dados contínuos a partir de uma amostra de dados conhecidos descontínuos. Os métodos de interpolação de dados de elevação do terreno mais usados são: spline, vizinho próximo, kriging e IDW (Maune, 2001). O quadro 2.1

apresenta diferentes tipos de MDT, com diferentes formatos e resolução, disponíveis de acesso livre.

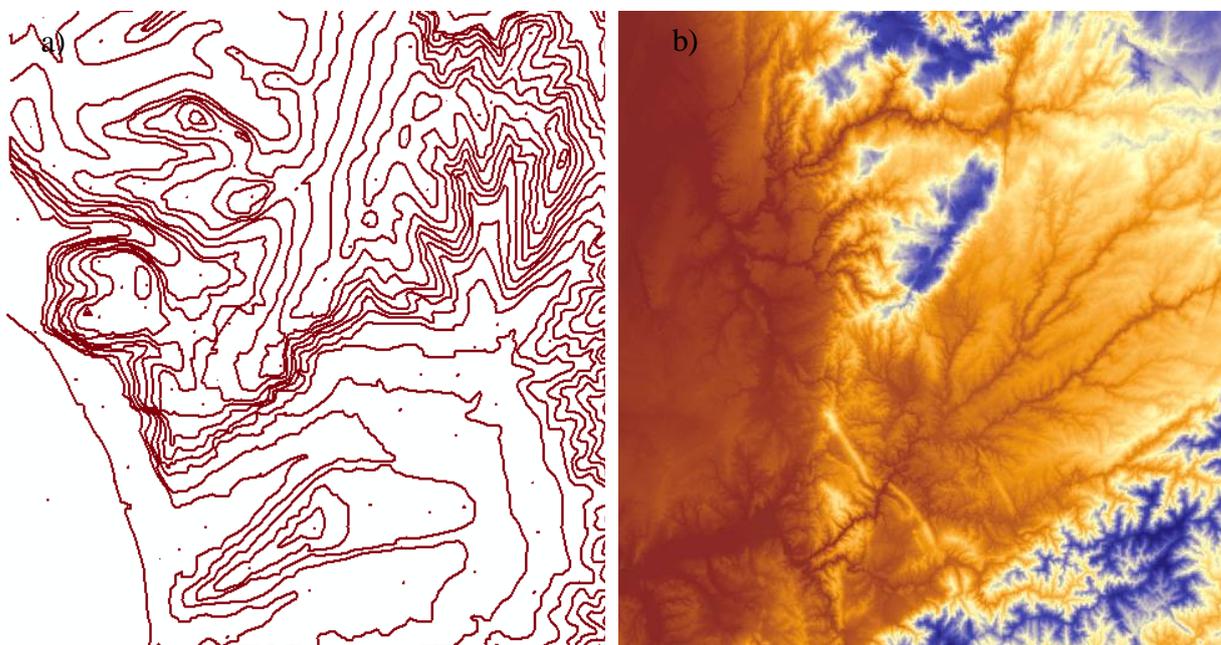


Figura 2.11-a) Representação de um mapa de contornos; b) Representação de um *raster*.

Quadro 2.1 – MDT disponíveis de acesso livre (Adaptado de: Singh, 2017).

Modelos de elevação	Cobertura	Formato	Resolução Linear(m)
National Elevation Dataset (NED)	EUA	Raster	3, 10, 30, 60
Shuttle Radar Topography Mission (STRM)	Global	Raster	30, 90
ASTER Global DEM (GDEMv2)	Global	Raster	30
EU-DEM	Europa	Raster	25
Lidar (3DEP)	EUA	Vector	< 1

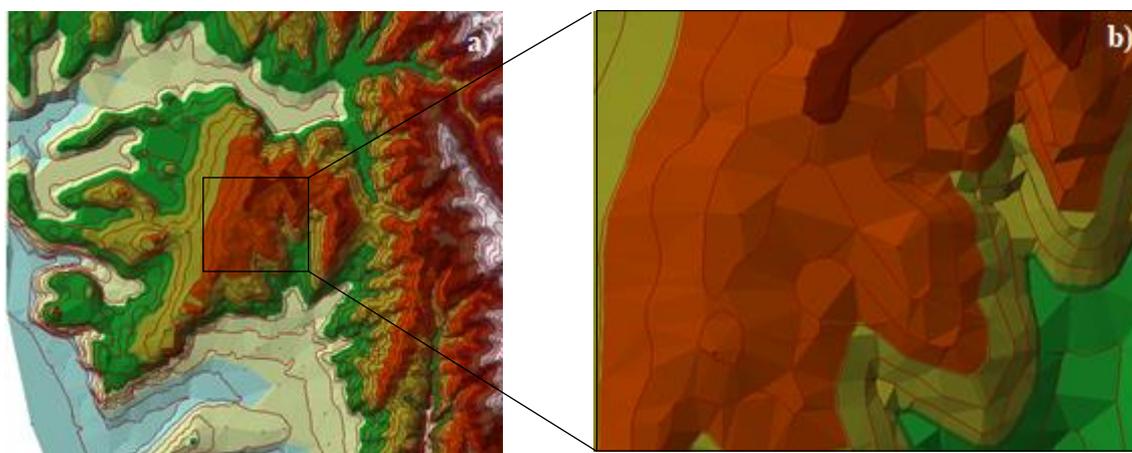


Figura 2.12-a) Representação de uma rede triangular irregular; b) Pormenor da rede triangular irregular.

2.6 Técnicas de recolha de modelos digitais do terreno

Existem três tipos de técnicas de recolha de modelos digitais do terreno: a digitalização de mapas topográficos existentes, levantamento topográfico e deteção remota. Apesar de obsoleta, a digitalização de mapas topográficos existentes, durante muito tempo foi a principal fonte de produção de MDT. Esta técnica consiste na transformação de curvas de nível, pontos cotados, rios e lagos em formato digital usando um digitalizador automático ou manual (Hengel; e Reuter 2009). A técnica de levantamento topográfico tem como principal objetivo localizar horizontal e verticalmente pontos através de medições de distâncias e ângulos usando estações totais e teodolitos (Li, Zhu, e Gold 2005). Com uma nova geração de aparelhos de medição, como o teodolito eletrónico, e associado à modelação computacional esta técnica representa de muito forma precisa as características do terreno (Li, Zhu, e Gold 2005). Estes métodos têm associados vantagens e desvantagens, p.e. o levantamento topográfico tem uma precisão elevada, mas velocidade de aquisição e custo muito elevado. Para a digitalização de mapas topográficos existentes a precisão e velocidade de aquisição são baixas, mas os eu custo também é baixo (Figura 2.13). Assim para aplicações em que a disponibilidade financeira não permita usar MDT gerados por métodos dispendiosos ou os dados não necessitem de ser muito precisos estes métodos de recolha podem ser utilizados.

A deteção remota é uma técnica que tira partido da interação que se estabelece entre a energia eletromagnética e determinado objeto (Price e Vojinovic, 2011). As imagens recolhidas por estes métodos tanto podem ser fornecidas por um satélite ou podem decorrer do sobrevoo da área em estudo por aviões. As técnicas de deteção remota são provenientes de fotografia aérea, LiDAR, e RADAR (Hengel; e Reuter 2009). A fotografia aérea é uma técnica usada há várias décadas que tem sido aprimorada. Fotografias aéreas são imagens de alta resolução e definição (a preto e branco, a cores ou a infravermelho) que usam pontos de controlo à superfície de maneira a serem georreferenciadas e, por conseguinte, representar a elevação da superfície terrestre por mapas denominados ortofotomapas. Um ortofotomapa resulta da sobreposição (geralmente 60% de sobreposição) de duas imagens, designadas de estéreo par, do mesmo local tiradas de sítios ligeiramente diferentes (Li, Zhu, e Gold 2005). Os modelos digitais obtidos por esta técnica tendem a sobrestimar os valores de elevação devido à distorção causada pelo aparelho de captação das imagens (Hengel; e Reuter 2009). Esta técnica produz modelos digitais de superfície, uma vez que as fotografias tiradas incluem vegetação e edifícios.

As imagens de LiDAR (*Light Detection and Ranging*) apareceram pela primeira vez no início da década de 90 (Hengel; e Reuter 2009). O LiDAR é um sensor que emite um pulso eletromagnético (laser no espectro do infravermelho próximo) na direção da superfície terrestre e mede o tempo que esta demora a chegar novamente ao sensor e o ângulo com que chega. A partir das informações recolhidas pelo sensor é calculada a distância a que a aeronave se

encontra do objeto que refletiu o laser (Li, Zhu, e Gold 2005). O sensor do LiDAR recolhe entre 5000 e 100000 pontos por segundo. As imagens de LiDAR têm uma resolução horizontal de 0,5 a 5 metros e precisão vertical de 0,3 a 0,15 metros(Price e Vojinovic 2011). As principais vantagens do LiDAR são a sua grande precisão vertical, grande velocidade de produção e a cobertura de grandes áreas.

Acquisition Method	Accuracy of Data	Speed	Cost	Application Domain
Traditional surveying	High (cm-m)	Very slow	Very high	Small areas
GPS survey	Relatively high (cm-m)	Slow	Relatively high	Small areas
Photogrammetry	Medium to high (cm-m)	Fast	Relatively low	Medium to large areas
Space photogrammetry	Low to medium (m)	Very fast	Low	Large areas
InSAR	Low (m)	Very fast	Low	Large areas
Radargrammetry	Very low (10 m)	Very fast	Low	Large areas
LIDAR	High (cm)	Fast	High	Medium to large areas
Map digitization	Relatively low (m)	Slow	High	Any area size
Map scanning	Relatively low (m)	Fast	Low	Any area size

Figura 2.13- Comparação dos diferentes métodos de aquisição de MDT(Fonte: Li et al. 2005).

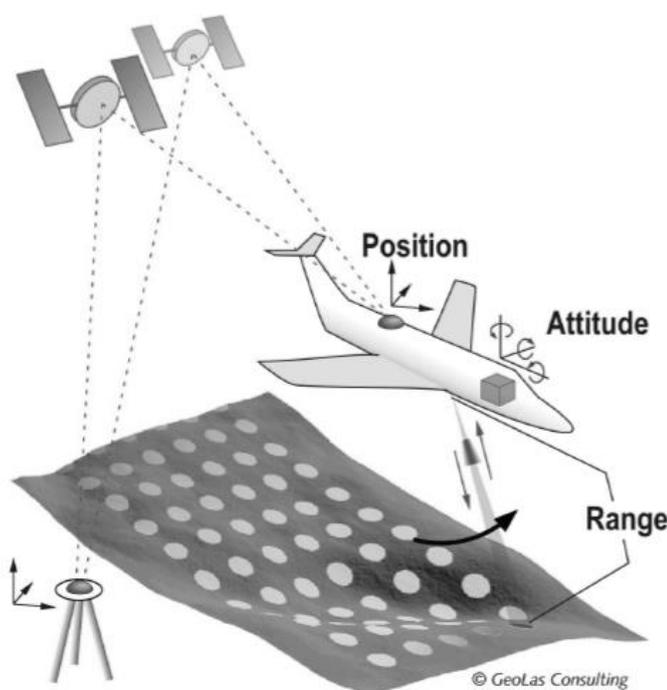


Figura 2.14- Representação da técnica utilizada na recolha de imagens de LiDAR (Fonte: Li et al. 2005).

3 METODOLOGIA

O capítulo terceiro descreve a metodologia utilizada na simulação de sistemas de drenagem em meio urbano na zona central de Coimbra. Este capítulo começa por uma breve introdução, seguido por uma caracterização da zona de estudo. No terceiro subcapítulo são apresentadas as características dos dados usados na simulação e a forma como foram obtidos. O último subcapítulo apresenta as etapas de preparação do modelo para a realização da simulação numérica do sistema de drenagem pluvial. A metodologia apresentada neste trabalho divide-se em três partes: a primeira, denominada de fase preliminar, que consiste no tratamento dos dados de forma a possibilitar a realização das simulações subsequentes. Na segunda parte é descrito o procedimento usado na simulação a uma dimensão(1D), enquanto que na terceira é apresentada a metodologia empregue na realização das simulações de drenagem dual 1D/2D.

3.1 Caracterização da zona de estudo

A zona de estudo insere-se na cidade de Coimbra mais concretamente na parte central da União de freguesias de Coimbra (Sé Nova, Santa Cruz, Almedina e São Bartolomeu) que segundo os censos de 2011 engloba uma população superior a 17 mil habitantes. Esta zona caracteriza-se pela concentração de serviços, comércio, zonas turísticas, históricas e de habitação. A área de estudo localiza-se na parte superior da bacia urbana denominada como zona central de Coimbra, a zona de estudo ocupa aproximadamente 40ha e situa-se em contexto urbano composto maioritariamente por zonas com grande impermeabilização (edifícios e vias de comunicação) caracterizadas por declives acentuados. A zona de estudo é limitada a sul pela Avenida Dr. Marnoco e Sousa, a sudoeste pelo Jardim Botânico, nas direções sudeste, este, e nordeste pela Avenida Dr. Dias da Silva, confronta com o Pólo I da Universidade de Coimbra, a Praça da República e a Escola Secundária José Falcão. A zona de estudo engloba edifícios como o Quartel-General da Brigada de Intervenção, o Estabelecimento Prisional e a Casa Museu Bissaya Barreto. A Figura 3.1 representa a localização da zona de estudo que é delimitada pela linha contínua a preto.



Figura 3.1-Localização da zona de estudo.

3.2 Dados

O modelo da rede de drenagem representado no programa MIKE URBAN, tem por base dados fornecidos pelas Águas de Coimbra, nomeadamente as cotas e geometria das caixas de visita e as cotas, geometria e material das condutas. A rede de drenagem é maioritariamente composta por um sistema unitário e é constituída por 162 caixas de visita e por 149 condutas que perfazem uma extensão de 6.7 km. Importa referir que o modelo usado se encontra calibrado com parâmetros de referência encontrados na bibliografia da especialidade. A rede de drenagem descrita está representada na Figura 3.2- Configuração da rede de drenagem e respetivas sub-bacias. .

Os dados de elevação do terreno utilizados apresentam diferentes resoluções. Foram usados dados de levantamento topográfico de Coimbra à escala 1:10000, 1:1000 e uma imagem de LIDAR com resolução espacial horizontal de 1m.

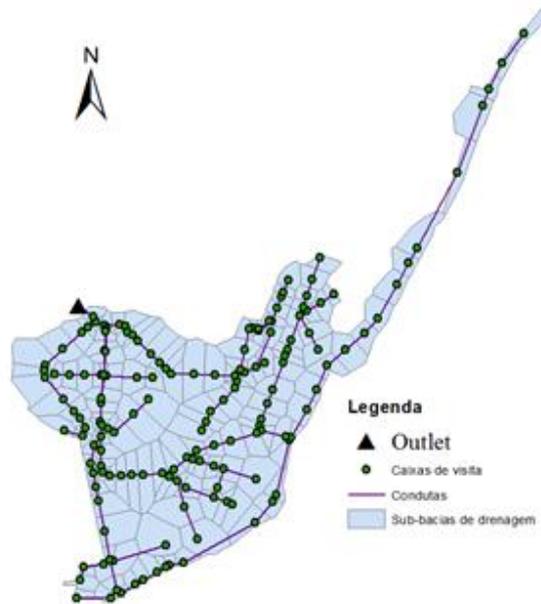


Figura 3.2- Configuração da rede de drenagem e respetivas sub-bacias.

No que diz respeito aos dados de precipitação foram usadas chuvadas de projeto produzidas com base nas curvas IDF. As chuvadas de projeto foram calculadas pelo método dos blocos alternados para chuvadas frontais e têm uma duração de 45 minutos (Figura 3.3). As chuvadas de projeto empregues têm como objetivo simular diferentes tipos de situações a que a rede de drenagem pode ser submetida. A chuvada com tempo de recorrência de dois anos pretende representar uma situação de precipitação frequente em que, possivelmente, o sistema de drenagem não sofrerá sobrecarga. Numa situação mais extrema, utiliza-se uma chuvada com período de recorrência de cem anos para testar a rede de drenagem numa situação de grande sobrecarga e identificar os pontos mais críticos da rede. Num caso intermédio é usada, também, uma chuvada com vinte anos de período de recorrência.

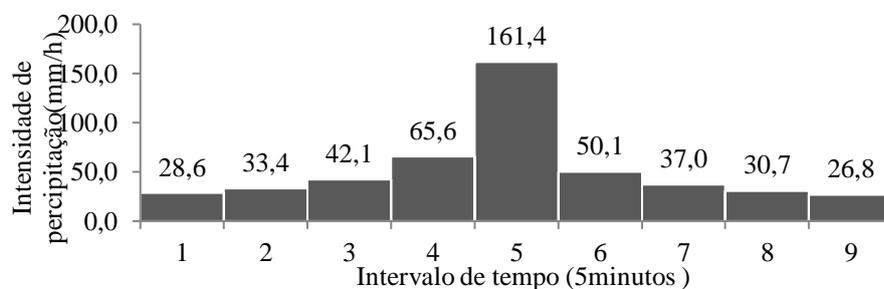


Figura 3.3-Chuvada de projeto com tempo de recorrência de 100 anos.

3.3 Simulação computacional

A simulação computacional do sistema de drenagem divide-se em três fases:

- Fase preliminar;
- Simulação a uma dimensão;
- Simulação de drenagem dual 1D/2D

3.3.1 Fase preliminar

Esta fase compreende todo o trabalho de pré-processamento dos dados de entrada e tarefas de preparação do modelo do sistema de drenagem.

A primeira etapa desta fase consistiu em associar a cada caixa de visita uma sub-bacia de drenagem. A delimitação de cada sub-bacia foi efetuada com recurso ao método dos polígonos de Thiessen, que se encontra incorporado no *software* de simulação, o MIKE URBAN. Desta operação resultaram 162 sub-bacias de drenagem, representadas na

Figura 3.4 a.

De seguida foi necessário calcular para cada sub-bacia a percentagem de impermeabilização. A percentagem de impermeabilização de cada sub-bacia foi calculada recorrendo à ferramenta *Catchment Pressing*, do MIKE URBAN. A ferramenta permite calcular a percentagem de impermeabilização de uma sub-bacia tendo por base a utilização do solo. Para a construção do mapa de ocupação do solo foram criadas *layers*, para cada tipo de utilização do solo, a partir de imagens do Google Earth (

Figura 3.4b). Os valores de impermeabilização usados decorrem de valores de referência encontrados na bibliografia da especialidade.

Os dados de elevação do terreno são apresentados em diversas referências espaciais e por isso foi necessário converter todas elas para a mesma referência, a ETRS_1989_Portugal_TM06, utilizando o *software* ArcGIS®. No caso dos levantamentos topográficos os dados são apresentados sob a forma de curvas de nível e pontos cotados que foram convertidos para formato de polilinha e ponto. Esta operação permitiu criar uma rede triangular irregular que foi convertida para o formato de *raster*. Nas simulações a uma dimensão são necessários valores de declive dos diferentes MDT para cada sub-bacia. Recorrendo à ferramenta *Slope*, do

software ArcGIS®, e aos dados de elevação do terreno, sob a forma de *raster* calcula-se o declive de toda a área da bacia. De seguida com recurso à ferramenta *Zonal Statistics* calcula-se o declive médio para cada sub-bacia.

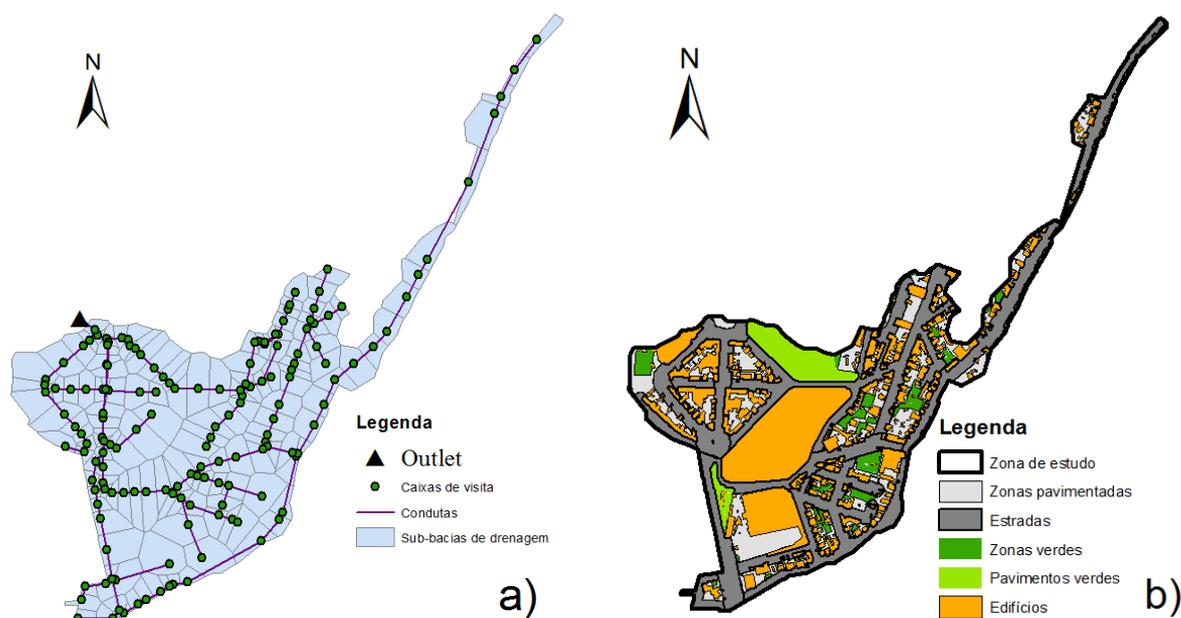


Figura 3.4- a) Configuração da rede de drenagem e respetivas sub-bacias. b) Utilização do solo na zona de estudo.

3.3.2 Simulação a uma dimensão (1D)

O software utilizado para realizar a simulação do modelo de drenagem urbana a uma dimensão foi o MIKE URBAN. Para a simulação a uma dimensão são necessários dados referentes à elevação do terreno, nomeadamente o declive de cada sub-bacia de drenagem.

Os dados relativos ao levantamento topográfico, curvas de nível e pontos cotados, necessitaram de ser interpolados de forma a compor uma série de dados continua e desse modo calcular o declive médio de cada sub-bacia.

Para a simulação do escoamento superficial foi usado o conceito de reservatório linear, que no MIKE é designado por modelo C. Neste modelo, o escoamento superficial afluente a um coletor é proporcional à altura de água na sub-bacia. A Figura 3.5 apresenta uma representação esquemática do conceito de reservatório linear aplicado no modelo de transformação de chuva em escoamento superficial. A quantidade de água que escorre na superfície, e que chega ao

coletor, é dependente das perdas iniciais. Neste modelo também são consideradas as perdas por evaporação e infiltração.

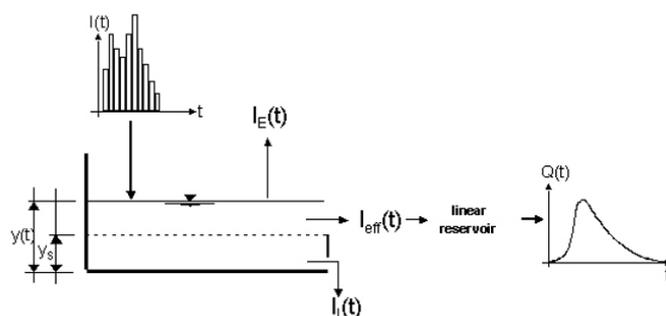


Figura 3.5-Representação esquemática do conceito de reservatório linear (DHI 2015b).

O fluxo de água no interior das condutas é modelado por esquema implícito a diferenças finitas a uma dimensão. O esquema permite modelar condições de fluxo instáveis tanto a superfície livre como em condutas sobre pressão (DHI 2015a). Neste caso o modelo usado é o da onda dinâmica com um *time step* mínimo de 1 segundo e máximo de 5.

Resultante da aplicação desta metodologia será analisado o volume que sai da zona de estudo pelo *outlet*, o volume de água expelido pelas caixas de visita e a altura de água nas caixas de visita numa zona intermediária (área drenante de aproximadamente 24ha), numa zona a montante desta (área drenante de aproximadamente 5ha) (Figura 3.6) e ainda o nó que apresentar maior volume de água expelida. O caudal nas condutas a jusante destes nós também será analisado.

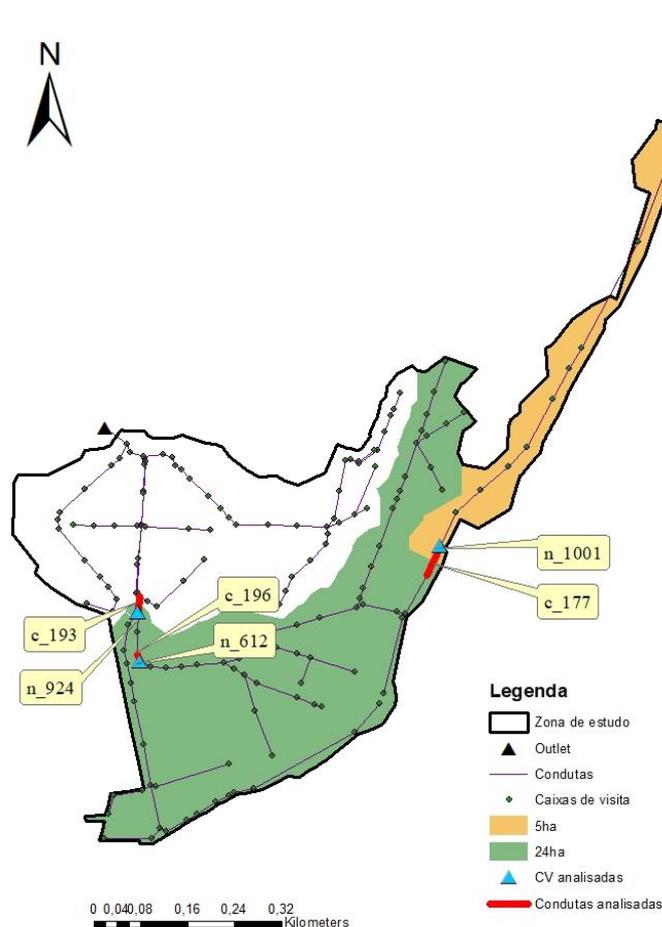


Figura 3.6-Área de estudo, caixas de visita e condutas analisadas.

3.3.3 Simulação de drenagem dual 1D/2D

As simulações de drenagem dual 1D/2D foram efetuadas com recurso ao programa MIKE FLOOD e MIKE 21. O modelo de drenagem dual 1D/2D é constituído por três componentes: a rede de coletores, o modelo do terreno representado a duas dimensões e uma interface que os liga. A rede de coletores e as sub-bacias de drenagem são representadas pelo modelo construído para as simulações unidimensionais. Na geração do modelo a duas dimensões do terreno foi necessário gerar uma malha triangular para interpolar os dados de levantamento do terreno e a imagem de LiDAR. A malha foi criada com recurso à ferramenta *Mesh Generator* do MIKE ZERO. Para a criação da malha é necessário definir os limites da zona de estudo e dos edifícios, assim foram carregados no programa *shapefiles* que continham essa informação. Carregados os ficheiros necessários para delimitar a área de estudo e os edifícios foi gerada uma primeira malha com as restrições de que os ângulos dos triângulos gerados não podiam ser inferiores a

26 graus, a área dos elementos superior a 1000 m² e o número de nós máximo de 50000. Esta malha necessitou de ser refinada de forma a poder representar melhor o terreno. O processo de refinamento da malha consistiu em remover pontos do limite da área de estudo e dos edifícios como demonstrado na Figura 3.7. A malha resultante é a apresentada na Figura 3.8 e é constituída por 8600 elementos e 6250 nós. Após este processo os dados dos modelos digitais do terreno foram interpolados com recurso ao método do vizinho próximo.

O modelo de transformação de precipitação em escoamento usado nestas simulações foi o do reservatório linear, denominado de modelo C no MIKE, no caso do escoamento no interior das condutas e à superfície do terreno foi usado o modelo da onda dinâmica.

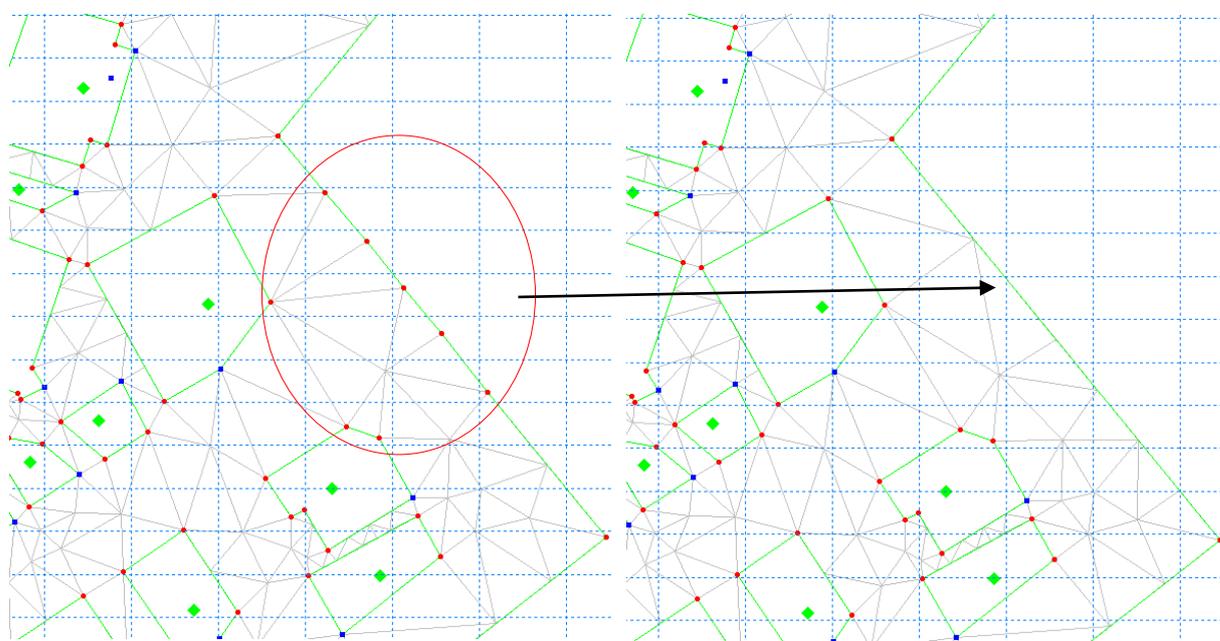


Figura 3.7-Exemplo do processo de refinamento da malha triangular.

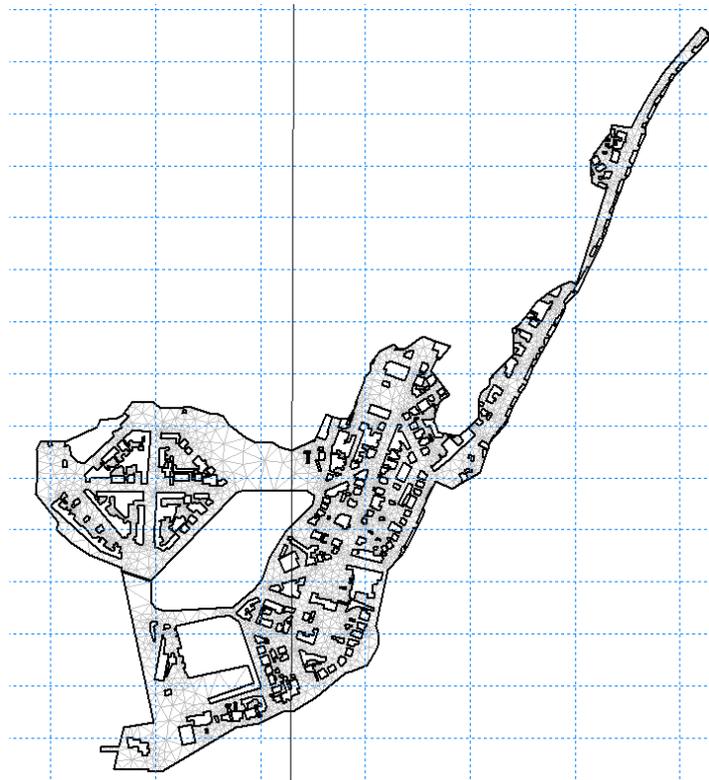


Figura 3.8-Malha triangular resultante do processo de refinamento.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia apresentada no capítulo anterior.

4.1 Fase preliminar

Da aplicação da metodologia descrita no subcapítulo 3.5.1 começa-se por apresentar a confrontação entre os declives calculados a partir dos diferentes dados de elevação para cada uma das sub-bacias. No eixo das abcissas são expressos os valores de declive resultantes dos dados de levantamento topográfico à escala de 1:10000 e 1:1000 enquanto que no eixo das ordenadas são apresentados os valores de declive resultantes dos dados da imagem de LiDAR. As linhas a laranja $y = x + 0.1$ e $y = x - 0.1$ representam um erro absoluto de 0,1 em relação à bissetriz dos quadrantes ímpares.

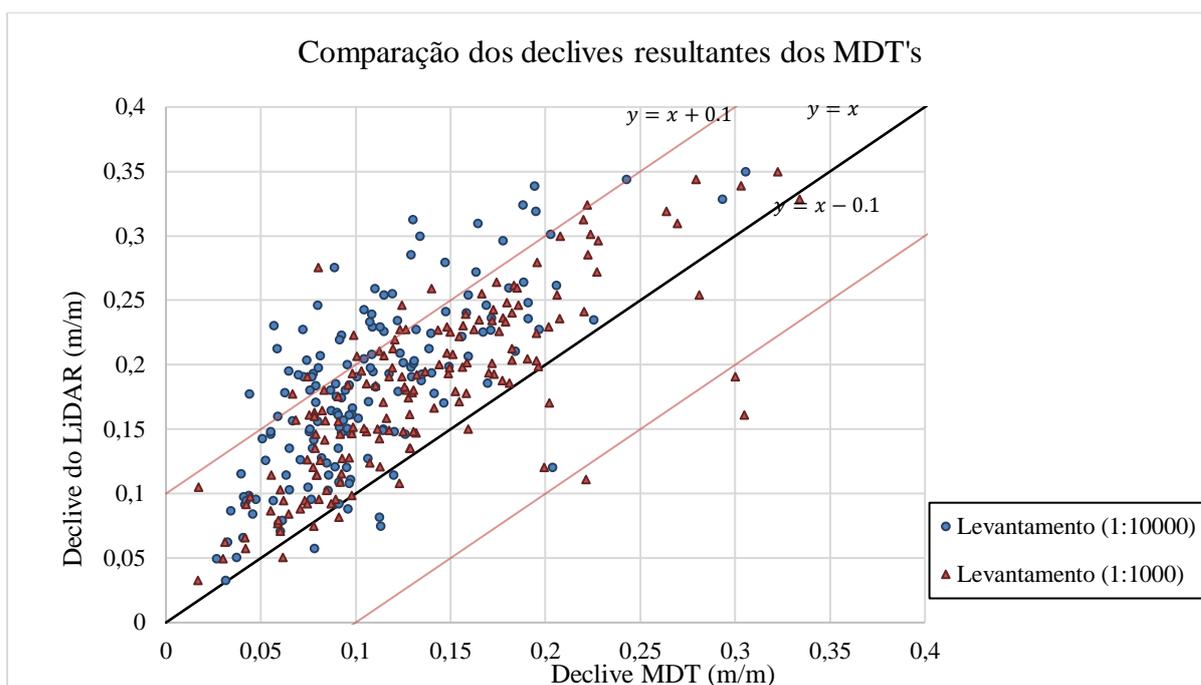


Figura 4.1- Comparação dos declives resultantes dos diferentes MDT.

Da análise da figura anterior pode-se observar que a maior parte dos valores se encontram acima da reta a preto e abaixo da reta a laranja, que representa um erro absoluto de +0,1 m/m. Sendo que no caso dos declives calculados a partir dos dados de levantamento topográfico à escala 1:1000 87,5% dos declives se encontram entre a reta a preto e a de erro +0,1 m/m, 6,2% a cima da reta de +0,1 m/m, 5,6% dos declives se encontram entre a reta a preto e a de erro -0,1m/m e

apenas 1,9% abaixo desta. Relativamente aos declives calculados a partir dos dados de levantamento topográfico à escala 1:10000 67,9% dos dados se encontram entre a reta a preto e a de erro +0,1 m/m, 27,8% a cima da reta de +0,1 m/m, 4,3% dos dados se encontram entre a reta a preto e a de erro -0,1m/m e nenhum valor abaixo desta.

4.2 Resultados simulação 1D

Da simulação do escoamento superficial foram obtidos os tempos de atraso em cada sub-bacia de drenagem, apresentados na Figura 4.2. O tempo de atraso define-se como o tempo que decorre desde o pico do hietograma de precipitação útil até ao pico do hidrograma de escoamento superficial para cada sub-bacia. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de tempo de atraso obtidos a partir dos dados de LiDAR e no eixo das abcissas os valores calculados a partir dos dados de levantamento topográfico.

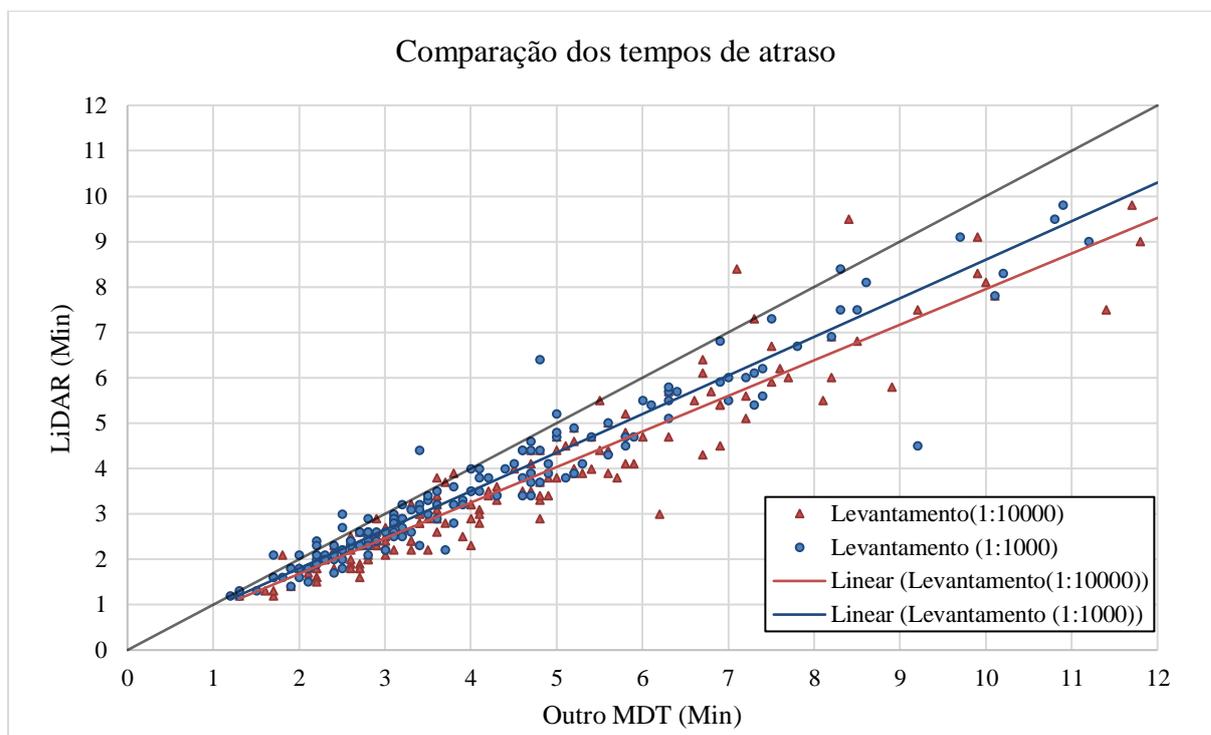


Figura 4.2- Comparação dos tempos de atraso das sub-bacias para os diferentes MDT.

Da análise da figura pode-se observar que os tempos de atraso, para cada sub-bacia, obtidos a partir dos dados de LiDAR são, na sua maioria, inferiores aos obtidos a partir dos dados de levantamento topográfico. Pode-se aferir que os valores do tempo de atraso referentes ao levantamento topográfico à escala 1:1000, e apesar da sua dispersão, se aproximam mais aos valores calculados a partir dos dados de LiDAR.

Os resultados das simulações de escoamento no interior das condutas encontram-se resumidos no quadro 4.1, sendo que a terceira coluna do quadro (Total inflow) diz respeito ao volume de água resultante da transformação de precipitação em escoamento superficial. Na quarta coluna (Outfall) são apresentados os valores que saem da zona de estudo pelo *outlet*, na quinta (Flooding) as quantidades de água expelida pelas caixas de visita, na sexta coluna (End Volume) o volume de água que no final da simulação permanece no interior das condutas e na última o número de nós inundados.

Quadro 4.1 – Resultados da simulação 1D.

	MDT	Total Inflow (m ³)	Outfall (m ³)	Flooding (m ³)	End Volume (m ³)	# Nós inundados
Tr=2	10000	4379,51	3592	778	8,4	30
	1000		3580	790	8,1	29
	LIDAR		3564	807	7,7	32
Tr=20	10000	7966,59	5622	2327	8,9	55
	1000		5599	2350	8,4	56
	LIDAR		5561	2388	8	57
Tr=100	10000	9658,51	6234	3404	8,6	65
	1000		6204	3434	8,1	65
	LIDAR		6152	3486	7,7	65

Da análise do quadro 4.1 pode-se verificar que quanto maior a resolução dos MDT menor será o volume de água que sai da zona de estudo pelo *outlet*. No que diz respeito ao volume de água expelido pelas caixas de visita, expresso na quarta coluna do gráfico, pode-se constatar que o volume aumenta quanto maior for a resolução do MDT. A quantidade de água que fica no interior das condutas decresce à medida que a resolução do MDT aumenta. Em relação ao número de nós inundados, não existe uma correlação evidente como nos casos anteriores. Para um tempo de recorrência de 100 anos os nós inundados são em igual quantidade para todos os MDT. No caso do tempo de recorrência de 2 e 20 anos o LiDAR apresenta maior número de nós inundados.

A análise da altura de água nas caixas de visita e caudal nas condutas nas condições descritas no subcapítulo 3.5.2 corresponde a analisar a caixa de visita n_1001 e a conduta c_177 para a área drenante de 5ha e analisar a caixa n_924 e conduta c_193 para a de 24ha. A caixa de visita que apresenta maior quantidade de água expelida é a n_612 e a conduta correspondente a c_196. A Figura 4.3 apresenta a variação do nível de água na caixa de visita n_1001, a Figura 4.4-Variação da altura de água na caixa de visita n_924 na caixa de vista n_924 e a Figura 4.5 na caixa de visita n_612 para os diferentes MDT. As figuras mostram ainda as diferenças para as chuvadas de projeto consideradas, isto é, com tempo de recorrência igual a 2, 20 e 100 anos.

Assim a entrada, na legenda, LT_1000_2 corresponde aos resultados de levantamento topográfico à escala 1:1000 para uma chuvada com tempo de recorrência de dois anos.

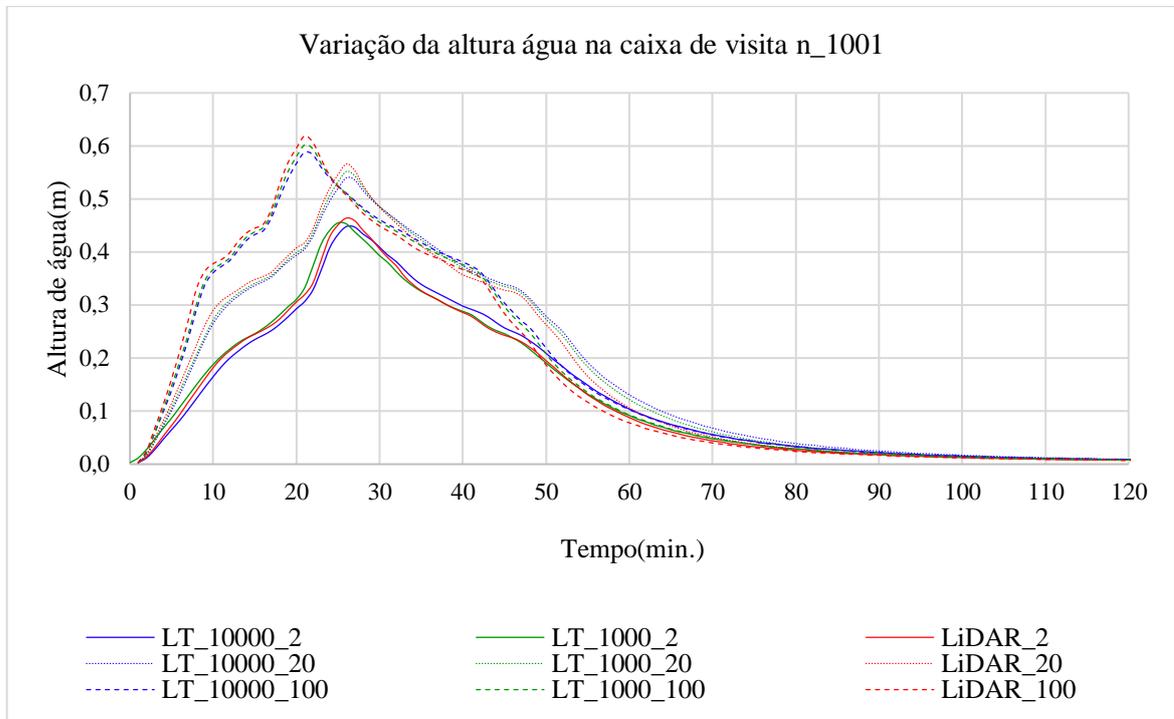


Figura 4.3- Variação da altura de água na caixa de visita n_1001.

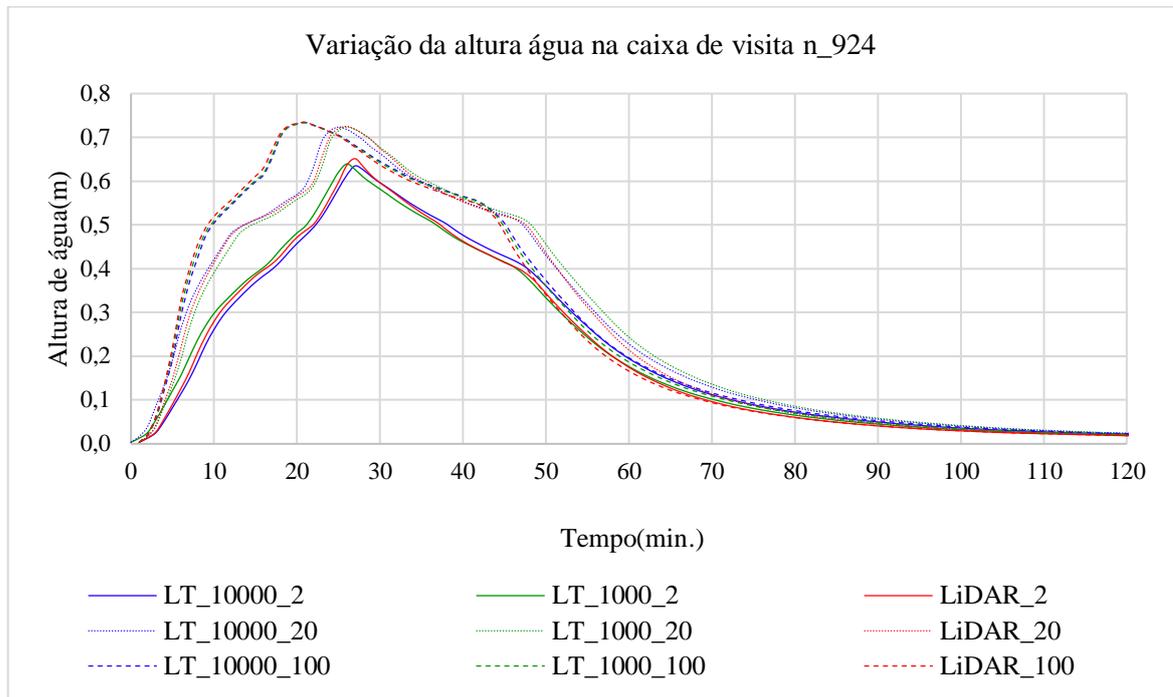


Figura 4.4- Variação da altura de água na caixa de visita n_924.

Na Figura 4.3 e Figura 4.4 observa-se uma translação de aproximadamente 5 minutos das curvas relativas ao tempo de recorrência de 100 anos em relação às curvas de tempo de recorrência de 2 e 20 anos. Para tempos de recorrência mais pequenos, 2 e 20 anos, a infiltração tem mais significado no caudal o que provoca um atraso da entrada da água nas caixas de visita.

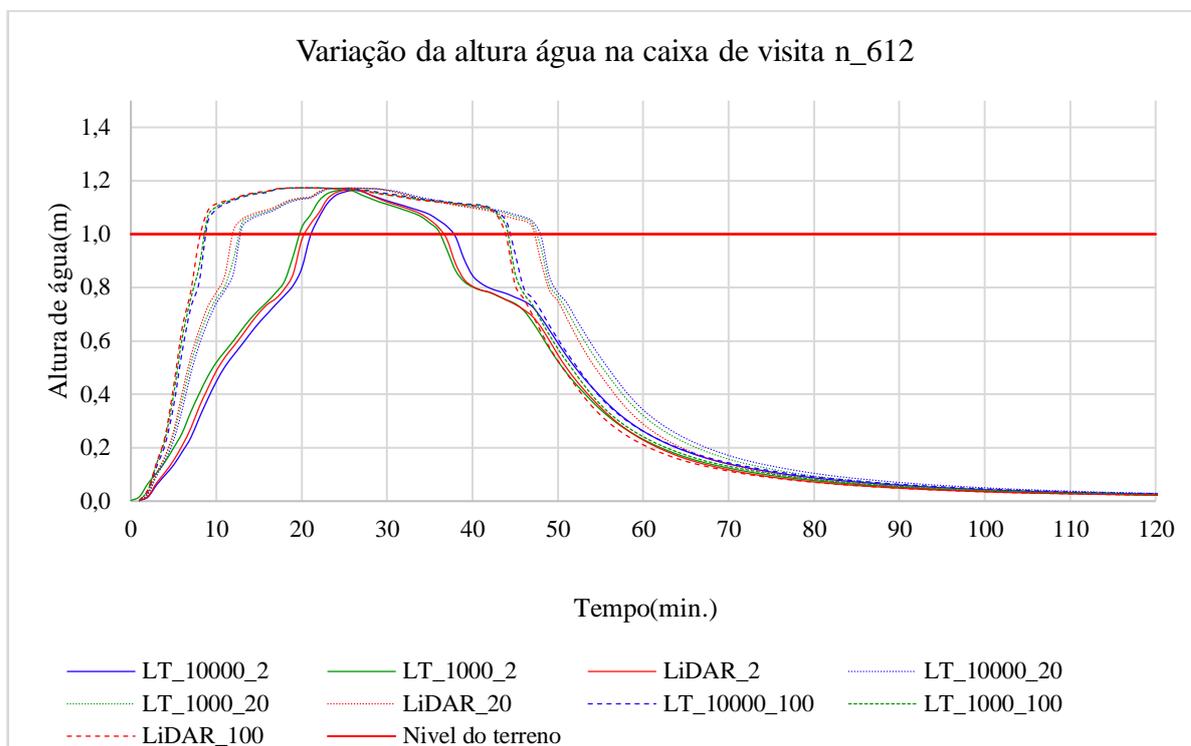


Figura 4.5- Variação da altura de água na caixa de visita n_612.

Da análise da Figura 4.5 pode-se observar que a altura da água, na caixa de visita n_612, ultrapassa a cota do terreno em 17 centímetros. Esta elevação deve-se à sobrecarga das condutas e caixas de visita a montante e a jusante que provocam pressão sobre a n_612 o que provoca a elevação da água acima do nível do terreno. Este evento é descrito, no modelo, pela equação:

$$H_m = (H_{Ter} + \Delta P) \quad (9)$$

Em que H_m traduz a altura da água na caixa de visita (m), H_{Ter} a cota do terreno da caixa de visita (m) e ΔP o aumento de nível devido à pressão exercida (m).

O quadro 4.2 expressa os valores máximos de altura de água nas caixas de visita n_1001, n_924 e n_612. São também apresentadas as percentagens de erro absoluto em relação aos valores de altura de água do modelo com MDT de LiDAR.

Quadro 4.2 – Valores máximos de altura de água e percentagem de erro.

		n_1001		n_924		n_612	
		Valor máx.(m)	% de erro	Valor máx.(m)	% de erro	Valor máx.(m)	% de erro
TR=2	LT_10000	0,448	3,45	0,635	2,55	1,164	0,19
	LT_1000	0,455	1,94	0,639	1,86	1,166	0,06
	LiDAR	0,464	n.a.	0,651	n.a.	1,167	n.a.
TR=20	LT_10000	0,540	4,59	0,724	0,21	1,173	0,02
	LT_1000	0,552	2,47	0,723	0,25	1,173	0,01
	LiDAR	0,566	n.a.	0,725	n.a.	1,173	n.a.
TR=100	LT_10000	0,588	5,01	0,734	0,11	1,173	0,01
	LT_1000	0,602	2,75	0,733	0,22	1,173	0,01
	LiDAR	0,619	n.a.	0,735	n.a.	1,173	n.a.

Da análise do quadro pode-se aferir que os valores máximos de altura de água nas caixas de visita são sempre superiores para os dados de LiDAR, sendo que, regra geral, os valores resultantes do levantamento topográfico à escala 1:1000 são inferiores a estes e que os valores resultantes do levantamento topográfico à escala 1:10000 são os menores. Em relação à percentagem de erro comparado com os valores mais elevados, os valores de LiDAR, a percentagem de erro é, regra geral, maior para os valores de levantamento topográfico à escala 1:10000.

A Figura 4.6 apresenta a variação do caudal na conduta c_177, a Figura 4.7 na conduta c_193 e a Figura 4.8 na conduta c_196 para os diferentes MDT. As figuras mostram ainda as diferenças para as chuvadas de projeto consideradas, isto é, com tempo de recorrência igual a dois, vinte e cem anos. Assim a entrada, na legenda, LT_2 corresponde aos resultados da carta militar para uma chuvada com tempo de recorrência de dois anos.

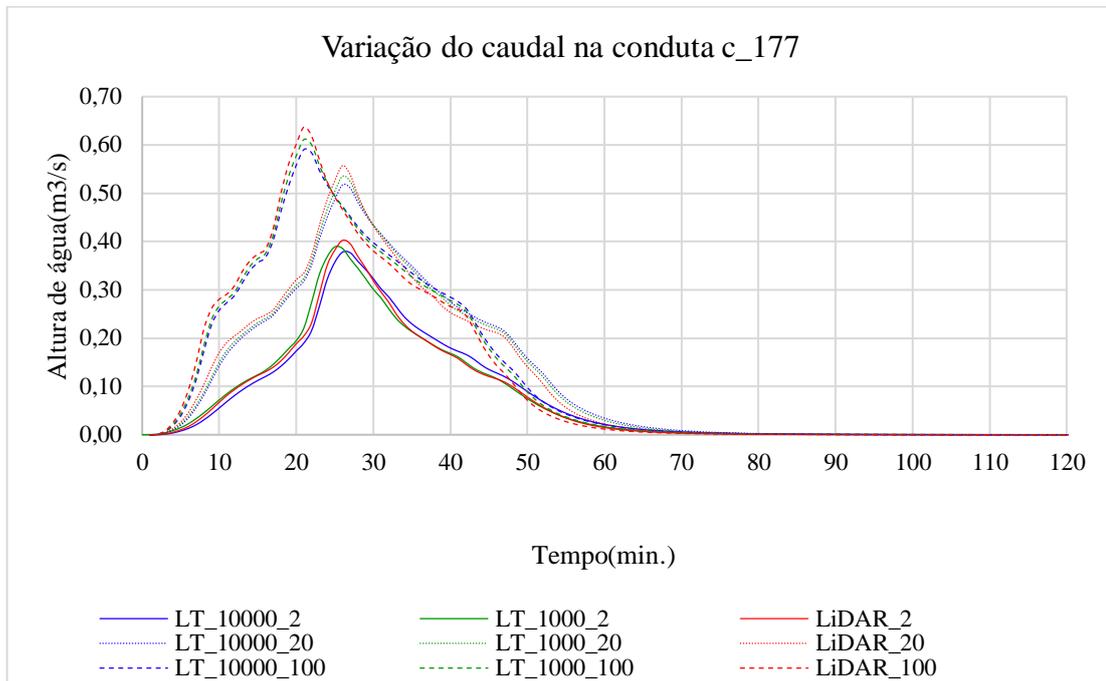


Figura 4.6- Variação do caudal na conduta c_177.

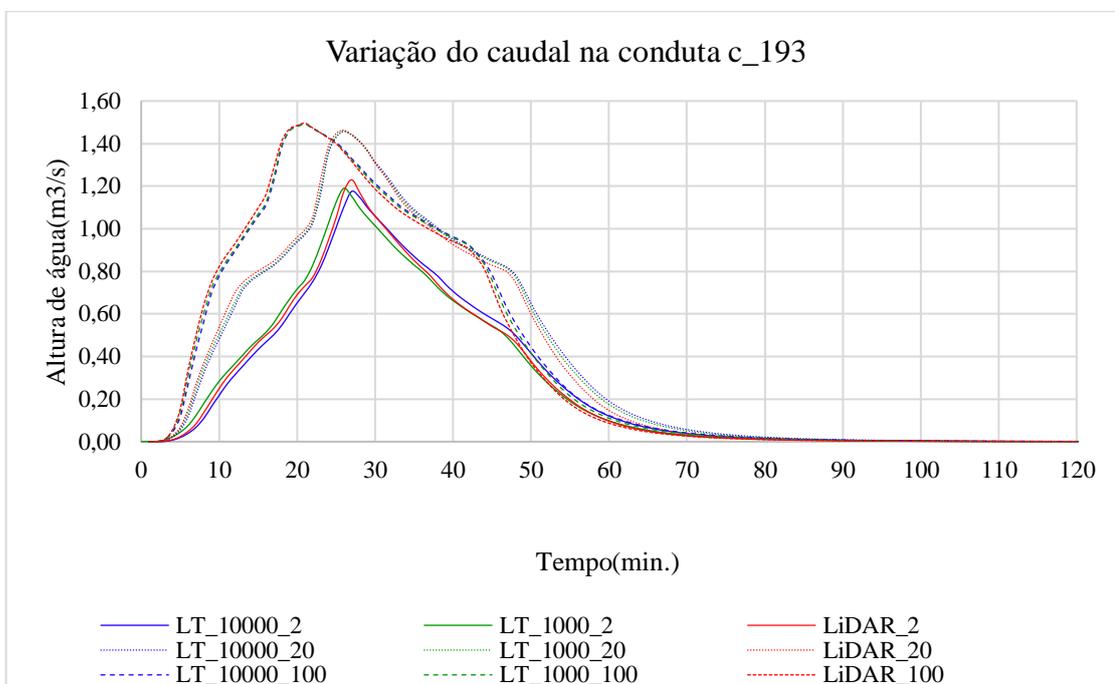


Figura 4.7- Variação do caudal na conduta c_193.

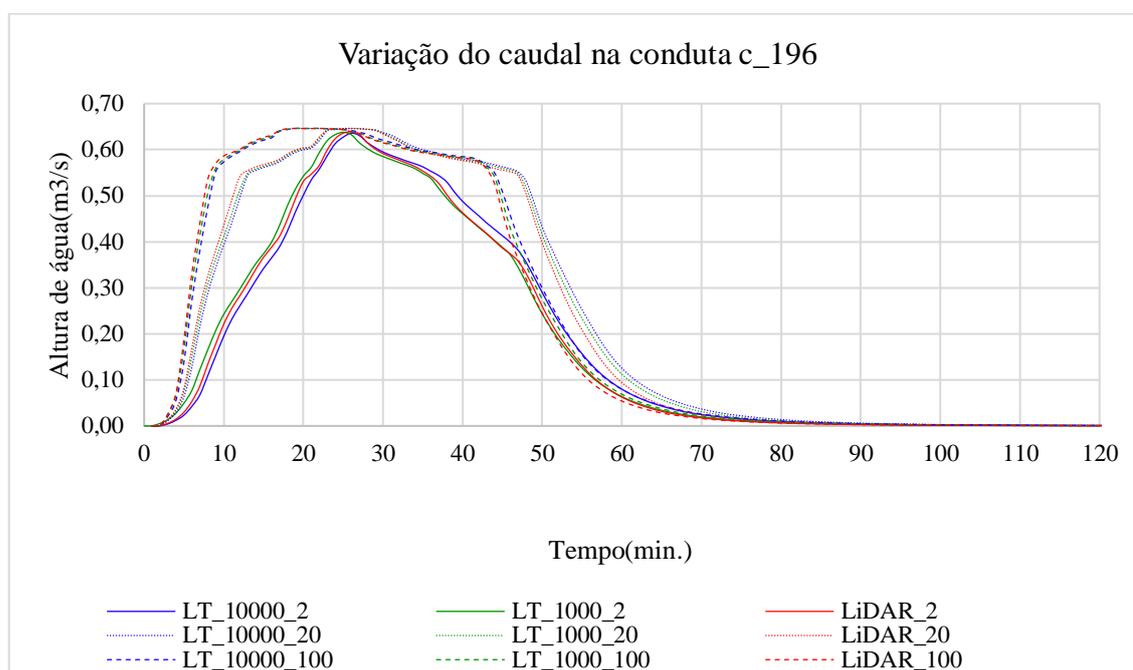


Figura 4.8- Variação do caudal na conduta c_196.

O quadro 4.3 expressa os valores máximos de caudal nas condutas c_177, c_193 e c_196. São também apresentadas as percentagens de erro absoluto em relação aos valores de caudal máximo, referentes aos valores calculados a partir da imagem de LiDAR.

Quadro 4.3 – Valores máximos de caudal e percentagem de erro.

		c_177		c_193		c_196	
		Valor máx. (m³/s)	% de erro	Valor máx. (m³/s)	% de erro	Valor máx. (m³/s)	% de erro
TR=2	LT_10000	0,378	6,1	1,175	4,4	0,636	0,5
	LT_1000	0,389	3,3	1,190	3,2	0,638	0,1
	LiDAR	0,402	n.a	1,230	n.a	0,639	n.a
TR=20	LT_10000	0,517	7,1	1,458	0,3	0,646	≈ 0,0
	LT_1000	0,535	3,9	1,457	0,4	0,646	≈ 0,0
	LiDAR	0,557	n.a	1,463	n.a	0,646	n.a
TR=100	LT_10000	0,591	7,3	1,493	0,2	0,646	≈ 0,0
	LT_1000	0,611	4,1	1,490	0,4	0,646	≈ 0,0
	LiDAR	0,402	n.a	1,496	n.a	0,646	n.a

Analisando o quadro pode-se aferir que os valores máximos de altura de caudal nas condutas são sempre superiores para os dados de LiDAR, sendo que, regra geral, os valores resultantes do levantamento topográfico à escala 1:1000 são inferiores a estes e que os valores resultantes do levantamento topográfico à escala 1:10000 são os menores. Em relação à percentagem de erro comparado com os valores mais elevados, os valores de LiDAR, a percentagem de erro é, regra geral, maior para os valores de levantamento topográfico à escala 1:10000.

4.3 Resultados simulação de drenagem dual 1D/2D

Os resultados das simulações de drenagem dual 1D/2D encontram-se resumidos no quadro 4.4, sendo que a terceira coluna do quadro (*Total Inflow*) diz respeito à quantidade de água que entra na rede de coletores derivada do escoamento superficial, na quarta coluna (*Outfall*) as quantidades de água que sai da zona de estudo pelo *outlet*. Na quinta coluna (*2D Outlet*) é apresentada a quantidade de água que é expelida pelas caixas de visita, na sexta (*End Volume*) a quantidade de água que fica no interior das condutas no final da simulação e na última coluna o número de nós inundados.

Quadro 4.4 – Resultados da simulação de drenagem dual 1D/2D.

		Total Inflow (m ³)	Outfall (m ³)	2D Outlet (m ³)	End Volume (m ³)	# de nós inundados
Tr=2	LT_10000		3305,9	2187,7	12,5	25
	LT_1000	4379,51	3489,0	2060,1	8,1	35
	LIDAR		4162,0	1434,0	7,4	30
Tr=20	LT_10000		5975,7	3416,6	13,0	51
	LT_1000	7966,59	6097,4	3811,5	10,3	59
	LIDAR		6967,1	2958,1	7,8	55
Tr=100	LT_10000		7319,9	5662,9	16,2	64
	LT_1000	9658,51	7339,3	4599,3	12,0	65
	LIDAR		8252,4	3777,0	7,5	61

Da análise do quadro 4.4 pode-se constatar que quanto maior a resolução dos MDT maior será o volume de água que sai da zona de estudo pelo *outlet*. No que diz respeito ao volume de água expelido pelas caixas de visita, expresso na quarta coluna do gráfico, pode-se constatar que o volume diminui quanto maior for a resolução do MDT. A quantidade de água que fica no interior das condutas decresce à medida que a resolução do MDT aumenta. Em relação ao número de nós inundados, não existe uma correlação evidente como nos casos anteriores. O número de nós inundados, calculados a partir do levantamento topográfico à escala 1:1000, é sempre o maior. Os valores referentes ao levantamento topográfico são os menores para os tempos de recorrência de 2 e 20 anos. Para o tempo de recorrência de 100 anos os valores obtidos pelos dados de LiDAR são os menores seguidos dos valores referentes ao levantamento topográfico à escala 1:10000 e os valores referentes ao levantamento topográfico à escala 1:1000 são os maiores.

As figuras Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 mostram as planícies de inundação para os diferentes modelos digitais do terreno e diferentes tempos de recorrência.

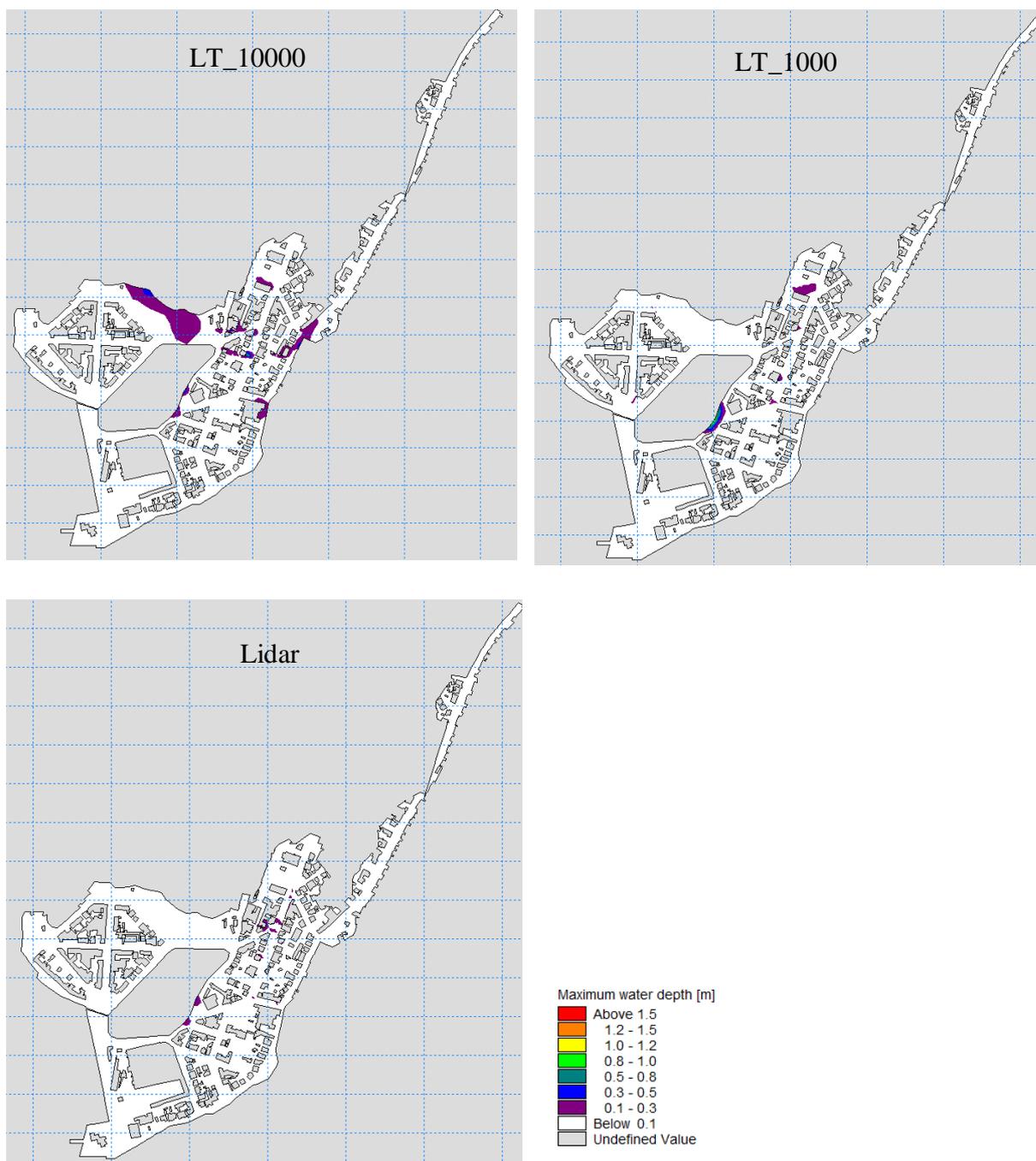


Figura 4.9- Planícies de inundação TR=2 anos.

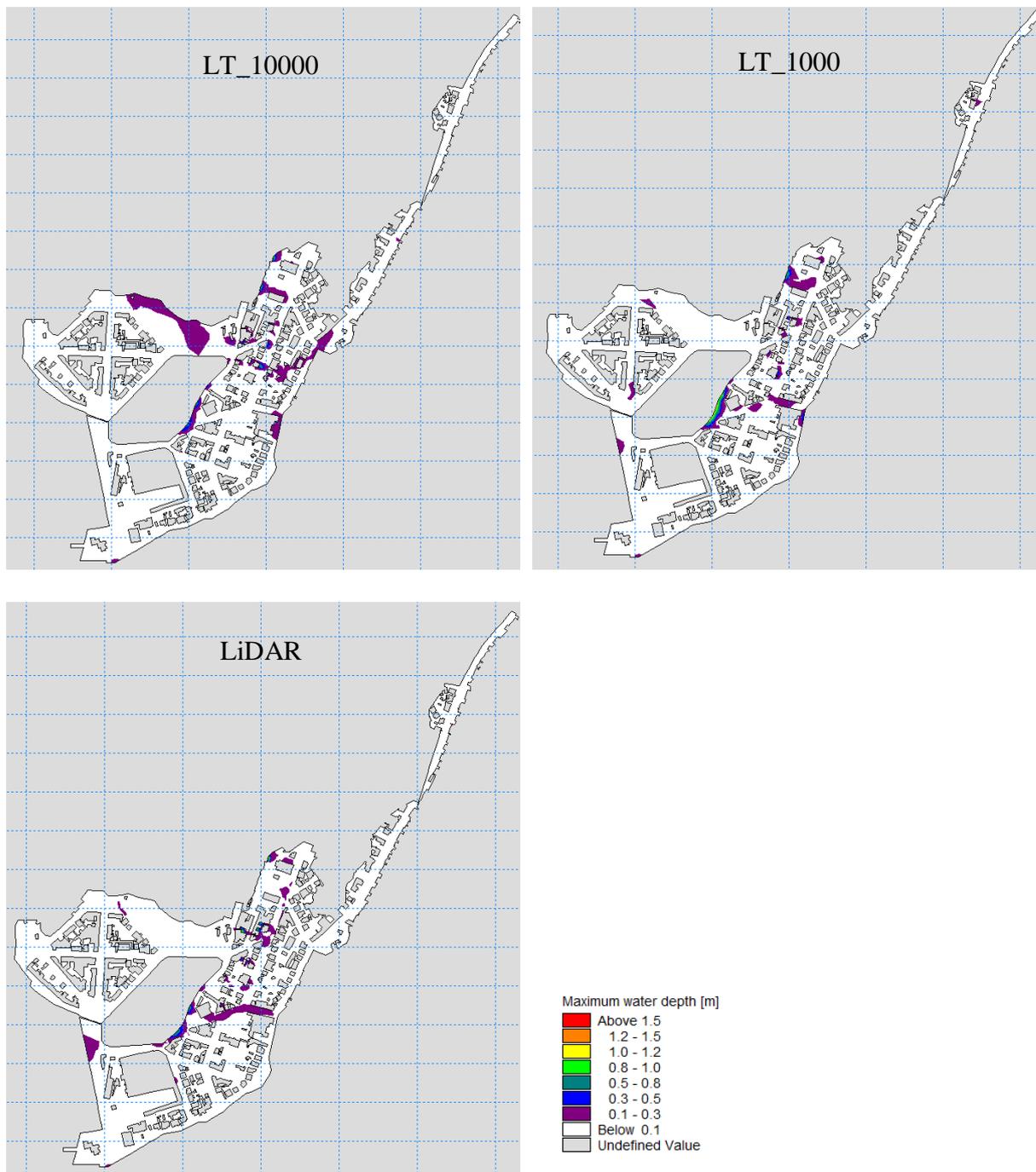


Figura 4.10- Planícies de inundação TR=20 anos.

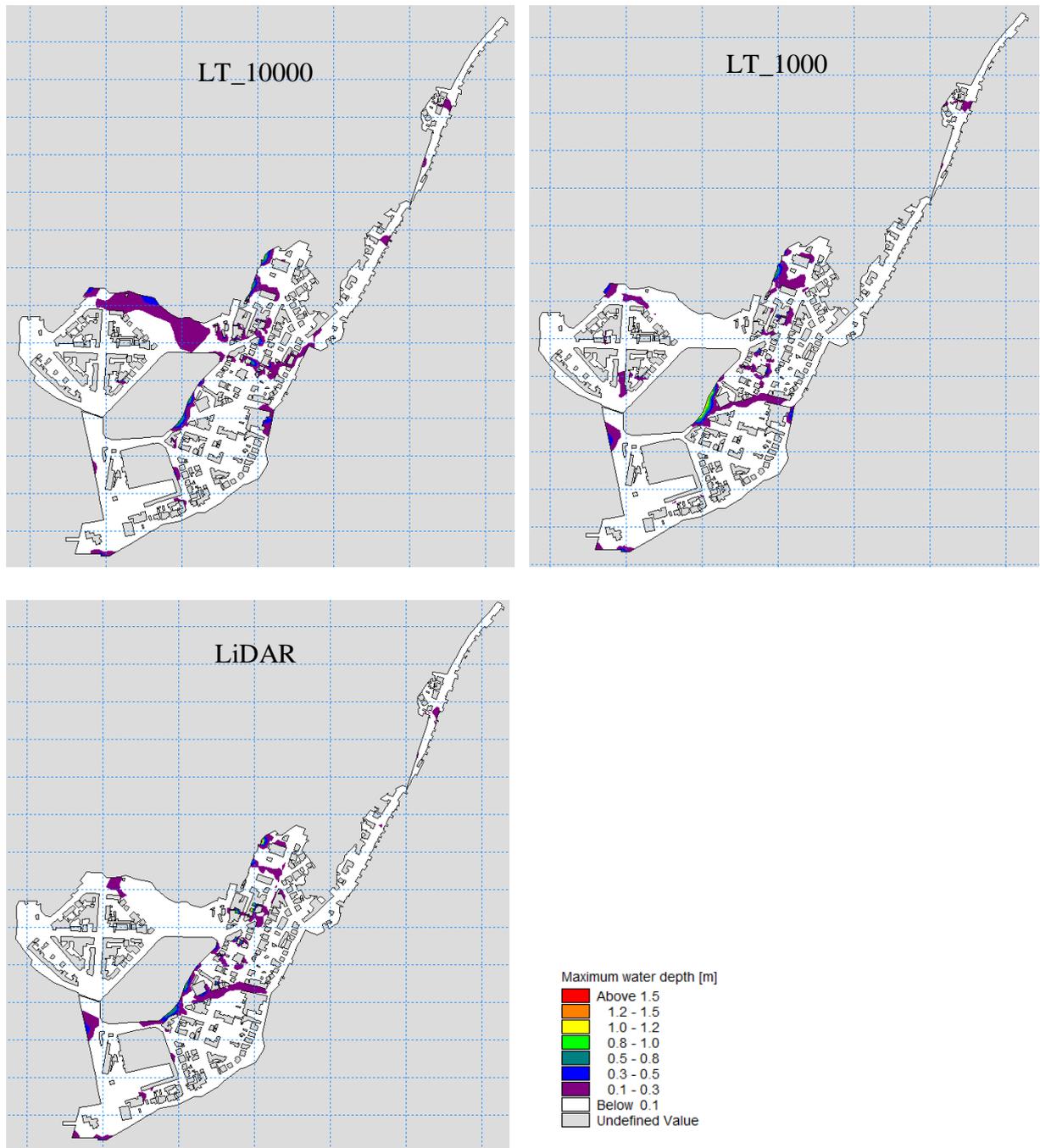


Figura 4.11- Planícies de inundação TR=100 anos.

O quadro 4.5 traduz as áreas inundadas representadas na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 e a percentagem de bacia inundada.

Quadro 4.5 – Áreas inundadas.

TR	2			20			100		
MDT	LT_10000	LT_1000	LiDAR	LT_10000	LT_1000	LiDAR	LT_10000	LT_1000	LiDAR
Valor (m ²)	18492,9	6500,6	4689,0	26916,4	17801,6	17054,4	39529,1	27021,0	25573,4
% bacia inundada	7,1	2,5	1,8	10,3	6,8	6,5	15,1	10,3	9,8

Da análise da Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11e do quadro 4.5 observa-se que para todos os tempo de recorrência o modelo digital do terreno construído com base nos dados de LiDAR apresenta menor área inundada seguindo-se o MDT relativo ao levantamento topográfico à escala 1:1000 e com maior área inundada o MDT construído a partir do levantamento topográfico à escala 1:10000.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões retiradas dos resultados apresentados no capítulo anterior.

5.1 Conclusões

Com o objetivo de estudar o impacto da resolução dos modelos digitais do terreno na simulação de cheias em meio urbano decorrentes de eventos pluviais, foi construído um modelo de um sistema de drenagem pluvial no programa MIKE. Neste estudo foram utilizados MDT da zona central da cidade de Coimbra com diferentes resoluções (levantamento topográfico e LiDAR). A simulação computacional contou com a utilização de dois tipos de modelos, unidimensionais (1D) e drenagem dual 1D/2D.

Pode-se concluir, assim, que os declives calculados a partir dos dados de levantamento topográfico são inferiores aos calculados a partir da imagem de LiDAR consequência da maior resolução da imagem de LiDAR, isto é, a imagem de LiDAR apresenta grande resolução e traduz as diferenças de declive com maior precisão e por isso o cálculo do declive médio apresenta valores superiores. Pode ainda concluir-se que os valores de declive calculados a partir dos dados de levantamento topográfico à escala 1:1000 se aproximam-se mais aos valores calculados pelos dados de LiDAR que os valores calculados a partir dos dados de levantamento topográfico à escala 1:10000. Consequência do exposto anteriormente, os tempos de atraso calculados a partir dos dados de levantamento topográfico são, na sua maioria, maiores.

No que diz respeito à simulação 1D pode-se concluir que à medida que a resolução dos MDT aumenta o volume que sai da zona de estudo pelo *outlet* diminui e o volume que sai pelas caixas de visita aumenta. Este efeito pode ser explicado pelo facto dos declives calculados a partir dos dados de LiDAR serem superiores e por isso a precipitação que cai sobre a bacia chega em menor tempo aos coletores o que provoca uma altura de água maior na caixa de visita e como consequência maior volume de inundação.

Na simulação de drenagem dual 1D/2D verifica-se que à medida que a resolução dos MDT aumenta o volume que sai da área de estudo pelo *outlet* aumenta, o volume expelido pelas caixas de visita diminui e o volume retido no interior das condutas diminui. Comparando os valores apresentados para as simulações unidimensionais pode-se verificar uma diferença nos valores de água expelida pelas caixas de visita. Esta diferença deve-se à forma como o caudal que sai das caixas de visita é tratado em cada um dos modelos, no caso das simulações unidimensionais assim que a água excede o nível do terreno é perdida e não retorna ao sistema de coletores enquanto que no modelo de drenagem dual 1D/2D quando a água atinge a cota do terreno

escorre pela superfície e pode voltar a entrar numa caixa de visita a jusante e voltar a sair por outra ainda mais a jusante. Todas essas saídas de água são contabilizadas no modelo de drenagem dual.

Em relação às planícies de inundação verifica-se que quanto maior a resolução dos MDT menor será a área ocupada pela inundação. Este resultado pode ser explicado pelo facto de que para os MDT de menor resolução os declives calculados são menores o que indica que existem mais zonas planas e por isso a água expelida pelas caixas de visita tende a acumular-se nessas zonas.

5.2 Trabalhos futuros

No seguimento do trabalho realizado, nesta dissertação, pode-se testar a influência da utilização de diferentes modelos, quer no processo de transformação de precipitação em escoamento (p.e. modelo da onda dinâmica ou tempo-área) quer na simulação de escoamento no interior das condutas (p.e. modelo da onda difusa e onda cinética), usando os mesmos dados de elevação do terreno. Pode também ser testada a influência de usar diferentes *softwares* de modelação de sistemas de drenagem pluvial.

Poderá ser desenvolvido trabalho no sentido de testar a influência de outros tipos de MDT como imagens de satélite, dados de levantamento topográfico (p.e. escala de 1:2000), imagens de LiDAR com resoluções mais finas e imagens obtidas por drones. Será interessante estudar a influência da utilização de malhas mais finas na geração dos dados de elevação do terreno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACP-EU. 2014. «Caribbean Handbook on Risk Management». 2014. <http://www.charim.net/>.
- Beven, Keith. 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The primer*. Second Edi. John Wiley & Sons.
- Butler, David, e John W. Davies. 2011. *Urban Drainage*. Taylor & Francis.
- Chow, Ven Te, David R. Maidment, e Larry W. Mays. 1988. *Applied Hydrology*. Editado por B.J. Clark e John Morriss. Internatio. Singapura: McGraw-Hill.
- Clemens, François Henri Léon Raymond. 2001. «Hydrodynamic models in urban drainage: Application and calibration». Delft University.
- DHI. sem data. «DHI». Acedido 3 de Fevereiro de 2019. <https://www.mikepoweredbydhi.com/>.
- . 2015a. «Pipe Flow- Reference Manual».
- . 2015b. «Runoff-Reference Manual».
- «EPA». sem data. Acedido 29 de Janeiro de 2019. <https://www.epa.gov/>.
- Eurostat. 2018. «The EU in the world - population». 2018. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=The_EU_in_the_world_-_population#Urban_population.
- eWater. 2013. «General approaches to modelling and practical issues of model choice». Vol. 1. <http://www.toolkit.net.au/tools/ModelChoice/MC-1.pdf>.
- Hengel;, Tomislav, e Hannes I. Reuter. 2009. *Geomorphometry. Developments in Soil Science*. Amsterdam: Elsevier. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(07\)32042-4](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(07)32042-4).
- Hipólito, João Reis, e Álvaro Carmo Vaz. 2013. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Editado por IST Press. Lisboa.
- IPCC. 2014. «Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». United Kingdom e New York.

-
- Lane, Kathryn, Charles-Guzman Kizzy, Katherine Wheeler, Zaynah Abid, Nathan Graber, e Thomas Matte. 2013. «Health Effects of Coastal Storms and Flooding in Urban Areas: A Review and Vulnerability Assessment». *Journal of Environmental and Public Health*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2013/913064>.
- Lencastre, A., e F.M. Franco. 1992. *Lições de Hidrologia*. 2ª Edição. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
- Li, Zhilin, Qing Zhu, e Christopher Gold. 2005. *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*. CRC Press.
- Markovic, G., M. Zelenakova, D. Káposztásová, e G. Hudáková. 2014. «Rainwater infiltration in the urban areas». *WIT Transactions on Ecology and The Environment* 181: 313–20. <https://doi.org/10.2495/EID140271>.
- Marques, Alfeu Sá, Simões, N. e Pina, R., (2013), Cap. 3 - Simulação em Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais, in: *Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas*. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra. - ISBN: 978-989-8360-12-0
- Maune, David F., ed. 2001. *Digital Elevation Model Technologies: The DEM User Manual*. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Methods, Haestad, e S. Rocky Durrans. 2007. *Stormwater Conveyance Modelling and Design*. Editado por David Klotz, Adam Strafaci, e Colleen Totz. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press.
- Moore, I D, R B Grayson, e a R Ladson. 1991. «Digital Terrain Modeling : A Review of Hydrological Geomorphological and Biological Applications». *Hydrological Processes* 5 (1): 3–30. <https://doi.org/0885-6087/91/010003-28>.
- Price, Roland K., e Zoran Vojinovic. 2011. *Urban Hydroinformatics: Data , Models and Decision Support for Integrated Urban Management*. London: IWA Publishing.
- Refsgaard, Jens Christian. 1996. «Terminology, Modelling Protocol and Classification of Hydrological Model Codes». Em *Distributed Hydrological Modelling*, editado por Jens Christian Refsgaard e Michael B. Abbott, 22:321. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0257-2>.
- Semadeni-Davies, Annette, Claes Hernebring, Gilbert Svensson, e L. G. Gustafsson. 2008. «The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system». *Journal of Hydrology* 350 (1–2): 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.028>.
- Shepherd, Marshall, Thomas Mote, John Dowd, Mike Roden, Pamela Knox, Steven C.
-

-
- McCutcheon, e Steven E. Nelson. 2011. «An overview of synoptic and mesoscale factors contributing to the disastrous Atlanta flood of 2009». *Bulletin of the American Meteorological Society* 92 (7): 861–70. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3003.1>.
- Simões, Nuno Eduardo da Cruz. 2012. «Urban Pluvial Flood Forecasting». Imperial College of London.
- Singh, Vijay P., ed. 2017. *Handbook of Applied Hydrology*. Second Edi. McGraw-Hill Education.
- Singh, Vijay P., e Donald K. Frevert. sem data. «Introduction». Em *Watershed models*, editado por Vijay P. Singh e Donald K. Frevert. CRC Press.
- United Nations. 2016. «The World's Cities in 2016». www.unpopulation.org.
- . 2018. «World Urbanization Prospects: The 2018 Revision». 2018. <https://esa.un.org/unpd/wup/Country-Profiles/>.
- Wahl, Thomas, Shaleen Jain, Jens Bender, Steven D. Meyers, e Mark E. Luther. 2015. «Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities». *Nature Climate Change* 5 (12): 1093–97. <https://doi.org/10.1038/nclimate2736>.
- Willems, P, K Arnbjerg-Nielsen, J Olsson, e V T V Nguyen. 2012. «Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings». *Atmospheric Research* 103: 106–18. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.003>.
- Willems, Patrick, Jonas Olsson, e Karsten Arnbjerg-nielsen. 2012. *Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems*. IWA Publishing.
- Wurbs, Ralph A. 1998. «Dissemination of Generalized Water Resources Models in the United States». *Water International* 23 (3): 190–98. <https://doi.org/10.1080/02508069808686767>.
- Xu, Chong-Yu. 2002. «Hydrologic Models». Uppsala University.
- Zoppou, Christopher. 2001. «Review of urban storm water models» 16: 195–231.

Título Erro! A origem da referência não foi encontrada. Erro! A origem da referência não foi encontrada.
