Uma Metodologia para Geração de Modelos de Elevação a partir de Curvas de Nível

Roberto de Beauclair Seixas Luiz Henrique de Figueiredo Claudio Antonio da Silva
Paulo Cezar Pinto Carvalho

IMPA–Instituto de Matemática Pura e Aplicada
VISGRAF–Laboratório de Visualização e Computação Gráfica
Estrada Dona Castorina 110, 22460-320 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
lhf,tron,cads,pcezar@visgraf.impa.br

Abstract. Modelos digitais de terrenos baseados em elevação são muito utilizados e possuem inúmeras aplicações. Portanto, técnicas que possibilitem a conversão de outras representações para modelos de elevação são extremamente importantes. Neste trabalho, apresentamos uma metodologia em desenvolvimento para geração automática de modelos de elevação a partir de curvas de nível, com uma resolução refinada de acordo com a necessidade do usuário. Além disso, é apresentada uma breve descrição dos problemas envolvidos nesta metodologia.

1 Introdução

Há grande demanda por modelos digitais de terreno baseados em elevação (DEM, *Digital Elevation Models*) e portanto é importante a conversão de outros modelos de terreno para DEM. Um grande volume de dados de terreno está disponível na forma de curvas de nível, principalmente os obtidos manualmente a partir de fotos aéreas [2]. O objetivo desse trabalho é estudar algoritmos de conversão de dados de terreno em curva de nível para DEM.

Uma técnica muito usada para conversão para DEM é amostrar as curvas de nível, triangular os pontos amostrais, obtendo uma aproximação linear por partes do terreno, que é então amostrada numa grade regular, gerando um DEM [2, 6]. O principal problema com essa técnica é que as duas amostragens efetuadas introduzem erros. Como resultado, nem sempre é possível capturar todas as feições importantes do terreno. Um efeito disso seria a aparição de abruptas declividades no terreno.

Neste trabalho, propomos estudar o desempenho de algoritmos de interpolação de DEM diretamente a partir das curvas de nível. Em particular, pretendemos focar em algoritmos "naturais", baseados em evolução geométrica (usando morfologia matemática [1]) ou pseudo-física (usando equações diferenciais parciais [6]), que são os mais adequados a esse tipo de problema, por produzirem superfícies mais suaves. Esse estudo vai usar dados reais de alta resolução, como subsídio para a implantação de um banco de dados de modelos de terrenos cobrindo todo o território nacional, um projeto do Ministério da Ciência e Tecnologia.

O objetivo deste trabalho é descrever um *pipeline* completo para a conversão de dados de curvas de nível, armazenadas em formato digital vetorial, para um modelo de elevação final, com resolução definida pelo usuário. Apesar da etapa de interpolação de alturas ser naturalmente a mais importante nesse *pipeline*, é também importante a interpretação dos dados originais, cuja qualidade e processo de aquisição estão fora do nosso controle.

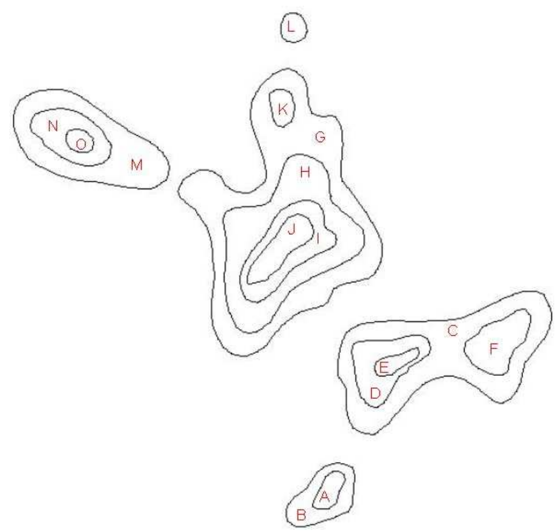

Figura 1: Exemplos de curvas de nível.

2 Descrição do problema

Discutiremos o problema numa forma mais abstrata de modo a identificar os principais pontos a serem atacados, ainda sem uma formulação rigorosa.

Feita a resalva acima, os dados do problema podem ser descritos da seguinte forma: É dado um conjunto de curvas poligonais simples e fechadas, representando as curvas de nível de um terreno (Figura 1). Freqüentemente, é dado também um conjunto de *pontos notáveis*, com cotas associadas a cada ponto. Algumas das curvas têm *cotas* as-

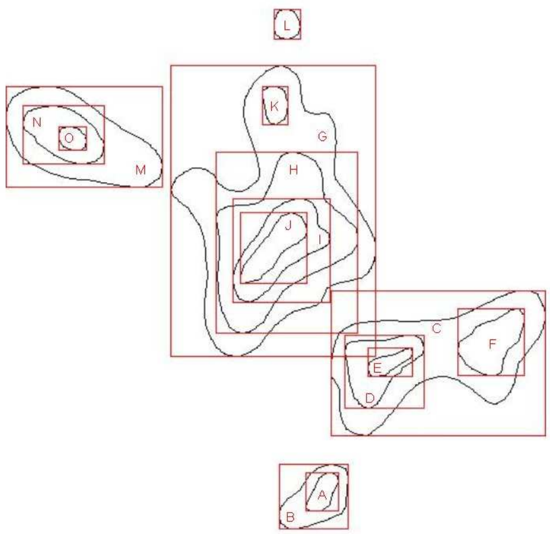

Figura 2: Envoltórias das curvas de nível da Figura 1.

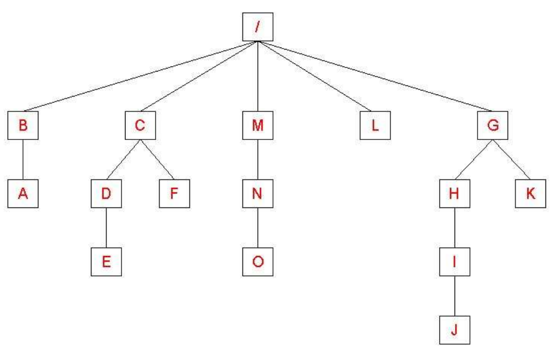

Figura 3: Árvore das curvas da Figura 1.

sociadas a elas, mas nem todas. Tipicamente, um mapa de nível contém curvas correspondentes a níveis de 20 em 20 metros, mas somente as curvas correspondentes aos níveis múltipos de 100 são explicitamente cotadas.

O problema então é, a partir dos dados acima, calcular a altura de todos os pontos numa grade regular posta sobre o terreno. O modelo de elevação (DEM) que queremos é dado pelo conjunto dos valores dessas alturas, organizados em forma matricial.

Como nem todas as curvas de nível estão cotadas, o primeiro problema que aparece é determinar as cotas das curvas não cotadas. Naturalmente, a intenção de quem fez o mapa é que ele não seja ambíguo, isto é, que seja possível *deduzir* as cotas que faltam.

3 Árvore Topológica de Alturas

Como mencionado anteriormente, a maioria das curvas em mapas de curvas de nível (isolinhas) não possuem informação de altura associada [5]. Contudo, baseado na análise das que possuem tal informação, fornecida através de textos espaçados em intervalos regulares, e no conhecimento prévio do incremento adotado entre as curvas, por exemplo de 20 em 20 metros, pode-se deduzir a cota das curvas restantes. Porém, este procedimento "visual" de interpretar os mapas de curvas de nível não pode ser implementado diretamente no computador.

Para obter uma solução automática, desenvolvemos uma técnica de ordenação hierárquica das curvas baseada nas relações de inclusão das envoltórias do seu contorno (*bounding-box*), como ilustrado na Figura 2. A partir dessa árvore, e da classificação (mãe, filha ou irmã), podemos eficientemente definir as cotas das curvas, mesmo as que não possuem tal informação.

Desta forma, classificamos uma curva A como sendo filha, ou seja, interna e de nível superior, de outra curva B, quando a curva A possui sua envoltória completamente contida na envoltória da curva B. Neste caso, dizemos que B é *mãe* de A e que A é *filha* de B. Quando as curvas não possuem relação de mãe e filha (contido ou contém) entre suas envoltórias, dizemos que tais curvas são *irmãs*. Após essa classificação, temos as curvas organizadas hierarquicamente em uma árvore de alturas (Figura 3).

É importante observar que devido à estrutura utilizada na construção da árvore topológica, basta que a altura de qualquer nó seja identificada, para que todas as demais alturas sejam determinadas. Por exemplo, podemos dizer que a altura da raiz da árvore se encontra ao nível do mar.

Embora essa técnica pareça ser coerente e exata, o teste de envoltória não é suficiente para classificar corretamente uma curva como sendo filha de outra em todos os casos, como mostra a Figura 4. Assim, verificou-se a necessidade de acrescentar ao teste de filho por envoltória um teste adicional baseado em ponto-em-poligono para garantir uma correta classificação [4, 7].

4 Interpolação Morfológica

O principal problema na geração de mapas de altura a partir de curvas de nível é determinar os dados de altura *entre* as curvas. Este fato nos sugere imediatamente a necessidade de algum método de interpolação, de modo que a partir de duas curvas adjacentes possamos determinar a altura exata entre elas. Embora este raciocínio esteja correto, não é qualquer método de interpolação que pode ser utilizado.

Os métodos de interpolação aritméticos mais comuns não podem ser usados visto que não conseguem resolver casos que aparecem frequentemente nas representações por curvas de nível. Como exemplo, considere a Figura 5,

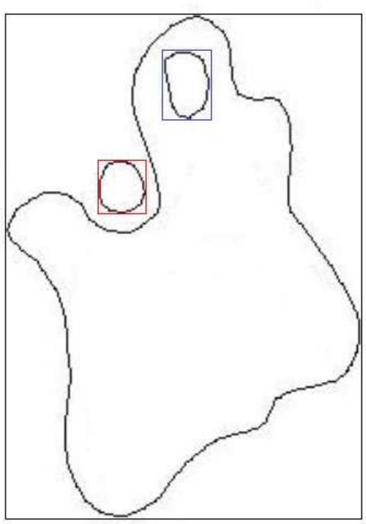

Figura 4: Exemplo de falha no teste de envoltórias.

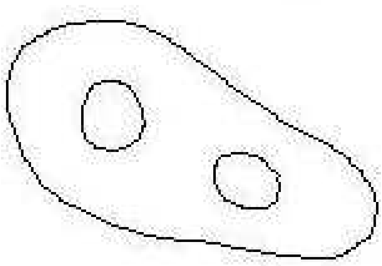

Figura 5: Interpolação aritmética para curvas adjacentes.

onde temos duas curvas adjacentes de mesma altura. A interpolação entre tais curvas seria dada pela média das alturas, ou seja, o resultado seria que o ponto médio entre as curvas teria a mesma altura, o que geraria uma incoerência.

Desta forma, focalizamos nossos estudos em um método baseado em evolução geométrica, usando morfologia matemática [1]. Neste método, as curvas existentes são forçadas a se expandirem naturalmente (usando o operador de dilatação) até colidirem umas com as outras. Na região da colisão, acaba-se por definir novas curvas que são o resultado da interpolação entre as curvas originais, com a altura determinada pela média aritmética das alturas destas curvas. Tal técnica mostrou-se natural e eficiente; os resultados podem ser vistos na Figura 9.

5 Detalhes de Implementação

A metodologia adotada para a interpolação de um modelo de elevação a partir das curvas de nível requer as seguintes etapas bem definidas ilustradas na Figura 6.

1. Leitura das curvas de nível;
2. Classificação das curvas lidas;
3. Fechamento das curvas abertas;
4. Inserção das curvas na árvore de alturas;
5. Atribuição de alturas a todas as curvas;
6. Rasterização das curvas;
7. Interpolação das alturas nos pontos intermediários.

A primeira etapa consiste na leitura dos dados do terreno, que no nosso caso estão em arquivos no formato DGN. O formato DGN é um formato proprietário da INTERGRAPH e bastante utilizado em geoprocessamento, visto que pode ser utilizado para armazenar diferentes tipos de dados geográficos. Essa etapa não é trivial pois o formato DGN possui uma estrutura complicada e não é completamente documentado. Apesar disso, a documentação encontrada foi suficiente para lermos os arquivos de teste.

A segunda etapa promove uma filtragem inicial dos dados de modo a classificar as curvas quanto ao aspecto topológico: fechadas, abertas ou ponto cotado. A importância desta etapa é que nem todas as curvas podem ser inseridas diretamente na árvore, o que somente deve ser feito para curvas cujas propriedades topológicas estejam completamente especificadas, o que é válido apenas para as curvas fechadas. As curvas classificadas como abertas são submetidas ao processamento da etapa de fechamento, onde são "completadas" (fechadas) e, em seguida, inseridas na árvore.

Para fins de otimização, a primeira e a segunda etapas ocorrem simultaneamente: os dados são classificados à medida que vão sendo lidos.

Uma vez tendo as curvas classificadas, podemos inserir diretamente na árvore as curvas fechadas, visto que estas possuem sua propriedades topológicas bem definidas, na etapa de ordenação.

As curvas classificadas como abertas, mas não de fronteira, são submetidas a uma etapa de fechamento utilizando a técnica clássica de interpolação de Hermite [3]. Dois exemplos desse fechamento estão ilustrados na Figura 8.

Uma vez fechadas, tais curvas fornecem informação suficiente para que todos os nós da árvore possam ter suas cotas corretamente atualizadas, pois a estrutura da árvore permite que, a partir de uma altura determinada em um nó, se chegue às alturas dos outros nós.

Desta forma, com a árvore completamente preenchida com as curvas, rasterizamos as curvas de modo a poder aplicar a técnica de interpolação de contornos usando morfolo-

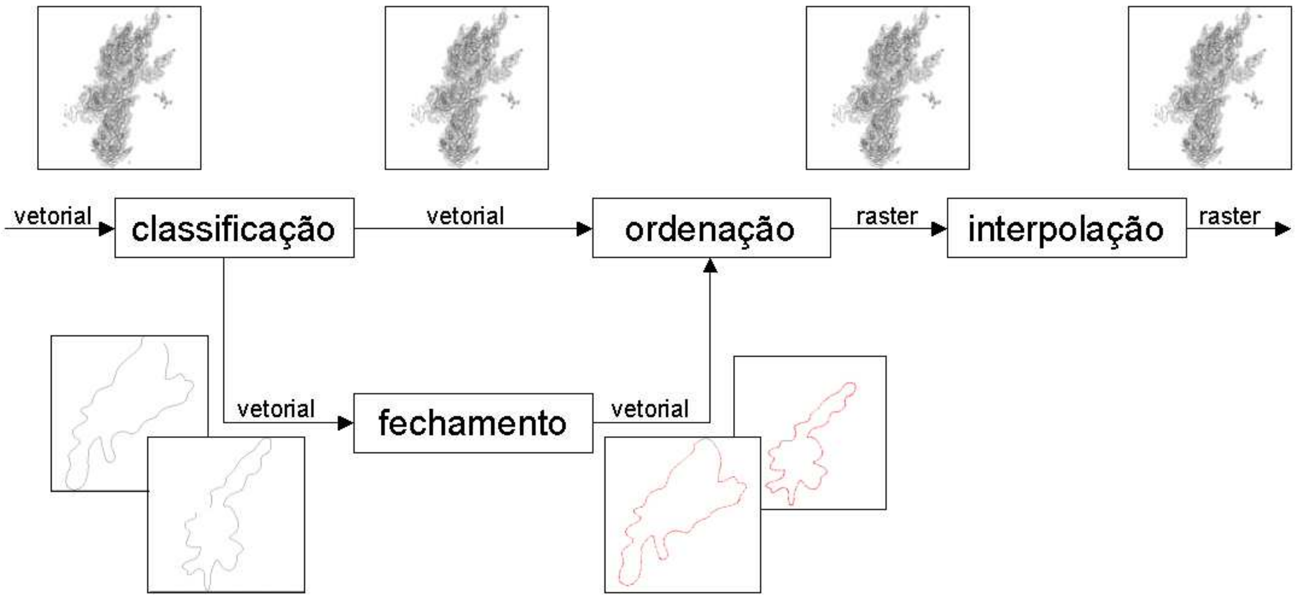

Figura 6: Principais etapas do processo.

gia matematica, diretamente no espaço da imagem. Com isso, completamos nosso *pipeline* com a etapa final, onde a imagem rasterizada (representação matricial do dado vetorial), constituída por todas as curvas presentes na árvore, é interpolada, gerando com isso um mapa de alturas completamente denso entre as curvas de nível ou com a densidade desejada.

A separação do *pipeline* em etapas bem definidas permite que o desenvolvimento possa ser feito separadamente e somente integrado quando todas as partes estiverem suficientemente testadas.

5.1 Problemas Encontrados

- Interpolação linear não é adequada para o problema, conforme discutido anteriormente.
- Curvas de fronteira: Como citado na Seção 3, problemas topológicos, a representação por curvas de nível deve permitir que a altura das curvas não cotadas possa ser deduzida a partir das curvas cotadas. Entretanto, algumas curvas que ultrapassam os limites do mapa podem nos levar a interpretações incorretas dado o seu caráter ambíguo, como mostra a Figura 7. Tais curvas foram denominadas de fronteira e, no momento, não estão sendo tratadas. Esperamos que elas possam ser resolvidas normalmente quando compostas em outro mapa adjacente que a complete.
- Dificuldade de Fechamento: As curvas originalmente cotadas vêm dividida em partes não contínuas, devido a restrições no formato DGN ou à forma como o arquivo foi gerado originalmente. Essa divisão é feita para plotar um *label* correspondente à altura, ao longo da curva. Isso dificulta o processo de identificação de quais partes formam cada curva. Porém, como já citado, as curvas cotadas têm cota múltipla de 100, o que nos permite assumir que elas se encontram entre curvas fechadas (espaçadas em saltos de 20 em 20 metros). Utilizando tal informação, podemos determinar as partes que estão entre determinados saltos e assumí-las como fazendo parte da mesma curva. Assim, basta ordená-las e aplicar a técnica de fechamento.

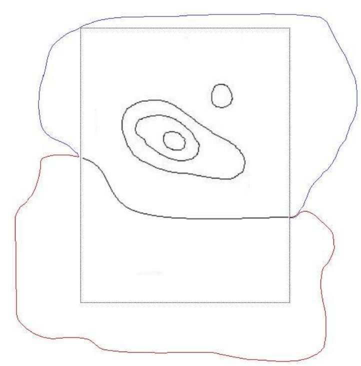

Figura 7: Problema de ambigüidade das curvas de fronteira.

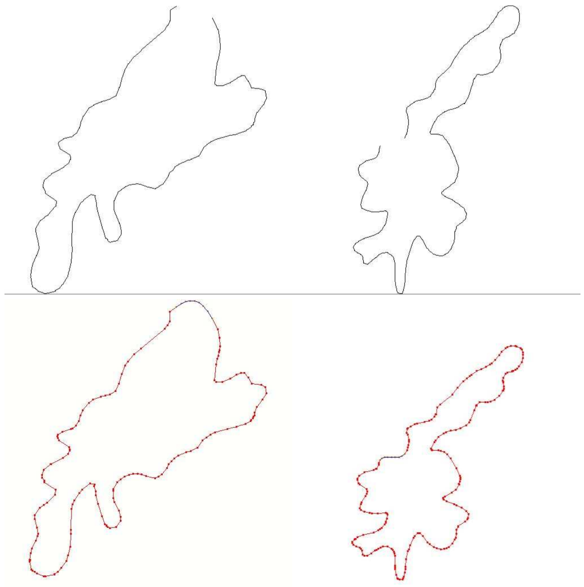

Figura 8: Exemplos de fechamento.

6 Conclusão

A técnica de interpolação de contornos baseada em morfologia matemática [1] mostrou-se bastante eficiente e precisa para os dados analisados. A Figura 9 mostra alguns passos no processo de geração de curvas intermediárias utilizando os operadores morfológicos.

Embora o problema em questão seja bem definido—isto é, converter representações de modelos de terrenos baseadas em curvas de nível para modelos de elevação—foi possível comprovar que nem todos os métodos de interpolação são aplicáveis a dados deste tipo, tal como foi discutido anteriormente para os métodos de interpolação aritmética na Seção 4.

Assim, como alternativa, testamos a solução baseada em operadores morfológicos que promove curvas intermediárias mais naturais e coerentes com os terrenos originais. Os resultados obtidos mostraram-se precisos o suficiente para comprovar que a técnica é eficiente e eficaz, como pode ser visto na Figura 9.

Embora os resultados apresentados até o presente momento sejam satisfatórios, é importante salientarmos que o trabalho encontra-se em desenvolvimento e que ainda contará com o tratamento do problema de ambigüidade no processamento das curvas de fronteira. Além disso, é necessário incluir um recurso de ajuste de resolução do mapa de elevação, de modo que o usuário possa escolher a resolução que melhor se adapte às suas necessidades.

Pretendemos também comparar o desempenho do método de interpolação morfológica com métodos de interpolação basedos em equações diferenciais parciais [6]. Para isso, vai ser necessário também desenvolver procedimentos para comparação quantitativa dos resultados obtidos, além da comparação visual.

Referências

[1] W. Barrett, E. Mortensen, and D. Taylor. An Image Space Algorithm for Morphological Contour Interpolation. In *Proceedings of Graphics Interface'94*, pages 16–24, 1994.

[2] G. Câmara, M. A. Casanova, A. S. Hamerly, G. C. Magalhães, and C. M. B. Medeiros. *Anatomia de Sistemas de Informações Geográfica*. X Escola de Computação, 1996.

[3] G. Farin. *Curves and Surface for Computer Aided Geometric Design*. Academic Press, Inc, 1988.

[4] J. D. Foley, A.van Dam, S. K. Feiner, and J. F. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley, 1990.

[5] M. Garland and P. S. Heckbert. Fast Polygonal Approximation of Terrains and Height Fields. Technical Report CMU-CS-95-181, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1995. `http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/CMU/scape/scape.pdf`.

[6] M. B. Gousie and W. R. Franklin. Converting Elevation Contours to a Grid. In *SDH'98, Vancouver*, 1998. `http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/wrf/research/p/contour.pdf`.

[7] F. P. Preparata and M. I. Shamos. *Computational Geometry: An Introduction*. Springer-Verlag, 1985.

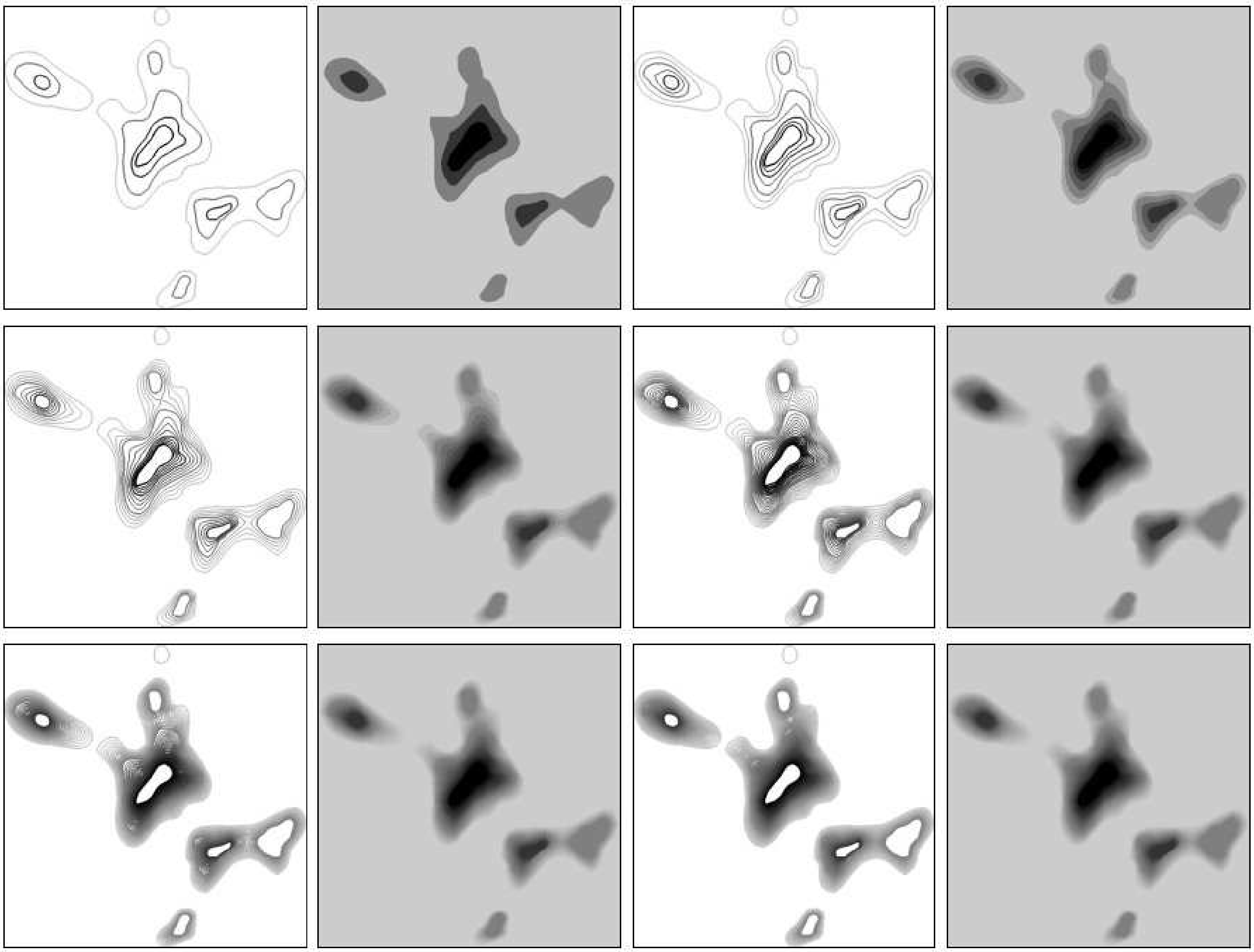

Figura 9: Etapas do resultados.