

Métodos para Criação de Terrenos Baseados em Traços

Leandro Moraes V. Cruz
Vision and Graphics Laboratory
Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA
Rio de Janeiro, Brasil
wwwimpa.br/~lcruz

Luiz Velho
Vision and Graphics Laboratory
Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA
Rio de Janeiro, Brasil
lvelho@impa.br

Abstract—In this paper, we present an analysis of the state of the art in synthesis and visualization of terrain. We aim to identify opportunities, challenges and trends in modeling and visualization of terrain. And we identify possible future works. These studies take advantage of the opportunities of exploring the aspects of sketch-based modeling, parallel processing on GPU's, the use of real topographic data, among others.

The synthesis methods can be grouped into *ontogenetic* methods, which seek to build visually satisfactory models, and *teleological* methods, which seek to build geomorphologically coherent models. We will show the state of the art of this methods. Besides of this, we will propose a way to specify a terrain from strokes, and how to synthesize a landform with this sketch.

Besides of the specification process and synthesis of landforms, we also addressed some visual aspects such as representation of land with a mesh in multi-resolution, which was adapted according to the point of view, and topics related to texture.

Resumo—Apresentaremos neste trabalho uma análise do estado da arte sobre criação e visualização de terrenos, visando identificar possibilidades, desafios e tendências, e apontar para possíveis trabalhos futuros. Essas pesquisas aproveitam a possibilidade de explorar aspectos de modelagem (representação, especificação e síntese) de terrenos baseada em sketches, processamento paralelo em GPUs, utilização de dados topográficos reais, e outros.

Os métodos de síntese de terrenos podem ser agrupados em *ontogenéticos*, que buscam construir modelos visualmente satisfatórios, e *teleológicos*, que buscam construir modelos geomorfologicamente correto. Apresentaremos o estado da arte desses métodos. Além disso, proporemos uma forma para especificar relevos, a partir de traços, e para sintetizá-lo.

Além do processo de especificação e síntese, também abordamos alguns aspectos de visualização como representação de um terreno com uma malha em multirresolução, adaptada de acordo com o ponto de vista, e tópicos referentes a textura.

Keywords-Modelagem e Visualização de Terrenos;

I. INTRODUÇÃO

Uma motivação para o desenvolvimento deste trabalho é que, embora não seja uma área recente, ainda se tem feito muita pesquisa em modelagem (especificação, representação e síntese) e visualização de terrenos. Desta forma, a partir de uma análise do estado da arte, procuramos identificar as principais possibilidades, desafios e tendências da área.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Um levantamento bibliográfico sobre os principais trabalhos na área de modelagem e visualização de terrenos.
- Conceituação de um *framework* para criação de terrenos utilizando sketches.
- Identificação dos principais requisitos de uma aplicação de síntese e visualização de terrenos.
- Construção de uma biblioteca e de aplicações para síntese e visualização de terrenos, com uma abordagem intuitiva para o usuário e capaz de gerar modelos realistas.

Os materiais desenvolvidos nesta pesquisa, tais como, o texto original da dissertação; um vídeo explicativo; as aplicações desenvolvidas; um relatório técnico, com coletâneas de informações sobre biomas e relevos; uma base de dados com uma coletânea de fotografias de relevos, formas rochosas, vegetações, paisagens, etc; estão disponíveis on-line [1].

A modelagem de ambientes virtuais busca sintetizar esses ambientes realisticamente. Neste contexto, “realismo” é um termo ambíguo. Pode significar qualidade visual ou correteza geomorfológica. Muitos métodos procedurais produzem modelos que, embora visualmente satisfatórios, são geomorfologicamente incorretos. Mediante essa dualidade, procuramos propor métodos com um compromisso em gerar modelos visualmente satisfatórios, com uma certa coerência geomorfológica, apresentando um desempenho razoável, sem acrescentar grandes dificuldades de implementação.

O termo “modelagem de terrenos” é utilizado em dois contextos distintos: criação de modelos geométricos para representar terrenos reais; sistematização do processo de criação de modelos sintéticos de terrenos. Neste texto, o termo “modelagem de terrenos” possui o segundo significado. Para tal, procuramos abordar as técnicas de representação, especificação e síntese de terrenos.

Logo, criar um terreno significa definir sua geometria e seus atributos visuais. Essa dualidade é coerente com a presente na natureza. O que percebemos de um terreno são suas características geométricas, dada pela topografia, e as visuais, determinadas pelo solo e vegetação.

Apresentaremos, neste trabalho, os principais resultados de modelagem de terrenos, na Seção II, especificação usando sketches, na Seção III; visualização, na Seção IV, autoria, na Seção V. Na conclusão, iremos rever os principais resultados e apontar os trabalhos futuros.

II. MODELAGEM DE TERRENOS

Mandelbrot [2], [3] foi o primeiro a usar modelos estocásticos, baseados em Movimento Browniano, para gerar objetos semelhantes a morros (ou cadeia de morros). Em seguida, diversas técnicas procedurais para geração de terrenos, baseadas em geradores de ruídos fractais, foram introduzida por Fournier et al. [4], Perlin [5] e Miller [6]. Musgrave et al. [7] apresentaram técnicas para simular erosão, baseadas em fenômenos hidráulicos e térmicos, capaz de criar vales e encostas erodidas. Benes e Forsbach [8] apresentaram uma representação para terrenos, baseada em aspectos geológicos, combinando a representação por mapa de altura e por voxel.

Gavin Miller [6] apresentou a representação de terrenos como um mapa de altura (*DEM: Digital Elevation Model*). A maioria das partes de um terreno pode ser representada como gráfico de uma função. Porém, essa representação não suporta certas saliências rochosas (*overhang*), cavernas e encostas verticais. Gamito e Musgrave [9] apresentaram uma abordagem capaz de representar terrenos com tais estruturas.

A utilização de modelos fractais para gerar objetos naturais provoca uma discussão da qual se pode argumentar amplamente a favor e contra. A linha que defende a utilização de superfícies fractais para modelar terrenos é a *Modelagem Ontogenética*. O termo *ontogênese* pode ser compreendido como algo baseado em características morfológicas visíveis (dicionário Webster Collegiate). Em contrapartida, outros métodos procedurais baseados em fenômenos físicos seguem a linha de *Modelagem Teleológica*. O termo *teleologia* consiste em algo baseado em estudos de evidências de formas na natureza (segundo o mesmo dicionário).

Uma das principais motivações para a área de modelagem de terrenos é gerar modelos realistas. O termo “realista” é subjetivo. Chamaremos de realista às formas perceptualmente semelhantes aos elementos da natureza. Fractal é uma primitiva muito utilizada na modelagem de terrenos, pois é perceptualmente semelhante a muitas formas naturais. Embora muito úteis em certos casos, os fractais não são adequados para modelar todos os tipos de terrenos e em qualquer escala. Os principais trabalhos na linha de modelagem ontogenética baseam-se em fractais. Uma possibilidade para a modelagem de terrenos é identificar a dimensão fractal de um relevo real e sintetizar outro modelo de mesma dimensão (e portanto, com as mesmas características estatísticas). Dessa forma é possível “imitar” características geomorfológicas de relevos reais.

A motivação da modelagem teleológica é definir técnicas para geração de terrenos geomorfológicamente corretas. Musgrave [7] apresentou algumas técnicas para síntese de terrenos baseando-se em simulações físicas. Outro trabalho nesta linha foi apresentado por Hnaidi et al. [10], mostrando como usar uma equação de difusão no processo de geração de terrenos. A partir de curvas que representam elementos como rios, leitos e falésias, utiliza-se um algoritmo de difusão para construir a superfície do terreno. Para o processo de síntese é necessário associar à cada curva elementos como: altura da superfície sobre as curvas, o gradiente e os parâmetros de controle

de ruído. Desta forma, o método é capaz de difundir essas restrições para o resto do modelo.

Outra abordagem é aplicar um método de modelagem sobre um dado topográfico real. Existem diversas bases de dados que apresentam essas informações. Entre elas podemos citar o *Google Earth*, o projeto *Brasil em Relevo, U.S. Geological Survey*, entre outros. Belhadj apresentou [11] como, a partir de um modelo de elevação real, sintetizar informações em escalas mais refinadas. Ele utilizou métodos fractais para gerar certas características geomorfológicas predeterminadas. Zhou et al. [12] apresentaram um trabalho que gera um modelo de terreno a partir de um exemplar de um DEM real e sketches (que determinam características do terreno, tais como, picos das montanhas e vales). Eles usam o *Algoritmo de Reconhecimento de Perfil e Particionamento de Polígonos* (PPA) para extrair os picos e vales do exemplar. Com essa informação, eles sintetizam um terreno geomorfológicamente parecido com o exemplar e com as características marcadas com o sketch.

Apesar dos trabalhos supracitados, ainda se explorou pouco as possibilidades de utilizar dados reais para modelagem de terrenos. Com esses dados é possível caminhar na direção de resolver uma das grandes dificuldades da modelagem teleológica, que é encontrar uma técnica para modelar classes específicas de relevos. Eles fornecem a geometria e alguns atributos visuais de todas as classes de relevos existentes na Terra. Assim é possível utilizá-los diretamente ou para determinar uma classe de instância de parâmetros dos métodos de modelagem para cada classe de relevos.

Uma tendência atual é explorar o potencial do paralelismo das GPUs na modelagem e de visualização de terrenos. Anh et al. [13] e St’ava et al. [14] apresentaram alguns trabalhos que sintetizam terrenos simulando fenômenos de erosão. Carpentier e et al. [15] apresentaram uma técnica que sintetiza um modelo de terreno, considerando algumas características geomorfológica, auxiliado pelo usuário. Schneider et al. [16] apresentaram uma técnica para editar, sintetizar e renderizar paisagens infinitas utilizando as GPUs. No processo de Visualização, Losasso et al. [17] apresentaram uma técnica para visualizar o terreno em multirresolução. Neste trabalho, os autores propõem um método que divide o modelo em regiões com diferentes resoluções, e a malha apresenta uma amostragem regular em cada uma dessas regiões. Nesta linha, Hu et al. [18] apresentaram um trabalho para visualização de objetos (não necessariamente terrenos), cuja malha era subdividida adaptativamente, baseando-se no pondo de vista.

Modelar um terreno muito extenso é um processo inerentemente trabalhoso. Modelar um terreno respeitando características geomorfológicas é ainda mais difícil. Conseguir meios para especificar as características desejadas de cada região do terreno de modo intuitivo e simples, satisfazendo uma geomorfologia adequada, é um desafio que motiva pesquisas na área, inclusive é uma das motivações deste trabalho. Nas próximas seções abordaremos alguns tópicos que caminham na direção de ser uma solução para o problema de especificar, de um modo intuitivo, grandes extensões de terreno, determinando as características topográficas e geomorfológicas desejadas.

III. ESPECIFICAÇÃO DE TERRENOS UTILIZANDO TRAÇOS

Assumiremos, nesta seção, que os terrenos serão representados por um mapa de altura (DEM). Logo, para cada ponto do domínio do DEM precisamos definir sua respectiva altura. Nesta seção, apresentaremos algumas propostas para criar a função de altura $h : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ a partir de um conjunto de sketches.

Classificamos os sketches em três categorias: *base*, *silhueta* e *linhas guias*. As duas primeiras referem-se às curvas da base e da silhueta do relevo (visto por um ponto de vista específico). A terceira são curvas específicas para marcar certas características do relevo. Neste trabalho, propomos uma forma de especificação que propicia criar relevos com cumes mais genéricos do que curvas contidas em um plano ortogonal ao chão. Desta forma, definimos a linha guia é uma curva plana, ou uma rede de curvas conectadas.

Um dos primeiros trabalhos, utilizando sketches na criação de relevos, foi o *Harold* [19]. Ele apresenta uma ferramenta para criação de ambientes virtuais, editando o relevo e adicionando outros elementos na cena através de billboards.

Um trabalho recente, que também constrói um relevo a partir de um sketch da silhueta, é o *Terrain Sketching* [20]. Ele apresenta uma metodologia mais completa do que a do Harold. Nesse trabalho, além de criar a silhueta, o usuário pode editar essa curva, assim como editar a curva da base (após definir a silhueta é calculado uma base inicial) e a linha guia. Com esses elementos é possível criar relevos realistas. Analisando esses resultados, propomos uma nova abordagem para especificar um relevo. Como a possibilidade de definir bases e linhas guias não triviais, no *Terrain Sketching*, possibilitou gerar resultados interessantes, experimentamos levar mais adiante a utilização destes elementos para especificar um relevo.

A. Bases e Linhas Guias

Um método simples para gerar um morro, a partir da análise da curva da base (B), é construir uma função h , aplicada aos pontos $p \in \Omega$, onde Ω é a região interna à curva da base, baseando-se na distância de p até sua projeção em B . Projetar p em B significa obter $\min_{q \in B} |p - q|$.

A função $h : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $h(p) = \inf_{q \in B} |p - q|$, está bem definida (embora a projeção não seja única, a distância é) e é contínua. Além disso ela vale zero nos pontos da base e assume seu valor máximo sobre o eixo medial. A Figura 1 mostra um exemplo de relevo gerado com essa função.

Podemos compor a função h com uma função contínua $w : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ de ponderação, a qual chamaremos de *Função de Perfil*. Neste caso, $w \circ h$ ainda é uma função contínua. Podemos usar essas funções para gerar morros com características distintas. Além de controlar certas características geomorfológicas do terreno, ainda podemos variar a função de perfil para obter classes distintas de relevos.

Neste caso, não consideramos nenhuma informação sobre a linha guia. A linha guia é formada por pontos característicos, especificados pelo usuário, que semanticamente carrega informações como cumes, vales, bases superiores, etc. É possível gerar uma função de altura h semelhantemente, interpolando

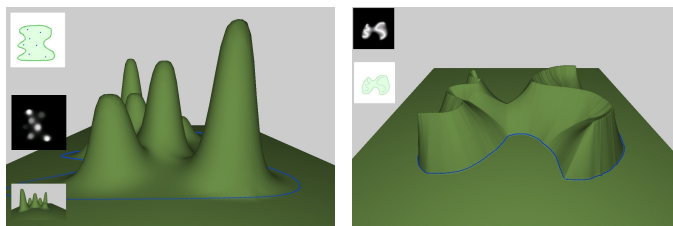


Figura 2. Relevos gerados com base e linhas guias.

distâncias dos pontos até a base e a linha guia. Esses métodos estão divididos em dois casos: quando a linha guia é um conjunto discretos de pontos, exemplificado na Figura 2a, que representam topos e bacias; e quando ela é uma curva contínua, conforme Figura 2b, que pode representar cumes, vales, bases superiores, bocas de vulcões, etc.

IV. VISUALIZAÇÃO DE TERRENOS

Ao modelar um ambiente virtual é necessário definir *quais* elementos serão representados e *como* serão. Podemos dividir os elementos em duas classes: os *Modelos da Paisagem* e os *Fenômenos Atmosféricos*. A escolha do que será representado é inerente aos propósitos da aplicação. A topografia da Terra pode ser representada por uma malha. A visualização do solo e da vegetação podem ser feita através de texturas. Dependendo do contexto, pode ser necessário utilizar uma representação 3D para os objetos da paisagem, billboards ou texturas.

Abordamos apenas visualização do terreno com uma textura referente ao solo/vegetação. Uma discussão ampla sobre modelagem de plantas é apresentada por Prusinkiewicz e Lindenmayer [21]. Kelly e McCabe [22] apresentam uma visão geral sobre modelagem de elementos urbanos.

Para visualizar o terreno precisamos transformar o DEM em uma malha. Utilizamos duas formas para tal: malha regular e malha em multirresolução. Um caso particular para malhas em multirresolução são as superfícies de subdivisão adaptativa. Neste caso, podemos considerar cada nível da subdivisão como uma resolução. Algoritmicamente, o processo de visualização de uma superfície, representada por uma malha regular, é simples. Porém, em terrenos de grandes extensões esse processo é muito caro, haja visto que uma enorme quantidade de triângulos e seus atributos visuais deverão ser renderizados.

Diversos algoritmos podem ser usados para obter uma malha adaptada. Podemos classificá-los em duas categorias: *dependentes do ponto de vista* e *dependentes do modelo*. Um critério dependente do ponto de vista é a resolução do triângulo ser inversamente proporcional à distância deste até a câmera. Um critério de adaptação dependente do modelo é determinar que triângulos em regiões de baixa curvatura tenham resolução mais baixa do que aqueles em áreas de alta curvatura. Adotamos neste projeto uma malha de subdivisão adaptativa 4-8 (os vértices têm valência 4 ou 8) [23], [24].

Hoppe [25] apresentou uma abordagem para refinamento de malhas, baseando-se no ponto de vista. Hu et al. [18] apresentaram uma adaptação desta técnica para as GPUs. Ainda há técnicas que divide o terreno em regiões com

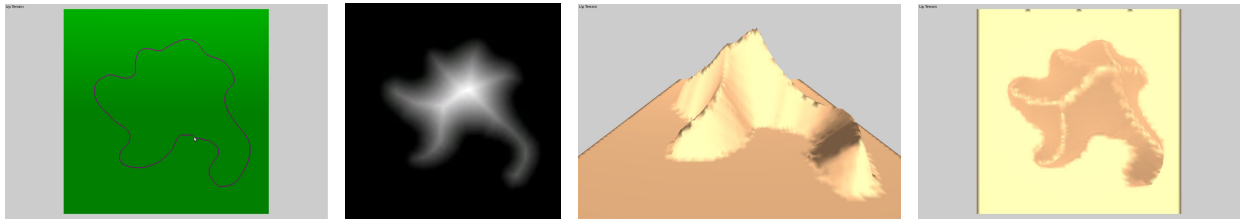


Figura 1. Relevo gerado com função $h(p) = \inf_{q \in B} |p - q|$.

diferentes resoluções. No interior de cada região, a malha é regular. Losasso e Hoppe [17] apresentaram um trabalho que divide o terreno em grids regulares de diferentes resoluções.

Além da geometria, os aspectos visuais são responsáveis pela sensação de realismo do ambiente modelado. Podemos considerar como aspecto visual de um ambiente a iluminação (local e/ou global), a atmosfera [26] e a textura do modelo.

A forma mais simples de determinar um atributo visual é fixar uma função que associe, uma cor à cada ponto do modelo. Existem métodos mais sofisticados que utilizam funções específicas para a síntese [27]. Um exemplo de método procedural para sintetizar textura é o Ruído de Perlin [5]. Ebert et al. [27] apresentaram esta, entre outras técnicas de síntese de textura procedural.

Ao utilizar uma imagem como textura é comum que a extensão do modelo seja maior do que a imagem a ser texturizada na escala adequada. Dessa forma é muito comum sintetizar uma textura mais ampla tomando a imagem original como exemplar [28], [29] e [30]. Outra técnica muito comum em síntese de textura é criar um modelo em multiescalas [31]. O problema de mapeamento de textura é outra grande questão da área. Ao definir a imagem a ser texturizada em um terreno é necessário mapear os vértices da malha com sua respectiva coordenada de textura. Maillot et al. [32] apresentaram uma solução interativa para este problema. Outra referência da área é Hechbert [33].



Figura 3. Síntese de cor por altura.

V. AUTORIA DE TERRENOS

Acreditamos que o potencial da utilização de sketches na especificação de grandes terrenos ainda não foi devidamente explorado. A maioria dos trabalhos que utilizam sketches são bons para especificar relevos individualmente. Dessa forma, são bons para um artista criar uma paisagem pequena. Em contrapartida, os métodos procedurais são bem rápidos para construir grandes paisagens, mas oferecem menos controle ao artista. Acreditamos que ainda há muito o que se explorar na combinação dessas duas abordagens.

Os principais softwares utilizados para geração de relevos normalmente utilizam métodos procedurais para gerar uma paisagem. Além do procedimento automático, permitem ao artista adicionar alguns elementos como certos relevos, árvore, águas, etc. Eles permitem fazer edições no terreno utilizando ferramentas relacionadas a operações geométricas ou visuais. Alguns exemplos de aplicações profissionais para criação de terrenos são: Panorama Terrain Editor, Terragen, VistaPro, World Builder e Bryce.

A. Sketch-based Terrain

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi implementado uma ferramenta para gerar terrenos baseando-se em sketches, denominada *Sketch-Based Terrain*. Essa é uma biblioteca, escrita em C++, utiliza recursos do Qt, para definir de objetos de interfaces; OpenGL para renderização; e apresenta módulos para modelagem e visualização de terrenos. Com essa ferramenta desenvolvemos algumas aplicações para testar

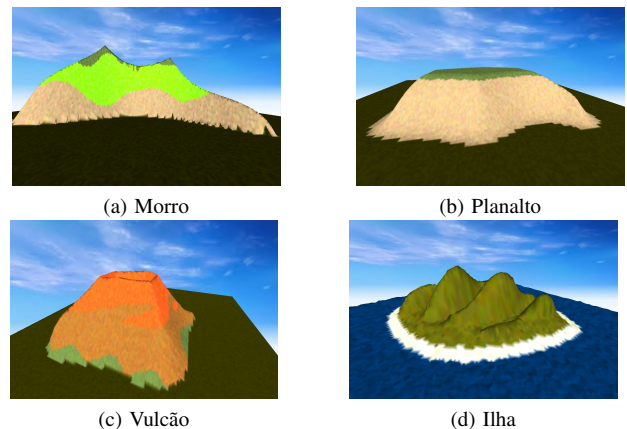


Figura 4. Tipos de relevos.

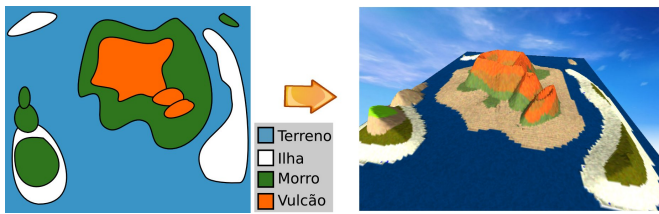


Figura 5. Paisagem colorida.

alguns conceitos apresentados. O foco da principal aplicação é apresentar um modelador de terrenos, baseado em sketches, com interface fácil de manipular e aprender. Consideramos como principais contribuições dessa ferramenta apresentar simultaneamente múltiplas visões do terreno, o que possibilita uma melhor compreensão do modelo; apresentação de sugestões de possíveis relevos, associado a um sketch; consulta de relevos em uma base de dados, previamente preenchida.

Criar um terreno consiste em especificar e posicionar um conjunto de relevos. O processo de especificação de um relevo particular consiste em determinar os sketches e, eventualmente, alguns parâmetros para adição de detalhes. Os sketches adotados para gerar um relevo são os da base, as linhas guias e as silhuetas. Os relevos implementados foram: morros, planaltos, vulcões e ilhas.

Um conjunto de relevos pode ser agrupado de diferentes formas. A forma mais simples é considerar o terreno como uma paisagem, aonde cada relevo tem uma semântica equivalente. Nesse caso um terreno é apenas um conjunto de relevos. Outra forma, é hierarquizar os elementos de um terreno em camadas. Considerando o terreno como uma paisagem, o problema de especificação consiste em posicionar os sketches, associá-los a um tipo de relevo e definir seus parâmetros.

A Figura 6 mostra a aplicação desenvolvida para modelar terrenos, no formato paisagem. Neste exemplo, o usuário começa especificando um relevo a partir do desenho do sketch da base, na vista superior. A aplicação sugerirá alguns exemplos de possíveis relevos que podem ser escolhidos. Essas

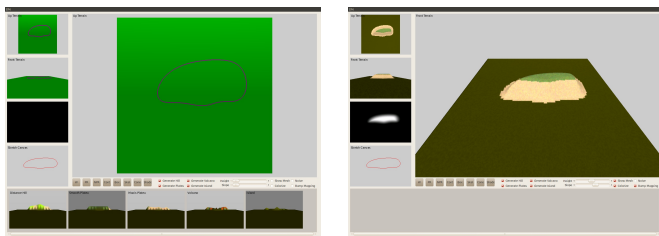
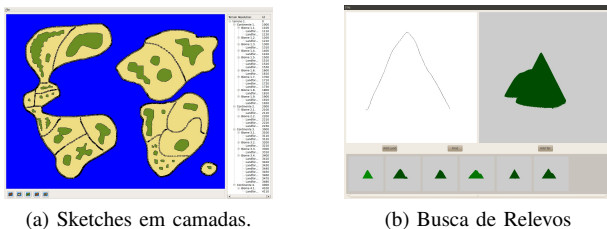


Figura 6. Aplicação de Modelagem.



(a) Sketches em camadas.

(b) Busca de Relevos

Figura 7. Tipos de relevos.

sugestões são apresentadas como uma lista de *thumbnails* exibida na parte inferior da janela principal da aplicação. Para escolher uma dessas sugestões, basta clicar na respectiva imagem. Em seguida, o modelo do terreno será atualizado, incorporando o relevo escolhido, posicionado de acordo com o sketch. Após a escolha da sugestão do relevo, ainda há alguns parâmetros que podem ser atualizados. O usuário ainda pode editar a altura e o comprimento da encosta do relevo.

Uma outra ferramenta que especifica terrenos com sketches utiliza o conceito de camadas. O usuário pode fazer as curvas continentais, dividir um continente em biomas e inserir relevos dentro de cada bioma. Além disso, pode parametrizar esses elementos, segundo a necessidade. Um trabalho futuro é ampliar os estudos sobre métodos teleológicos para síntese de terrenos e utilizar os dados especificados nessa ferramenta para gerar terrenos de grandes extensões com as características geomorfológicas desejadas.

Outra ferramenta implementada para adicionar um relevo a um terreno baseia-se na busca, em uma base de dados, por relevos já modelados. Esta busca é feita comparando um sketch referente a silhueta de um relevo com outros previamente armazenados em uma base de dados de relevos (calcula-se a silhueta em doze pontos de vista distintos, e armazena-se essa informação após normalizá-la).

Para o problema de mapeamento de textura em um terreno, utilizamos uma abordagem simples aonde o usuário especifica, através de sketches, as regiões de cada textura. A Figura 8 mostra a aplicação de mapeamento de textura implementada e um exemplo de teste. Neste caso, o sketch é feito sobre uma imagem referente ao DEM de um terreno. Cada região é associada a uma textura e o resultado é mapeado no modelo.

Esses protótipos apresentados tem o objetivo de testar conjuntos de conceitos apresentados ao longo dessa dissertação. Não fazia parte do escopo deste trabalho desenvolver uma aplicação completa em todas as esferas da área. Porém, através de testes com um conjunto mais reduzido de técnicas, conseguimos identificar diversos problemas da área, explorar algumas possibilidades e criar bases para pesquisas futuras explorando essas tendências.

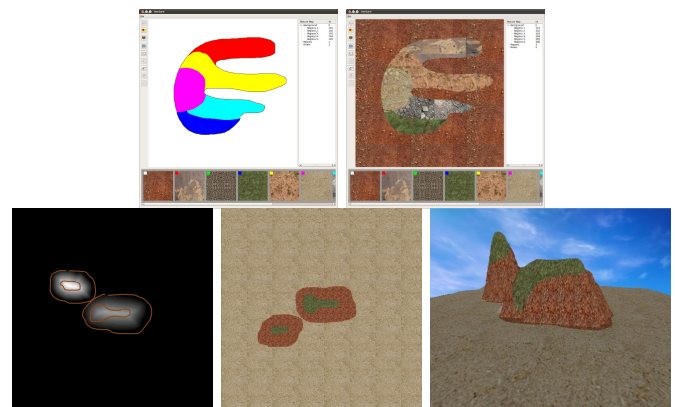


Figura 8. Aplicação de Mapeamento de Textura.

VI. CONCLUSÃO

Nos propomos apresentar uma visão geral da área de modelagem e visualização de terrenos, abordando os principais problemas, citando alguns dos principais trabalhos, e identificando algumas possibilidades, desafios e tendências da área. Embora seja uma área razoavelmente antiga da computação gráfica, ainda tem-se feito novas pesquisas sobre este tema.

Referente à modelagem, abordamos o processo de especificação utilizando sketches, apresentamos algumas formas de representação e alguns métodos procedurais para síntese de um terreno. Referente à visualização, apresentamos tópicos relativos a quais elementos podem, e como podem, ser representados em uma paisagem; as possíveis estruturas geométricas e os atributos visuais, principalmente a textura, utilizadas na representação destes elementos.

No que tange ao processo de especificação de relevos, mostramos alguns trabalhos que utilizam prioritariamente sketches referente a uma silhueta de um terreno para especificar um modelo. Essa abordagem é uma analogia ao modo como um artista desenha uma paisagem, através de um ponto de vista frontal. Além desta, apresentamos uma abordagem de especificação semelhante à utilizada pelos topógrafos. Nessa abordagem, os sketches especificados referem-se a curvas observadas de um ponto de vista superior. Esse ponto de vista também é muito utilizado em métodos procedurais que simulam fenômenos físicos. Esses métodos baseiam-se em curvas de picos de morros, vales, rios e falésias.

A abordagem para especificação e síntese, proposta neste trabalho, modela apenas a macroestrutura de um relevo. Para obter um maior realismo é necessário sintetizar detalhes sobre estas superfícies. A síntese de detalhes é necessária para agregar realismo ao modelo. Além disso, em busca de uma coerência geomorfológica, os métodos de síntese são suficientemente flexíveis para serem configurados para gerar classes específicas de modelos com suas características específicas. Nessa linha, um trabalho futuro é determinar outras classes de funções de altura e de perfil que configurem o nosso método de modelagem para obter relevos com diferentes características geomorfológicas.

Outra linha promissora para futuros trabalhos é manipular terrenos extensos (como planetóides). Nesta linha surgem problemas não abordados nesta pesquisa, como armazenamento e busca de informações em banco de dados; e busca por melhoria na performance para visualização do terreno. Outra direção muito promissora é utilizar dados reais para auxiliar o processo de modelagem de ambientes virtuais. Podemos citar como dados reais as fotografias, amplamente acessíveis na internet, e base de dados de elevação.

A pesquisa apresentada neste trabalho, além de uma visão generalista da área, e algumas contribuições metodológicas, serviu para delinear futuras outras pesquisas sobre o tema. Dentre o todo que se foi estudado e desenvolvido, muitos trabalhos futuros foram identificados. Pretendemos, quase que de imediato, abordá-los, dando continuidade ao projeto de pesquisa iniciado nesta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao VISGRAF pelo ambiente frutífero à pesquisa e ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Cruz, 2011, <http://wwwimpa.br/~lcruz/dissertacao>.
- [2] B. B. Mandelbrot, "Stochastic models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands." National Academy of Sciences (USA), 1975.
- [3] —, *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman and Co, 1983.
- [4] A. Fournier, D. Fussell, and L. Carpenter, "Computer rendering of stochastic models." Communications of the ACM, 1982.
- [5] K. Perlin, "An image synthesiser." ACM SIGGRAPH, 1985.
- [6] G. S. P. Miller, "The definition and rendering of terrain maps." ACM SIGGRAPH, 1986.
- [7] F. K. Musgrave, C. E. Kolb, and R. S. Mace, "The synthesis and rendering of eroded fractal terrains." ACM SIGGRAPH, 1989.
- [8] B. Benes and R. Forsbach, "Layered data representation for visual simulation of terrain erosion." S. C. on Computer graphics, 2001.
- [9] M. N. Gamito and F. K. Musgrave, "Procedural landscapes with overhangs." Portuguese Computer Graphics Meeting, 2001.
- [10] Hnaidi, Guérin, Akkouche, Peytavie, and Galin, "Feature based terrain generation using diffusion equation." Pacific Graphics, 2010.
- [11] F. Belhadj, "Terrain modeling: a constrained fractal model." AFRI-GRAPH, 2007.
- [12] H. Zhou, J. Sun, G. Turk, and J. M. Rehg, "Terrain synthesis from digital elevation models." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007.
- [13] N. H. Anh, A. Sourin, and P. Aswani, "Physically based hydraulic erosion simulation on graphics processing unit." GRAPHITE, 2007.
- [14] O. St'ava, B. Benes, M. Brisbin, and J. Krivánek, "Interactive terrain modeling using hydraulic erosion." Eurographics Symposium on Computer Animation, 2008.
- [15] G. J. P. de Carpentier and R. Bidarra, "Interactive gpu-based procedural heightfield brushes." Conf. on Foundations of Digital Games, 2009.
- [16] J. Schneider, T. Boldte, and R. Westermann, "Real-time editing, synthesis, and rendering of infinite landscapes on gpus." Conference on Vision, Modeling, and Visualization, 2006.
- [17] F. Losasso and H. Hoppe, "Geometry clipmaps: Terrain rendering using nested regular grids." ACM SIGGRAPH, 2004.
- [18] L. Hu, P. V. Sander, and H. Hoppe, "Parallel view-dependent refinement of progressive meshes." Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2009.
- [19] J. M. Cohen, J. F. Hughes, and R. C. Zeleznik, "Harold: a world made of drawings." NPAR, 2000.
- [20] J. Gain, P. Marais, and W. Straber, "Terrain sketching." Symposium on Interactive 3D graphics and games, 2009.
- [21] Prusinkiewicz and Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlang, 1990.
- [22] G. Kelly and H. McCabe, "A survey of procedural techniques for city generation." Institute of Technology Blanchardson Journal, 2006.
- [23] L. Velho and D. Zorin, "4-8 subdivision." Special Issue on Subdivision Techniques, 2001.
- [24] L. Velho, "A dynamic adaptative mesh library based on stellar operators." Journal of Graphics Tools, 2004.
- [25] H. Hoppe, "View-dependent refinement of progressive meshes." ACM SIGGRAPH, 1997.
- [26] E. Bruneton and F. Neyret, "Precomputed atmospheric scattering." Eurographics - Symposium on Rendering, 2008.
- [27] D. Ebert, F. Musgrave, D. Peachey, K. Perlyn, and S. Worley, *Texturing and Modeling: A procedural approach*. Academic Press, 1998.
- [28] L. Wei and M. Levoy, "Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization." ACM SIGGRAPH, 2000.
- [29] S. Lefebvre and H. Hoppe, "Parallel controllable texture synthesis." ACM SIGGRAPH, 2005.
- [30] M. Ashikhmin, "Synthesizing natural textures." Symposium on Interactive 3D graphics, 2001.
- [31] R. R. C. Han, E. Rissler and E. Grinspun, "Multiscale texture synthesis." ACM SIGGRAPH, 2008.
- [32] J. Maillot, H. Yahia, and A. Verroust, "Interactive texture mapping." ACM SIGGRAPH, 1993.
- [33] P. Hechbert, "Survey of texture mapping." Computer Science P., 1988.