

## Utilização do método de pirâmide de imagens para a extração de modelos digitais de terreno de imagens geradas por dados de laser scanner

Alexandre Hering Coelho <sup>1</sup>

Thomas Vögtle <sup>2</sup>

Manuel Weindorf <sup>3</sup>

Hans-Peter Bähr <sup>4</sup>

Universidade Fridericana de Karlsruhe (TH)  
Instituto de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (IPF)  
Englerstr. 7, 76128 Karlsruhe, Alemanha

<sup>1</sup> ✉ [coelho@ipf.uni-karlsruhe.de](mailto:coelho@ipf.uni-karlsruhe.de)

<sup>2</sup> ✉ [voegtle@ipf.uni-karlsruhe.de](mailto:voegtle@ipf.uni-karlsruhe.de)

<sup>3</sup> ✉ [weindorf@ipf.uni-karlsruhe.de](mailto:weindorf@ipf.uni-karlsruhe.de)

<sup>4</sup> ✉ [baehr@ipf.uni-karlsruhe.de](mailto:baehr@ipf.uni-karlsruhe.de)

### Conteúdo

- 1 Introdução
- 2 Conjuntos de dados utilizados
  - 2.1 Centro da cidade de Karlsruhe
  - 2.2 Durlacher Turmberg
- 3 Procedimento
  - 3.1 Redução da resolução
    - 3.1.1 Tamanho da janela de varredura
    - 3.1.2 Número de níveis da pirâmide
    - 3.1.3 Parâmetro para análise do conjunto de pixels abrangido pela janela de varredura
    - 3.1.4 Valores escolhidos para os pixels do nível superior da pirâmide
  - 3.2 Recuperação da resolução original
    - 3.2.1 Parâmetro de comparação da diferença de altura do pixel
    - 3.2.2 Parâmetro para análise de curvatura na vizinhança do pixel
    - 3.2.3 Parâmetro de eliminação de erros negativos
- 4 Resultados
  - 4.1 Resultados com a área de testes 1 - Centro de Karlsruhe
  - 4.2 Resultados com a área de testes 2 - Durlacher Turmberg
- 5 Conclusões
- 6 Referências bibliográficas

**Resumo:** Esta publicação quer contribuir para inserir a técnica do laser scanner aerotransportado no contexto brasileiro, trazendo informações relativas à técnica de obtenção de modelos digitais de terreno a partir dos dados gerados por este tipo de sensor. Seguindo o método chamado de pirâmide de imagens foi criado um filtro para imagens raster geradas a partir de dados de laser scanner aerotransportado. Os resultados obtidos ao

*processar imagens de alguns campos de teste na cidade de Karlsruhe (Alemanha) estão aqui apresentados.*

**Palavras chave:** *laser scanner, modelo digital de terreno, pirâmide de imagens*

**Abstract:** *This publication is to insert airborne laser techniques into Brazilian context, generating digital terrain models from the data obtained from this type of sensor. Following the method called pyramid of images a filter for laser scanner data images was created to generate these models. The results gotten with images of some test fields in Karlsruhe (Germany) processed by this filter are presented here and show promising findings.*

**Keywords:** *laser scanner, digital terrain model, image pyramid*

## 1 Introdução

Há mais de uma década que o uso de laser scanners aerotrasportados possibilita a obtenção de modelos digitais de *superfície* (MDS), que são representações em meio digital da configuração espacial de altitude numa área. Em várias aplicações de engenharia é conveniente que esteja disponível diretamente o MDS, como no planejamento urbano, detecção de construções irregulares por não obedecerem o Plano Diretor (Centeno et al., 2000) e projetos de rede de telefonia celular. Porém quando se trata de temas como planejamento de sistema viário, projetos de hidrologia, simulação de escoamento de fluidos (enchentes, espalhamento de manchas de óleo) é necessário existir um modelo digital de *terreno* (MDT). Krabil (1984), por exemplo, comenta sobre a utilização do laser scanner (Airborne Oceanographic LIDAR - NASA) na geração de modelos de terreno com o objetivo de simular fenômenos hidrológicos, incluindo estudos sobre manchas de óleo em áreas costeiras.

MDTs são obtidos pela eliminação da vegetação e das edificações dos dados de MDSs num processo chamado de filtragem (Lohmann et al, 2000), o que pode ser feito com o auxílio de modelos matemáticos ou algoritmos. Briese e Pfeifer (2001) especificam o termo “filtragem”, quando se processa dados de laser scanner com o objetivo de gerar MDTs, dizendo que neste caso o que se faz é uma eliminação de erros grosseiros, o que também pode ser chamado de “classificação”. Segundo os autores, também se pode entender por filtragem a medição de erros randômicos, o que não é abordado neste trabalho.

O uso do laser scanner já é operacional na geração de MDT (Bähr, et al., 2001), porém métodos e parâmetros são ainda exaustivamente investigados por autores em vários países, de forma que os MDTs possam ser otimizadamente extraídos, isto é, que possam ser eliminados os objetos indesejados e simultaneamente preservada a configuração natural do terreno. A falta de automatização é um problema comum nos métodos que existem atualmente e é proveniente do fato de ser muito difícil determinar valores para parâmetros que possam ser utilizados para todos os tipos de terrenos, tamanhos e formas de edificações e vegetações. Mais adiante neste trabalho se tornará clara esta dificuldade.

O uso do laser scanner como alternativa à restituição fotogramétrica traz rapidez, boa precisão e praticidade na geração de MDTs, porém em alguns casos apresenta desvantagens. Kraus e Pfeifer (1998) explicam que a qualidade geomorfológica dos contornos de terrenos gerados por dados de laser scanner é baixa quando comparada com contornos gerados por restituição fotogramétrica, mesmo quando são aplicados filtros e interpolações qualificados. Isso porque não existem ainda métodos capazes de extrair automaticamente linhas de talvege dos dados do laser scanner. Como solução para este problema os autores apontam a combinação dos dados deste sensor com outras informações. Lindenberger (1993) e Kilian et al (1996) trazem também um paralelo entre a utilização do laser scanner e da fotogrametria onde especifica três situações onde este primeiro sensor apresenta grande vantagem: em terrenos com vegetação muito densa, em áreas cuja textura dificulta a restituição fotogramétrica e em áreas onde a aerotriangulação é

dificultada ou impossibilitada por problemas com a geometria de blocos, o que ocorre tipicamente em áreas costeiras.

Os dados do laser scanner podem ser disponibilizados em duas formas: coordenadas tridimensionais de pontos medidos na superfície, que pode atingir uma densidade de 5 pontos por metro quadrado (empresa Toposys), ou imagens raster onde os níveis de cinza dos pixels são calculados a partir das medições na área coberta por cada um. Há preferência pelo uso de um ou outro formato de dados de acordo com as vantagens que se pretende ter, relativas respectivamente à maior quantidade de informações ou à praticidade de processamento.

Os métodos de extração de MDTs podem seguir vários princípios. Como exemplos podem ser citados o método do mínimo flexível (von Hansen e Vögtle, 1999), onde é atribuído para todos os elementos de uma matriz-filtro com 5x5 até 15x15 pixels o menor valor de altura entre eles; o método das envoltórias côncavo-convexas (von Hansen e Vögtle, 1999), onde linha por linha da imagem são analisadas por um procedimento geométrico; o operador de erosão usado em morfologia matemática (Vosselman, 2000); tratamentos estatísticos por mínimos quadrados utilizando funções de pesos (predição linear, Krauss, 1997; Kraus e Pfeifer, 1997; Csaplovics e Wagenknecht, 1999); processamento com auxílio de programas de classificação de feições em imagens (Schiewe, 2001); e até mesmo métodos mais sofisticados utilizando elementos finitos (Ebner, 1979, apud Lindenberger, 1993; Krzystek e Wild, 1992), que incluem controle de curvatura e de torção da superfície do terreno.

Pfeifer (2001), adotou uma alternativa que utiliza o método conhecido como "pirâmide de imagens", empregado normalmente para acelerar a aplicação e redução de imagens em janelas de visualização. Este processo se mostrou útil na obtenção de MDTs uma vez que os objetos indesejados desaparecerem das imagens quando se faz uma sucessiva redução da sua resolução, controlada por alguns parâmetros. Briese e Pfeifer (2001) utilizaram o mesmo princípio, mas como pirâmide de dados (no caso as informações não foram armazenadas como níveis de cinza) onde conjuntos de dados foram criados com resolução reduzida formado os níveis, que foram filtrados por predição linear e comparados com os dados do nível de resolução maior. Segundo os autores este processo pode ser aplicado para qualquer conjunto de dados, com a grande vantagem de poder processar rapidamente grandes quantidades deles. O método assim acelera o processo de filtragem, além de ser capaz de eliminar tanto vegetação densa como também edificações, tornando o processo robusto.

Neste trabalho foi desenvolvido em linguagem C um filtro que utiliza o princípio de pirâmide de imagens para extrair MDTs de dados em formato raster, implementado como um módulo do sistema DiDiX de processamento de imagens do Instituto de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (IPF) da Universidade de Karlsruhe (TH) na Alemanha. Resultados obtidos em duas áreas de testes distintas são apresentados e analisados.

## **2 Conjuntos de dados utilizados**

Foram utilizadas como dados duas imagens raster geradas com vôos sobre a cidade de Karlsruhe na Alemanha, uma da parte central da cidade e outra da periferia. As imagens foram geradas a partir de medições com um scanner de pulsos de laser direcionados por fibras ópticas, capaz de atingir acurácia de  $\pm 0,3\text{m}$  no plano horizontal e  $\pm 0,1\text{m}$  em altura nas medições. Para maiores detalhes sobre o sensor consultar Lohr e Eibert (1995). Cada pixel da imagem cobre a uma área de  $1\text{m} \times 1\text{m}$  na superfície medida.

Quando são utilizados dados em formato de imagens raster, como cada posição de pixel no plano da imagem contém somente um valor de altura, a filtragem pode ser considerada como que feita em 2,5 dimensões. Esta é a forma que se utiliza para designar processamentos de dados que contém informações tridimensionais, sem que sejam empregados algoritmos que processem tridimensionalmente (Kraus, 1997).

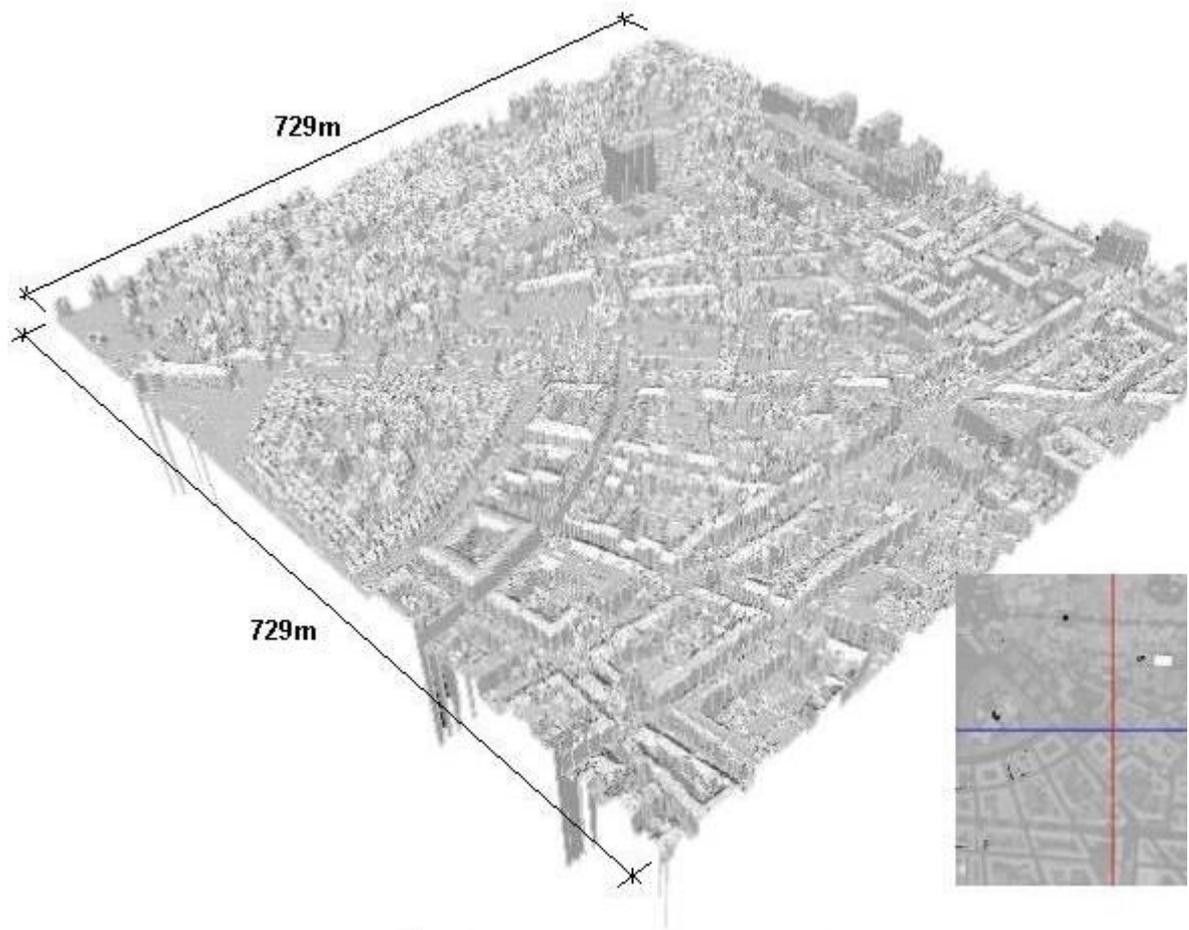
Briese e Pfeifer (2001) dizem que quando se tem os dados de laser scanner em forma de grid (rasterizados) o processamento torna-se rápido e facilitado, pelo fato da topologia da superfície ser bem conhecida.

## 2.1 Centro da cidade de Karlsruhe

A imagem utilizada, de primeiro pulso do sensor, cobre uma área de  $0,53\text{km}^2$  ( $729 \times 729$  pixels) situada no centro da cidade de Karlsruhe (Alemanha). Este campo de testes é plano, com uma diferença entre as cotas máxima e mínima no terreno de aproximadamente 5m.

A Figura 1 mostra uma perspectiva da área, onde podem ser identificadas as edificações, as ruas e a vegetação relativamente pouco densa. A mesma área é ilustrada em formato de imagem, que traz duas linhas (uma azul e uma vermelha) identificando as posições de onde foram extraídos perfis para controle dos resultados (ver Gráficos 1 e 2).

Podem ser também visualizadas falhas de medição do sensor, que aparecem na perspectiva como abrupas discontinuidades para baixo, e na imagem como manchas escuras.



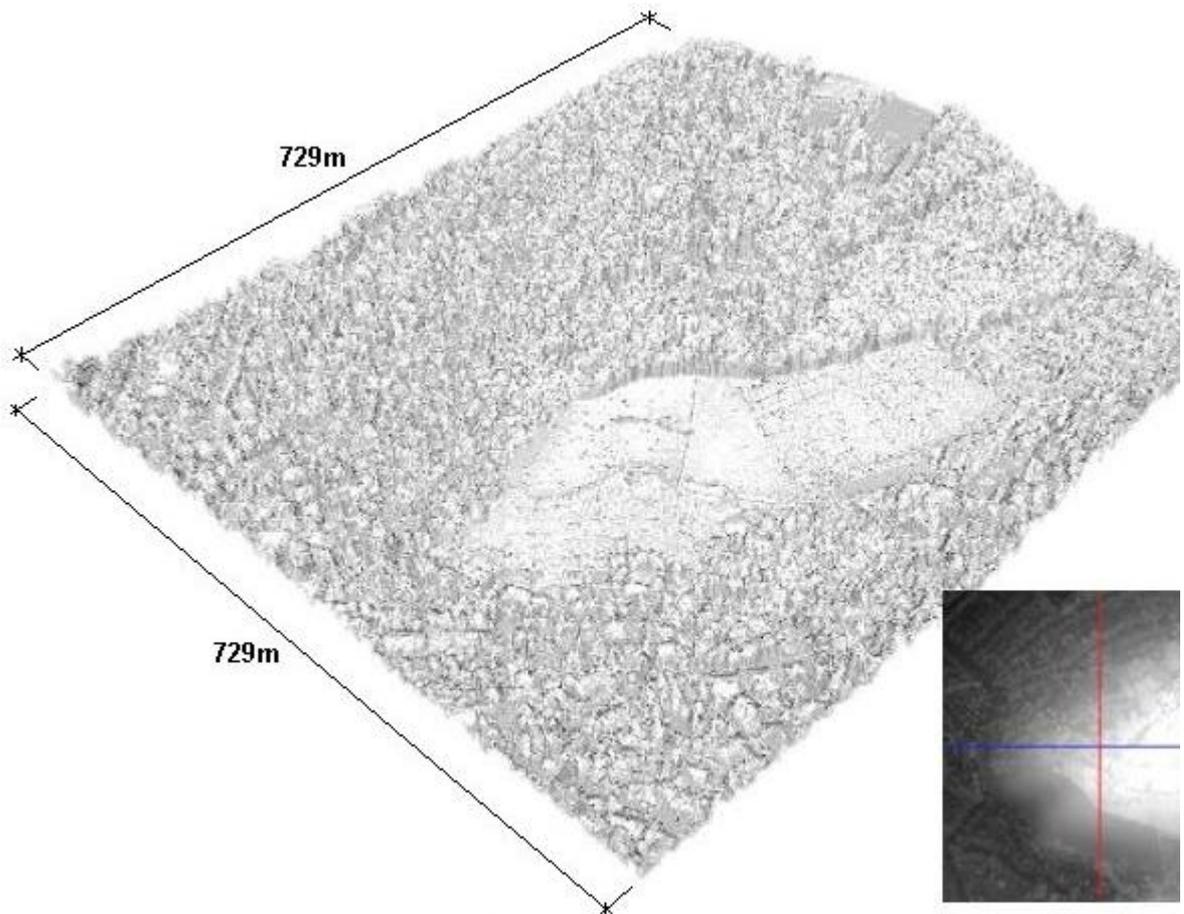
**Figura 1:** Área de testes 1 – Centro da cidade de Karlsruhe.

## 2.2 Durlacher Turmberg

Foi também utilizada uma imagem de primeiro pulso do sensor de uma área de mesmo tamanho ( $0,53\text{km}^2$ ,  $729 \times 729$  pixels) situada na periferia da cidade de Karlsruhe, chamada Durlacher Turmberg. O campo de testes possui vegetação mais densa, algumas edificações e uma elevação, com diferença entre as cotas máxima e mínima de aproximadamente 140m.

Da mesma forma que para o primeiro campo de testes, a área é ilustrada em perspectiva e também com uma imagem (Figura 2), onde pode ser identificada a elevação pelos pixels com nível de cinza maiores (parte mais clara). As posições para os perfis de controle

também estão marcadas com duas linhas sobre a imagem.

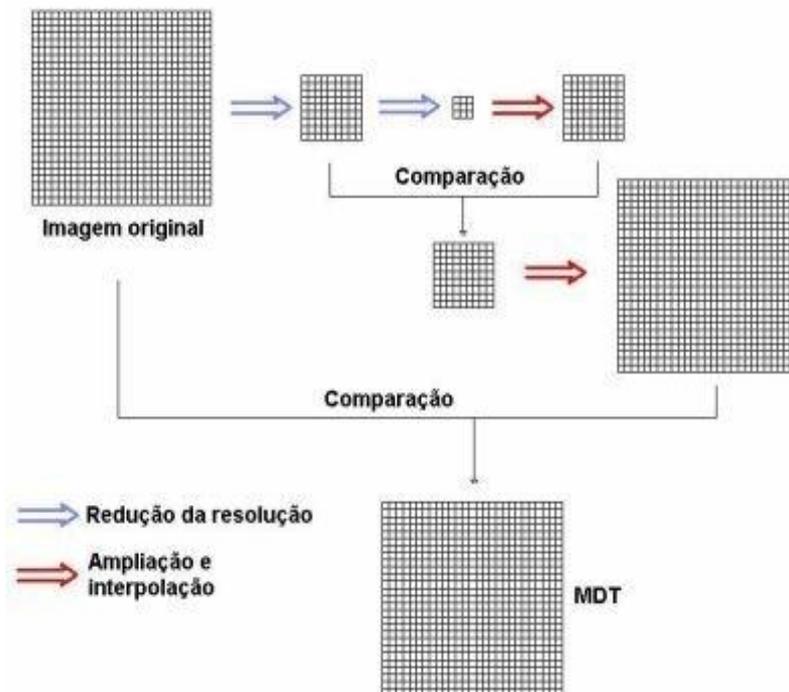


**Figura 2:** Área de testes 2 – Durlacher Turmberg.

### 3 Procedimento

O método de pirâmide de imagens compreende duas etapas: a redução da resolução, por um agrupamento sistemático de pixels, e então o retorno à resolução original. Estas duas etapas são controladas por parâmetros, que determinam a seleção dos novos níveis de cinza a serem atribuídos aos pixels. O método em geral não possui um número fixo de parâmetros que deve ser utilizado. Este número deve ser suficientemente grande para que o filtro possa ser utilizado em vários tipos de terrenos, com diferentes características e peculiaridades, mas suficientemente pequeno de forma a não tornar intrincada a tarefa de ajuste dos seus valores.

A Figura 3 a seguir ilustra como é realizado o processamento, onde como exemplo foi tomado um grid de 27x27 pixels sujeito a duas reduções de resolução passando sucessivamente para 9x9 e 3x3 pixels. O MDT é obtido então por ampliação, interpolação e comparação até ser atingida a resolução original da imagem.



**Figura 3:** Esquema do funcionamento.

Kilian et al (1996) distinguem duas etapas em processos de extração do MDT: a primeira sendo a obtenção de valores aproximados da superfície do terreno e a segunda sendo a filtragem dos pontos medidos e a modelagem da superfície do solo. Estas etapas podem ser encontradas no método de pirâmide de imagens, respectivamente nas fases de redução e de aumento da resolução, o que é melhor explicado a seguir.

### 3.1 Redução da resolução

Durante a redução da resolução da imagem esta é varrida por uma matriz-filtro, ou janela de varredura, que analisa os valores de nível de cinza do grupo de pixels abrangido por ela, atribuindo a ele um novo valor de cinza que é armazenado no pixel respectivo no nível superior da pirâmide. Esta etapa é repetida até que todos os objetos indesejados desapareçam.

Os parâmetros envolvidos nesta etapa são descritos individualmente a seguir.

#### 3.1.1 Tamanho da janela de varredura

O tamanho da matriz de varredura, também chamada na literatura de "abertura", ou "máscara", ou "filtro" é um parâmetro que, em combinação com o número de níveis da pirâmide, influi enormemente na eliminação dos objetos.

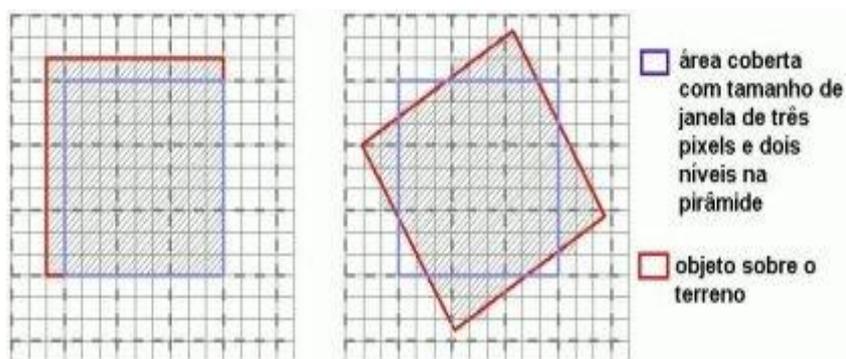
Schiewe (2001) estudou o efeito produzido na filtragem com a variação do tamanho desta janela. No seu trabalho a filtragem foi feita unicamente em uma imagem, sem produzir uma pirâmide, e concluiu que quando este tamanho for muito pequeno, restarão ainda pontos de objetos no MDT e se for muito grande o terreno tende a abaixar-se. O mesmo efeito ocorre quando se trabalha com pirâmide de imagens, porém neste caso há uma associação forte com o número de níveis da pirâmide.

Neste trabalho foi adotado o tamanho de 3x3 pixels, eleito como o mais conveniente por Pfeifer (2001), que verificou uma forte tendência do terreno ao abaixar-se quando são utilizados tamanhos maiores com pirâmide de imagens.

### 3.1.2 Número de níveis da pirâmide

O número de níveis que deve ter a pirâmide é calculado a partir do valor da maior dimensão horizontal do maior objeto a ser eliminado do terreno e do tamanho da janela de varredura adotado. Para que seja possível eliminar na imagem também este maior objeto, o valor do tamanho de janela  $j$ , elevado ao número de níveis  $n$ , deve ser maior do que a maior dimensão de objeto  $D$ , isto é,  $j^n > D$ . A dimensão  $D$  é determinada com uma análise prévia dos objetos da imagem, numa tarefa que envolve a interpretação do operador.

Quando é tomado simplesmente o valor da maior dimensão do maior objeto a ser retirado fica garantido que todos os outros objetos serão também eliminados. Quando esta maior dimensão encontra-se inclinada na imagem poderia ser suficiente um nível a menos na pirâmide, como mostra a Figura 4. Com uma janela de 3x3 pixels e com dois níveis na pirâmide foi possível eliminar um objeto de 10x10 pixels (10m x 10m) somente quando este estava rotacionado. Neste trabalho foi usada a simplificação de desconsiderar a rotação do objeto.



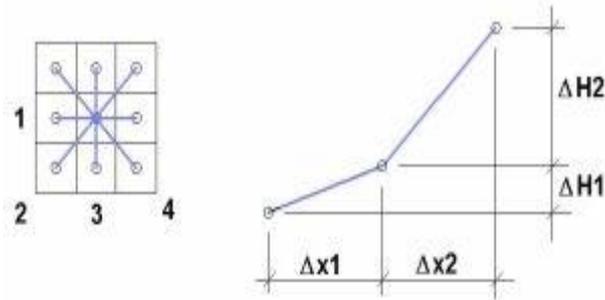
**Figura 4:** Influência da rotação do objeto na imagem na escolha do número de níveis da pirâmide.

Sendo especificado o tamanho do maior objeto no terreno a ser eliminado, é muito provável que, dependendo do relevo do terreno e dos parâmetros utilizados na escolha dos novos valores de cinza, todos os outros objetos menores sejam também eliminados. Muitas vezes isso não é desejado, por exemplo quando existem formações rochosas ou pequenas elevações isoladas do terreno que acabam também sendo eliminadas. Até hoje não há alternativas para evitar este efeito quando se utiliza processos automáticos. Csaplovics e Wagenknecht (1999) utilizaram o método da predição linear desenvolvido por Kraus (1997) para investigar terrenos acidentados, onde formações rochosas podem ser confundidas com partes mais densas de vegetação. E com efeito, verificaram que elas eram também eliminadas do modelo digital de terreno resultante. Puderam porém fazer estas formações permanecerem incluídas marcando manualmente pontos sobre ela antes do processamento, e substituindo os pontos processados pelos originais posteriormente.

### 3.1.3 Parâmetro para análise do conjunto de pixels abrangido pela janela de varredura

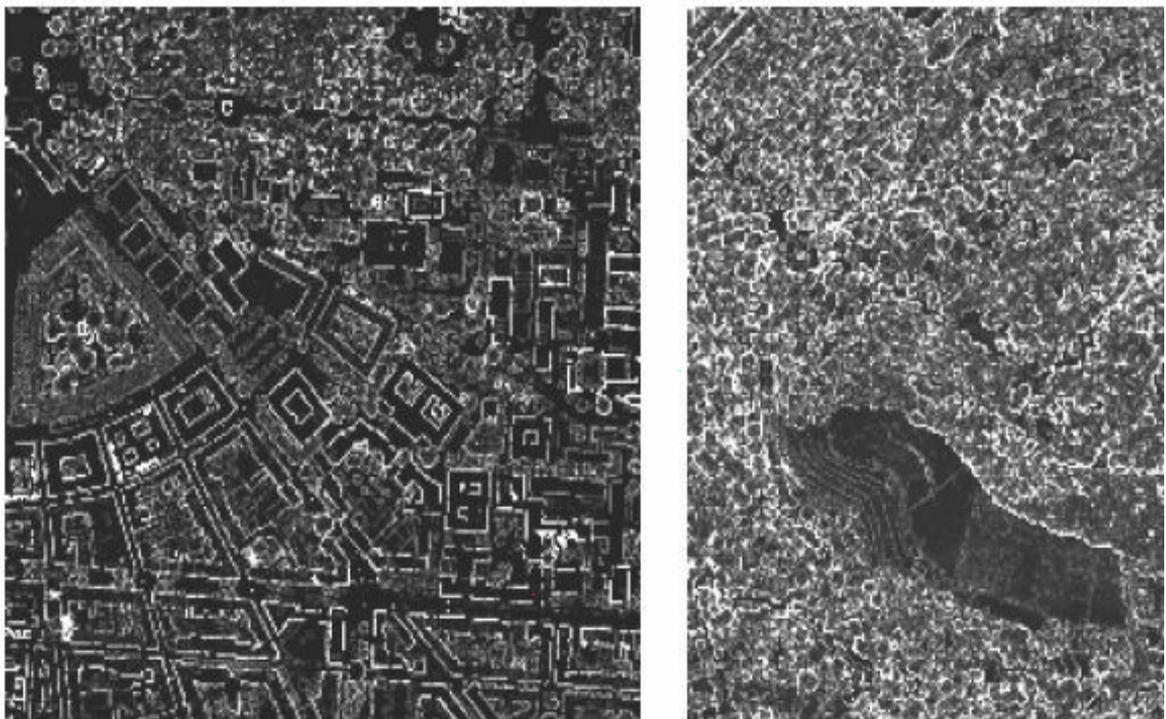
Este parâmetro serve como critério na decisão de qual valor será atribuído ao conjunto de pixels abrangido pela janela de varredura. Deve ser capaz de identificar adequadamente cantos de objetos, o que se busca analisando o grau da descontinuidade entre os níveis de cinza abrangidos. Existem várias formas de analisar esta descontinuidade, como por exemplo a diferença entre o maior e o menor nível de cinza, a variância ou a maior curvatura encontrada entre eles.

Neste trabalho foi adotado como parâmetro o valor da curvatura máxima  $C$ , seguindo o estudo de Pfeifer (2001). Ela é verificada na vertical, em quatro direções dentro da janela de varredura, como mostra a Figura 5, sendo adotado o maior valor encontrado, com  $C = (|\Delta H_2 - \Delta H_1|) / \Delta x$ , onde  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x$ .



**Figura 5:** Determinação da curvatura entre os pixels na janela de varredura.

Logicamente não há um valor ótimo que possa ser determinado de antemão. Uma maneira prática de determinar este valor é através da análise das curvaturas obtidas depois de um primeiro processamento-teste, trazido em forma de imagem, como mostra a Figura 6 à esquerda para a área de testes 1 e à direita para a 2. Para cada tipo de relevo de terreno e características de objetos existirá um valor diferente para este parâmetro.



**Figura 6:** Imagens contendo os valores de curvatura calculados para o primeiro nível da pirâmide

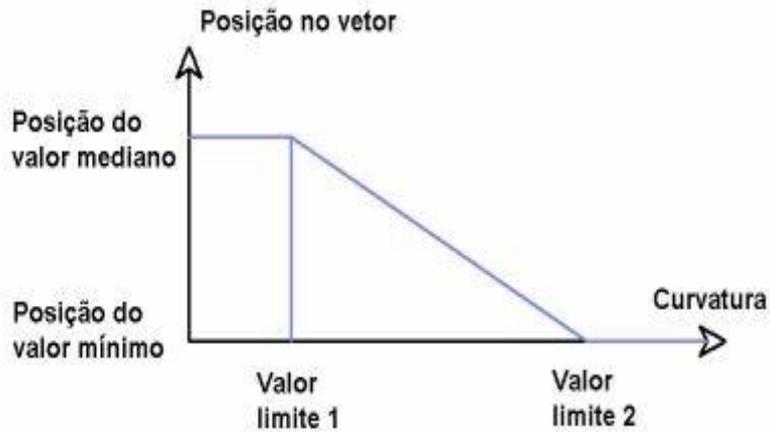
### 3.1.4 Valores escolhidos para os pixels do nível superior da pirâmide

Devem ser escolhidos valores para os pixels dos níveis superiores da pirâmide de forma que gradativamente possam ser eliminados os objetos e mantida a forma do terreno. Pixels refletidos pelo solo devem ser mantidos e utilizados como base para a interpolação nos espaços entre eles. A quantidade relativa de pontos medidos no solo pelo sensor é chamada de taxa de penetração. Segundo Vosselman (2000) um dos maiores problemas na utilização de laser scanner aerotransportado para medições altimétricas é esta seleção dos pontos no solo.

Com o método de pirâmide de imagens se procura detectar estes pontos através da atribuição de um nível de cinza menor nos casos onde a curvatura é grande (presença de cantos de objetos) e de um nível de cinza maior no caso da curvatura ser pequena. No caso

onde a janela de varredura se situar totalmente sobre um objeto, este pode não ser neste nível eliminado, porém com a sucessiva redução da resolução.

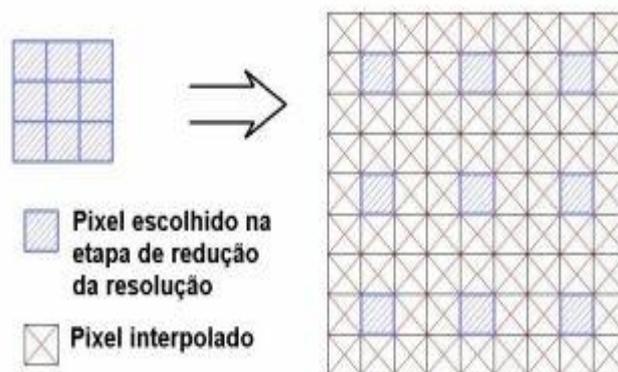
Os valores de cinza abrangidos pela janela são ordenados em um vetor, cuja primeira posição recebe o menor valor e o último o maior. Para tornar a escolha do nível de cinza mais flexível pelo operador, foi utilizado dois valores limites para a curvatura (ver Figura 7). O **valor limite 1** permite uma certa tolerância para a atribuição do valor mediano em casos de curvaturas reduzidas, enquanto o **valor limite 2** especifica a curvatura máxima tolerada, a partir da qual o nível de cinza escolhido é o mínimo. Quando o valor da curvatura estiver situado entre os dois valores limite, a posição no vetor do nível de cinza a ser utilizado é dada por interpolação.



**Figura 7:** Escolha dos valores de cinza na redução da resolução.

### 3.2 Recuperação da resolução original

Nesta etapa é feito retorno à resolução original da imagem. Neste processo o nível mais alto da pirâmide é expandido de forma que tenha a mesma resolução do nível imediatamente inferior, sendo interpolados os valores entre os pixels, como mostra a Figura 8 a seguir.



**Figura 8:** Expansão e interpolação de um nível superior.

No último nível da pirâmide não existem mais pixels com objetos. Esta superfície então expandida e interpolada é uma primeira aproximação do terreno. Esta aproximação é comparada pixel a pixel com o nível imediatamente inferior da pirâmide formado por pixels escolhidos durante a redução da resolução. A comparação é controlada pelos parâmetros descritos nos sub-ítemos a seguir. Este processo se repete até que seja comparada a superfície interpolada gerada a partir do segundo nível da pirâmide com a imagem original armazenada no primeiro nível.

### 3.2.1 Parâmetro de comparação da diferença de altura do pixel

Quando o valor das alturas entre as duas superfícies são comparados podem ser detectados os pixels que pertencem a objetos, por estes gerarem uma diferença de altura relativamente grande. É dado então um valor limite de diferença de altura a ser tolerado (**valor limite 3**), acima do qual o valor tomado para a aproximação do terreno é o da superfície interpolada. É feito ainda um controle para evitar que a superfície interpolada se situe acima dos dados originais, evitando que pixels calculados na etapa de redução da resolução ou originais recebam eventualmente valores maiores do que já possuem.

Quando o processo chega na comparação entre superfície interpolada do segundo nível da pirâmide e a imagem original, caso a diferença de altura seja menor que o valor limite, são então inseridos no MDT os valores de pixel da imagem original.

### 3.2.2 Parâmetro para análise de curvatura na vizinhança do pixel

Pixels que devem também serem eliminados do terreno, mas que não o são por possuem uma altura menor do que o valor de altura limite, podem ser detectados e eliminados analisando o valor da curvatura formada com os seus pixels adjacentes (**valor limite 4**). Este é o caso por exemplo de vegetações baixas.

### 3.2.3 Parâmetro de eliminação de erros negativos

Se entende por erros positivos e negativos na geração do MDT pontos medidos respectivamente acima e abaixo da superfície do terreno (Krauss, 1997 e Kraus e Pfeifer, 1997), que podem ter origem em falha de medição do sensor. Os erros positivos são eliminados já no processo de redução da resolução, onde são sempre escolhidos valores de pixel mínimos na presença de grande curvatura. Porém os erros negativos podem ser levados adiante até o último nível da pirâmide e fazem com que as superfícies interpoladas propaguem este erro, que ao final da filtragem pode atingir grandes proporções.

Para controlar este erro, é atribuído o valor da superfície interpolada a todo pixel que possuir uma altura absoluta menor que um determinado limite (**valor limite 5**). Porém este parâmetro só pode ser utilizado nos casos onde o terreno for plano e horizontal, pois erros situados em partes elevadas podem possuir magnitude menor do que a maior diferença de altura do terreno, não sendo assim eliminados.

## 4 Resultados

A escolha dos valores limites apropriados para cada área de testes foi feita através de tentativas, onde foram observadas as perspectivas resultantes, através de uma análise subjetiva, e a verificação do comportamento dos MDT através dos perfis de controle (ver Figuras 1 e 2).

De forma geral foram primeiramente variados os valores limites 1 e 2, fazendo com que as superfícies interpoladas se situassem o mais próximas possível do nível do terreno. Depois disso, o ajuste dos valores limites 3 e 4 fazem com que os objetos indesejados sejam adequadamente eliminados.

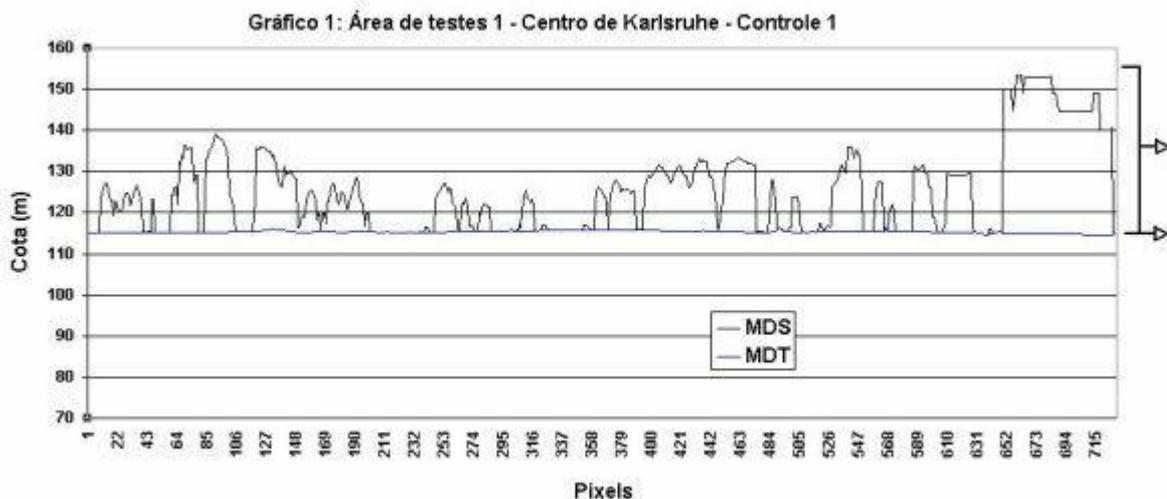
### 4.1 Resultados com a área de testes 1 - Centro de Karlsruhe

Os valores limites utilizados foram:

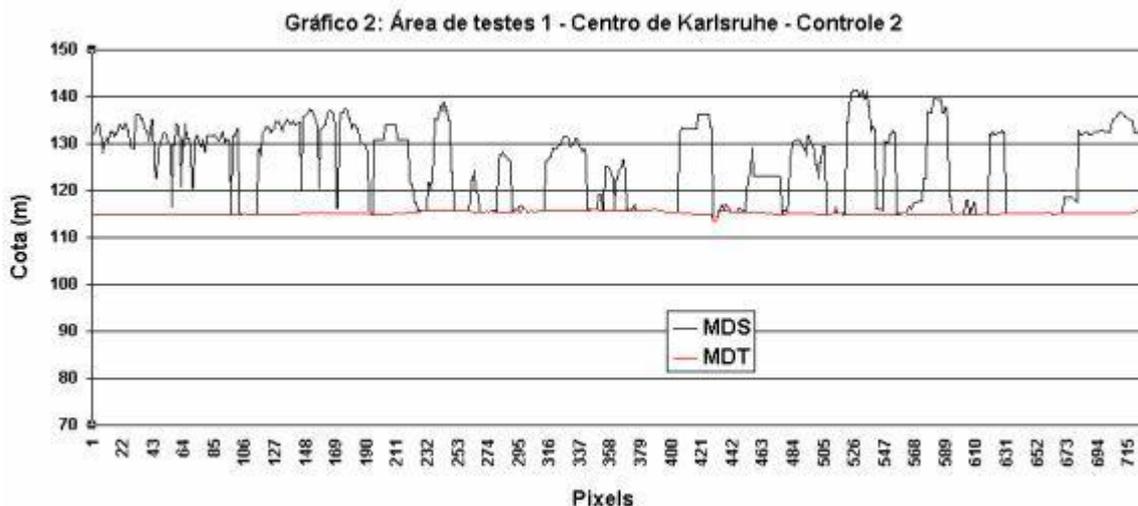
valor limite 1 = 50;  
valor limite 2 = 200;

valor limite 3 =80;  
 valor limite 4 = 80;  
 valor limite 5 = 11480;  
 com os quais foram obtidos os perfis a seguir (Gráficos 1 e 2). As posições dos perfis podem ser identificadas pelas cores azul e vermelha na Figura 1.

No Gráfico 1 estão à direita assinalados os dois produtos resultantes do processo: com o número 1 informações sobre os objetos, que são úteis no planejamento, administração e visualização de modelos virtuais urbanos 3D (Vögtle e Steinle, 2000) e com o número 2 o MDT.



**Figura 9:** Gráfico 1: Área de testes 1 – Centro de Karlsruhe – Controle 1.



**Figura 10:** Gráfico 2: Área de testes 1 – Centro de Karlsruhe – Controle 2.

Foi obtido um bom resultado com poucas tentativas variando os valores limites. Porém foi necessário o uso do valor limite 5 para serem evitados erros causados por pixels de cota inferior medidos em entradas de porões ao lado de algumas edificações. A Figura 9 traz a perspectiva do MDT resultante, onde se pode visualizar que tanto as edificações quanto a vegetação foram corretamente removidas.



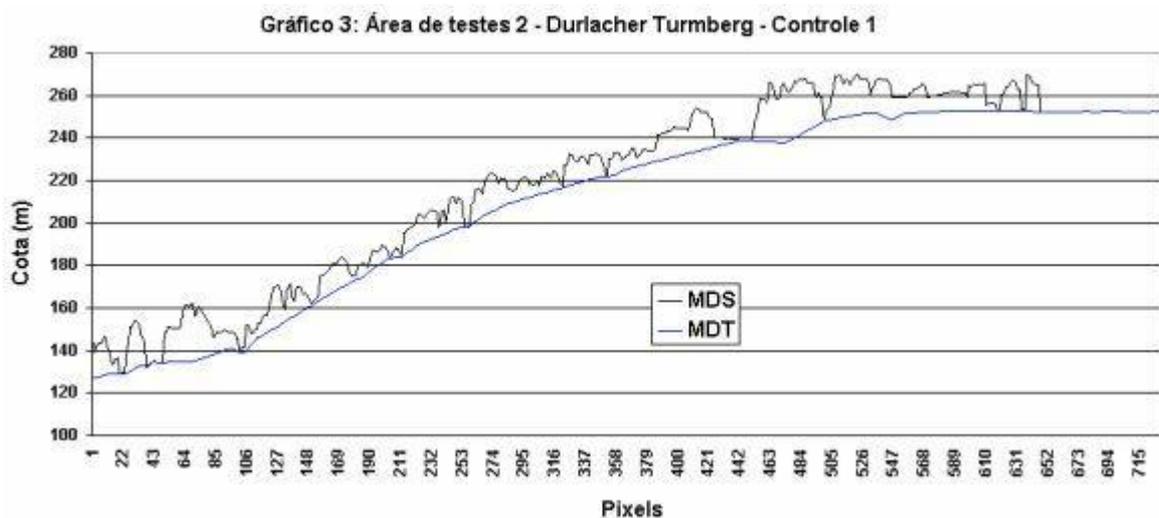
**Figura 11:** MDT da área de testes 1 – Centro de Karlsruhe.

#### 4.2 Resultados com a área de testes 2 - Durlacher Turmberg

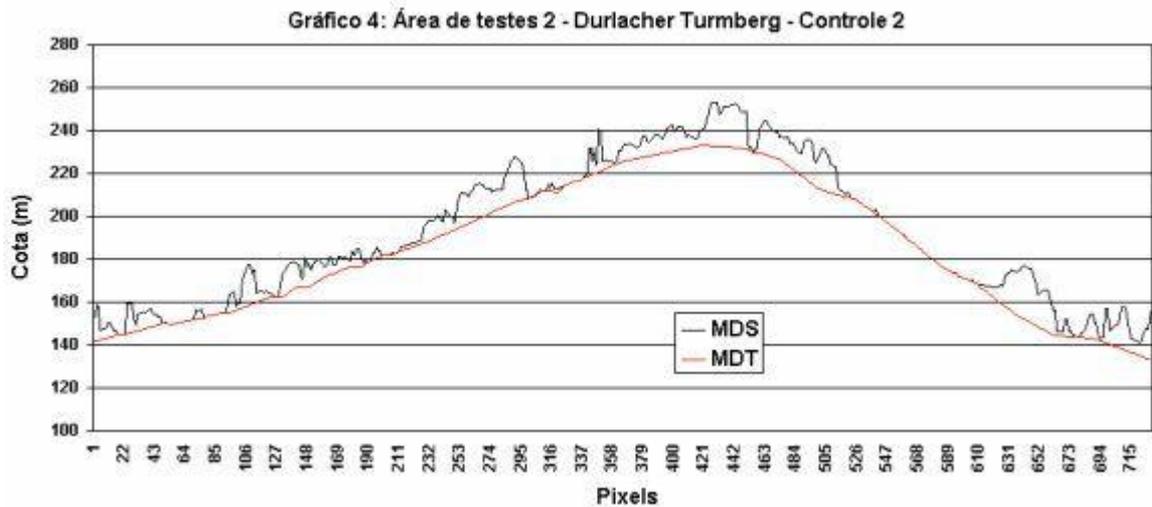
Os valores limites finais encontrados foram:

- valor limite 1 = 80;
- valor limite 2 = 250;
- valor limite 3 = 100;
- valor limite 4 = 80;
- valor limite 5 = 0;

com os quais os perfis dos Gráficos 3 e 4 foram obtidos, posicionados como mostra a Figura 2.

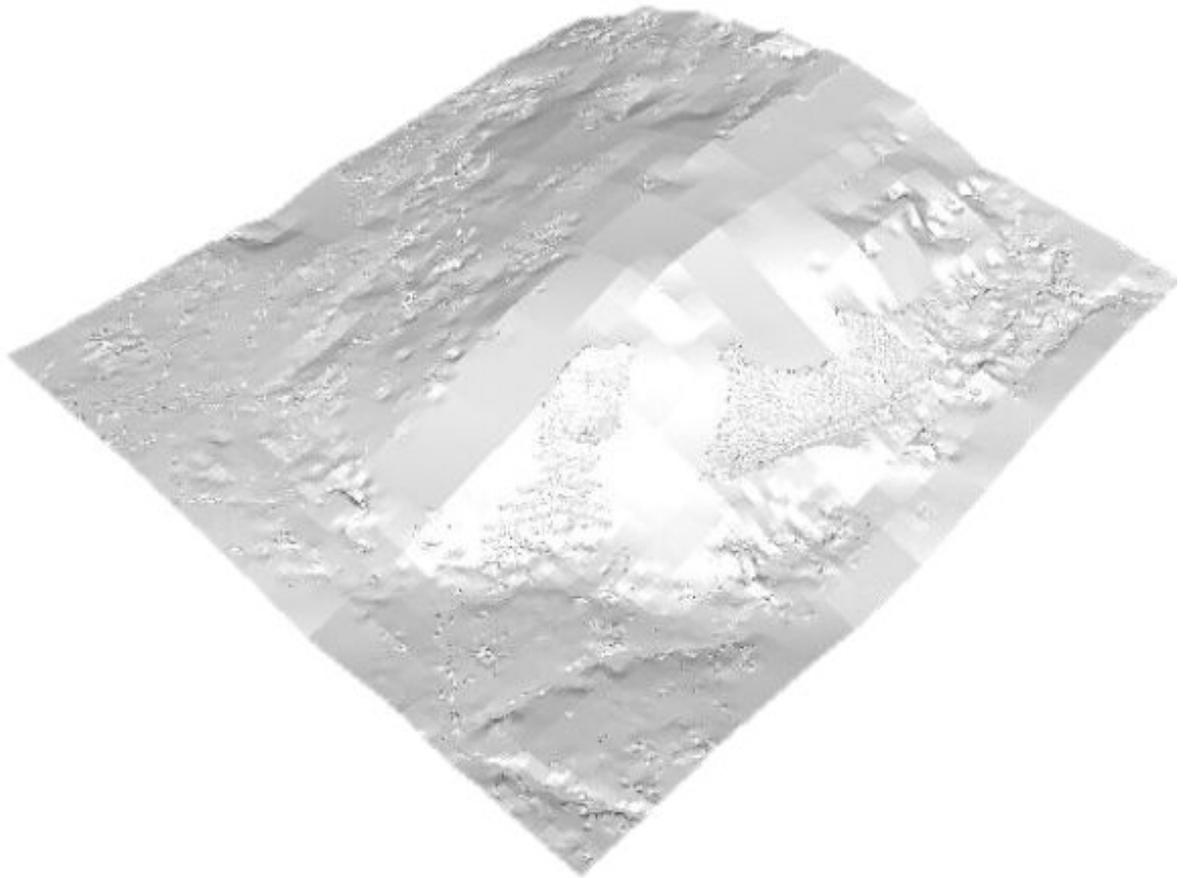


**Figura 12:** Gráfico 3: Área de testes 2 – Durlacher Turmberg – Controle 1.



**Figura 13:** Gráfico 4: Área de testes 2 – Durlacher Turmberg – Controle 2.

Como é possível ver na perspectiva resultante (Figura 10), a vegetação foi bem eliminada no terreno e o MDT se apresenta relativamente bom. Porém se pode detectar um efeito que ocorre na extremidade da elevação, onde a superfície parece ser formada de quadrados. Esta é na realidade uma parte da superfície interpolada em um dos níveis superiores da pirâmide, que permaneceu ser substituída por outros valores até a volta da resolução original, pela diferença de altura (valor limite 3) ou pela curvatura (valor limite 4) ser sempre maior do que os valores estipulados. Os vértices dos quadrados são os valores que serviram para a base da interpolação para esta superfície. Este efeito é diminuído ao serem utilizados maiores valores limites 1 e 2, porém assim as superfícies interpoladas situam-se acima do nível do terreno, o que não é desejado. Ao serem utilizados valores limites 1 e 2 menores e adotando um valor limite 3 mais tolerante (maior diferença de altura tolerada na comparação) a vegetação não é satisfatoriamente removida.



**Figura 14:** MDT da área de testes 2 – Durlacher Turmberg.

## 5 Conclusões

O método é capaz de extrair com eficiência a vegetação e as edificações, porém elimina também partes do terreno que, com a redução da resolução da imagem, apresentem-se como objetos. Este efeito pode ser diminuído ao serem utilizadas imagens que possuam originalmente maior resolução.

A utilização dos valores limites 1, 2 e 4, que trabalham com valores de curvatura dificilmente inteligíveis, torna-se uma tarefa relativamente trabalhosa, por ser difícil estimar a priori um valor apropriado. Schiewe (2001), a propósito, faz em seu trabalho um comentário sobre a importância de serem usados parâmetros que sejam facilmente compreensíveis. O método aqui implementado poderia atender melhor a esta necessidade ao serem utilizadas unidades de ângulos para estes parâmetros.

A precisão que pode ser obtida nos MDTs resultantes com este processamento é igual à dos dados originais para os pixels que têm mantidos os seus níveis de cinza. Para os pixels substituídos a precisão obviamente não é mantida, sendo neste caso inferior.

O nível de resíduo, ou a quantidade de pixels que ainda contém restos de objetos, é difícil de ser determinado quantitativamente, uma vez que para isso seria necessária uma densa medição terrestre, por topografia, GPS ou fotogrametria.

## 6 Referências bibliográficas

H.-P.; Centeno, J.; Coelho, A. H.; Hansen, W. von; Kiema, J.; Lohr, U.; Steinle, E; Vögtle, T. *Aerolevantamento com Laserscanning - Resultados da Cooperação TopoSys e*

*Universidade de Karlsruhe/Alemanha. XX Congresso Brasileiro de Cartografia, Porto Alegre, Brasil, 2001.*

**Briese, C.; Pfeifer, N.** *Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models.* Proceedings of 5th Conference on Optical 3-D measurement techniques, Vienna, Austria, 2001.

**Centeno, J. S.; Steinle, E.; Vögtle, T.** *Análise de modelos numéricos de elevação derivados de laser scanner para o monitoramento urbano.* In: COBRAC, UFSC, Florianópolis, 2000.

**Csaplovics E.; Wagenknecht S.** *Airborne Laser Scanning zur topographischen Modellierung von Felsgebieten.* In: Strobl J, Blaschke T (eds) *Angewandte Geographische Informationstechnologie 11*, Wichmann, Bonn (Beitr AGIT-Symp), p.108-119, 1999.

**Hansen, W. von; Vögtle, T.** *Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen.* In: *Photogrammetrie · Fernerkundung · Geoinformation*, caderno 4, p.229-236, Schweizerbart'sche, Alemanha, 1999.

**Kilian, J.; Haala, N.; Englich, M.** *Capture and evaluation of airborne laser scanner data.* In: *Int Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B3, Viena, Austria, p.383-388, 1996.

**Krabil, W. B.; Collins, J. G.; Link, L. E.; Swift, R. N.; Butler, M. L.** *Airborne Laser Topographic Mapping Results.* In: *PERS*, 50(6), p.685-694, 1984.

**Kraus, K.** *Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung.* In: *Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 1, p.25-30, 1997.

**Kraus, K.; Pfeifer, N.** *A new method for surface reconstruction from laser scanner data.* In: *Int Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. XXXII, Part 3-2W3, Haifa, Israel, p.80-86, 1997.

**Kraus, K.; Pfeifer, N.** *Determination of terrainmodels in wooded areas with airborne laser scanner data.* In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53, p.193-203, 1998.

**Krzystek, P.; Wild, D.** *Experimental Accuracy Analysis of Automatically Measured Digital Terrain Models.* In: Förstner, W.; Winter, S (Eds.), *Robust Computer Vision*, p.372-390, Wichmann, Karlsruhe, 1992.

**Lindenberger, J.** *Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme.* In: Band 400 der Reihe C. Deutsche Geodätische Kommission, München, 1993.

**Lohmann, P.; Koch, A. & Schaeffer, M.** *Approaches to the filtering of laser scanner data.* In: *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing* 33(B3), p.540-547, Amsterdam, 2000.

**U.; Eibert, M.** *The TopoSys Laser-Scanner-System.* *Photogrammetrische Woche*, Stuttgart, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, p.263-267, 1995.

**Pfeifer, J.** *Untersuchungen zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Laserscanner-Daten mittels Bildpyramide.* Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe (TH), 2001.

**Schiewe, J.** *Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen.* In: *Photogrammetrie · Fernerkundung · Geoinformation*, caderno 2, p.81-90, Schweizerbart'sche, Germany, 2001.

**Vögtle, T; Steinle, E.** *3D modelling of buildings using laser scanning and spectral information.* In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, Vol. XXXIII, Parte B3, Amsterdam, Holanda, p. 927-934, 2000.

**Vosselman, G.** *Slope based filtering of laser altimetry data.* *Int. Archives of Ph. and RS*, XXXIII, (B3/29), ISPRS-Congress, Amsterdam, 2000.

