

Ambiente de Gerenciamento de Imagens e Dados Espaciais para Desenvolvimento de Aplicações em Biodiversidade

Ricardo da S. Torres¹, Claudia B. Medeiros¹, Alexandre X. Falcão¹

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 1251, CEP 13084-851 – Campinas, SP

{rtorres,cmbm,afalcao}@ic.unicamp.br

Abstract. *There is a wide range of environmental applications requiring sophisticated management of several kinds of data, including spatial data and images of living beings. However, available information systems offer very limited support for managing such data in an integrated manner. This thesis provides a solution to combine these query requirements, which takes advantage of current digital library technology to manage networked collections of heterogeneous data in an integrated fashion. The research contributes to solve problems of specification and implementation of biodiversity information systems that manage images of species, textual descriptions and spatial data in an integrated way.*

Resumo. *Há um grande número de aplicações ambientais requisitando o gerenciamento sofisticado de vários tipos de dados, incluindo dados espaciais e imagens de seres vivos. Entretanto, os sistemas de informação disponíveis oferecem suporte limitado para gerenciamento destes dados de uma maneira integrada. Esta tese provê uma solução que combina estes requisitos de consultas aproveitando-se da tecnologia de bibliotecas digitais para gerenciar coleções de dados heterogêneos de maneira integrada. Esta pesquisa contribui para resolver problemas de especificação e implementação de sistemas de informação de biodiversidade que combinem o gerenciamento de imagens de seres vivos, descrições textuais e dados espaciais.*

1. Introdução

A crescente preocupação com a conservação do meio ambiente está gerando grande demanda por acesso seguro e atualizado de informações ambientais. Sistemas de informação ambientais são uma resposta a esta demanda. Eles visam o gerenciamento de dados sobre o meio ambiente, incluindo informações sobre o solo, a água, o ar e sobre as diversas espécies de animais e plantas existentes.

As aplicações ambientais têm como características marcantes o grande volume e heterogeneidade de dados envolvidos e o georreferenciamento destes dados — ou seja, associação das informações às coordenadas correspondentes na superfície da terra. Além de dados alfanuméricos, as imagens de sensoriamento remoto são usadas em sistemas ambientais para determinar fatores como aspectos climáticos, estresse vegetal, poluição ou erosão. A combinação de todas esses dados é usada como base para estudo e simulação de ecossistemas e até mesmo influência do homem na natureza. Por outro lado, fotos obtidas em trabalho de campo (por exemplo, de seres vivos ou de paisagens), apesar de

serem uma importante fonte de informação, não têm sido devidamente exploradas neste tipo de sistema — são usadas apenas para ilustração de conceitos. Em outras palavras, tais sistemas de informação consideram fotos e imagens em geral como unidades não passíveis de processamento via mecanismos de bancos de dados.

Desafios a serem enfrentados se referem não apenas à natureza heterogênea dos diferentes tipos de dados ou ao volume de informação disponível, mas também à heterogeneidade de usuários. No entanto, uma grande gama de aplicações ambientais apresenta demanda por consultas típicas em banco de dados de imagens — dentre outras, as chamadas *consultas por conteúdo* — mas não disponíveis nos sistemas atuais. O ideal, em função da demanda dos usuários, seria integrar todos estes tipos de dados sob um único tipo de gerenciamento.

O trabalho desenvolvido nesta tese contribui para resolver este problema. A tese aborda um tipo específico de sistema ambiental — aquele que trata de questões ligadas à biodiversidade. O trabalho realizado está centrado em combinar pesquisa em bancos de dados de imagens (e recuperação de imagens por conteúdo), aspectos de bancos de dados geográficos (e correlações espaciais) e bibliotecas digitais, facilitando extensibilidade e reusabilidade. Como se verá no decorrer do texto, tal enfoque deu origem a um novo tipo de sistema para aplicações de biodiversidade. Uma primeira versão está atualmente em uso no ensino de ictiologia na Virginia Tech, EUA.

O resto deste texto está organizado da seguinte forma: a Seção 2. apresenta os objetivos e contribuições deste trabalho; a Seção 3. descreve os aspectos de pesquisa envolvidos; a Seção 4. apresenta um detalhamento das contribuições da pesquisa desenvolvida; e, por fim, a Seção 5. descreve possíveis extensões.

2. Objetivos e Contribuições

O objetivo da tese foi contribuir para resolver problemas de especificação e implementação de sistemas de informação de biodiversidade que combinem o gerenciamento de imagens de seres vivos, de descrições textuais e de dados espaciais, no contexto de bibliotecas digitais.

O trabalho utilizou dois conceitos básicos para especificação e implementação da solução: (i) a noção de componentes de software, para facilitar reuso e extensibilidade; e (ii) o arcabouço de bibliotecas digitais, para permitir acessar de forma transparente grandes coleções de dados de biodiversidade. O uso destes dois conceitos permite a criação de sistemas sob perspectiva diferente do que é encontrado na maioria dos casos neste domínio. Os sistemas de informação de biodiversidade são em geral monolíticos e dedicados a tipos específicos de dados, reduzindo bastante seu uso genérico.

A Figura 1 apresenta a arquitetura proposta para a criação de sistemas de informação de biodiversidade que gerenciem dados espaciais, dados textuais e imagens. Esta arquitetura é composta por três camadas: repositórios de dados organizados como bibliotecas digitais; componentes de busca a cada repositório (GBISC, para consultas envolvendo dados espaciais; MBSC, módulo de consulta a dados textuais disponível na Virginia Tech; e CBISC, componente de busca de imagens por conteúdo); e *BIS Manager*. Os componentes de busca têm por base mecanismos de consulta de bibliotecas digitais. O *BIS Manager* recebe consultas dos usuários via interface, transforma-as em subcon-

sultas enviadas para processamento aos componentes de busca apropriados e combina os resultados de cada subconsulta, enviando a combinação como resposta para o usuário.

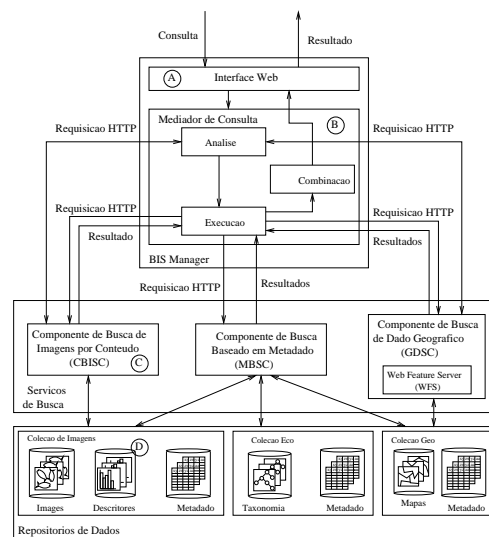


Figura 1. Arquitetura proposta para construção de Sistemas de Informação de Biodiversidade.

As principais contribuições da tese e as publicações associadas são:

1: Especificação de um ambiente (ilustrado na Figura 1) para gerenciamento integrado de fotos, mapas e dados convencionais, que permite a cientistas em biodiversidade a extração de informação segundo suas necessidades [da S. Torres et al. 2005, da S. Torres et al. 2004c]. Esta especificação é uma contribuição para desenvolvedores de sistemas de informação de biodiversidade;

2: Criação de um componente de busca para recuperação de imagens por conteúdo [da S. Torres et al. 2004b], que pode acomodar diferentes tipos de descritores e métricas de comparação. Esta é uma contribuição para a área de bibliotecas digitais, na medida em que projetistas de bibliotecas podem usar este componente para criar bibliotecas que permitam consultas de imagens por conteúdo. Esta contribuição está relacionada ao módulo C (CBISC) marcado na Figura 1;

3: Especificação e implementação de novos descritores de imagem baseados na forma de objetos [da S. Torres et al. 2002, da S. Torres et al. 2004a, da S. Torres et al. 2003b, da S. Torres and Falcão 2004a, da S. Torres and Falcão 2004b], validados através de testes experimentais, envolvendo cerca de um milhão de consultas. Experimentos incluíram a avaliação de dezenas de descritores e o uso de diferentes coleções de até 11000 imagens. Estes descritores são uma contribuição para a área de processamento de imagens. Esta contribuição está relacionada ao módulo D marcado na Figura 1;

4: Proposta e desenvolvimento de novas estruturas de visualização para apresentação de resultados de consultas para sistemas de recuperação de imagens por conteúdo, visando novos tipos de interação em interfaces [da S. Torres et al. 2003a]. Esta é uma contribuição para a área de interfaces, estando relacionada ao módulo A marcado na Figura 1;

5: Implementação parcial do ambiente, usando as demais contribuições, validando-o para um tipo específico de espécies (imagens de peixes) e perfil de usuários (ictiólogos), para suporte ao processo de identificação de espécies [da S. Torres et al. 2005, da S. Torres et al. 2004c]. Esta implementação, atualmente em uso na Virginia Tech para ensino de identificação de espécies em curso de ictiologia, constitui contribuição para usuários de sistemas de biodiversidade, mais especificamente para estudantes e professores de biologia.

As contribuições, desta forma, cobrem não apenas a especificação do ambiente e sua validação, mas também aspectos em processamento de imagens, consultas que combinam parâmetros de várias naturezas e aspectos de interface humano-computador. Usuários do ambiente contam com uma variada combinação de operações até agora não disponíveis em sistemas de biodiversidade existentes.

3. Aspectos de Pesquisa Envolvidos

O projeto e desenvolvimento de um sistema de biodiversidade com as características desejadas apresentam vários desafios, destacando-se: a dificuldade em combinar *mecanismos de consulta* por conteúdo a bancos de imagens e consulta a bancos de dados geográficos, mecanismos de *interação* para facilitar a especificação de tais consultas e a complexidade do *gerenciamento* diferenciado de dados de natureza tão distinta. Estes desafios envolvem trabalho em duas frentes: bancos de dados (contendo imagens e dados geográficos) e processamento de imagens. A solução adotada envolveu igualmente bibliotecas digitais, aproveitando os mecanismos de acesso a dados já disponíveis neste tipo de infraestrutura. Com isto, o trabalho também precisou levar em consideração este fator.

Bibliotecas Digitais: Uma biblioteca digital pode ser vista como um sistema de informação que provê uma coleção de recursos organizados, mecanismos para visualização e busca, ambientes distribuídos em rede sobre um conjunto de serviços, objetivando a satisfação das necessidades de usuários [Kochtanek and Hein 1999]. As bibliotecas digitais consideradas nesta pesquisa disponibilizam coleções de dados sobre imagens de seres vivos, fenômenos geográficos e ecológicos, assim como mapas e metadados.

A pesquisa em bibliotecas digitais envolve diferentes áreas tais como hiper-texto, recuperação de informação, serviços multimídia, gerenciamento de bancos de dados e interface. O processo de construção de uma biblioteca digital inclui ainda a especificação do conteúdo a ser armazenado, como tal conteúdo é organizado, estruturado, descrito e acessado, quais serviços são oferecidos pela biblioteca (visualização, busca, recomendação, etc.), e como usuários podem interagir com cada serviço oferecido pela biblioteca.

Processamento de Imagens: A contribuição de processamento de imagens para sistemas de biodiversidade envolve vários fatores. O principal consiste na especificação e definição de algoritmos que manipulam o conteúdo das imagens (objetos e suas propriedades de forma, cor e textura). Para efeito da tese, o conteúdo de uma imagem é definido como o conjunto de objetos que a compõem (flores, peixes, etc.). Estes algoritmos visam extrair e descrever o conteúdo das imagens de forma que a descrição possa ser utilizada para indexar as imagens e manipulá-las segundo este conteúdo, em um banco de imagens. Embora vários projetos de sistemas de biodiversidade mencionem recuperação por conteúdo, a maioria usa características da imagem como um todo e não de seus objetos.

Bancos de Dados de Imagens: Bancos de Dados de Imagens combinam pesquisa em bancos de dados e processamento de imagens. Apresentam diversos desafios, envolvendo problemas que vão desde questões de armazenamento até interfaces amigáveis [Smeulders et al. 2000]. O aspecto complicador reside no fato de que os objetos envolvidos (imagens) são muito mais complexos de gerenciar do que objetos textuais. Do ponto de vista de armazenamento, imagens ocupam muito espaço. Além disso, a indexação de imagens deixa de ser uma questão de processamento de *strings* e passa a depender de outras características, inclusive de diferentes aspectos cognitivos relativos à interpretação visual. Vários outros problemas — linguagens de consulta, atualização — contribuem para atrair cada vez mais pesquisadores para esta área.

Bancos de Dados Geográficos: Bancos de Dados Geográficos são repositórios de informação coletada empiricamente sobre fenômenos do mundo real (por exemplo, florestas, rios, cidades). À semelhança de bancos de dados de imagens, apresentam desafios tanto teóricos quanto de implementação. Dados geográficos ocupam muito espaço e variam com o tempo. Além disso, são geralmente provenientes de fontes diferentes com níveis distintos de generalização e escalas incompatíveis e envolvem questões de restrição de integridade espacial e processamento de consultas espaciais [Rigaux et al. 2001]. E mais, estratégias padrão de otimização de consultas nem sempre são adequadas para dados geográficos.

4. Detalhamento das Contribuições

O texto da tese foi organizado agrupando os principais artigos publicados e/ou submetidos para publicação que foram resultado da pesquisa realizada. A seguir, cada contribuição é detalhada, referenciando as principais publicações relacionadas.

4.1. Arquitetura e sua Validação

Esta contribuição consiste na arquitetura (vide Figura 1) e sua validação em um ambiente de bibliotecas digitais. A descrição da arquitetura e da implementação usada na Virginia Tech foram publicadas em [da S. Torres et al. 2004c, da S. Torres et al. 2005]. O componente de busca por conteúdo da arquitetura aparece em [da S. Torres et al. 2004b] e encapsula de forma transparente ao usuário o uso dos descritores apresentados na seção seguinte.

O objetivo da arquitetura é a criação de Sistemas de Informação de Biodiversidade que combinam os vários tipos de características de busca através de consultas exploratórias. Este sistema ajudará cientistas a melhorar ou completar seu conhecimento e entendimento sobre espécies e seus habitats ao combinar consultas textuais, consultas baseadas no conteúdo de imagem e consultas geográficas. Um exemplo de consulta deste tipo poderia começar por definir uma imagem de entrada (por exemplo, uma foto de peixe), e então pedir ao sistema que *“Recupere todas imagens do banco de dados contendo peixes cujas nadadeiras têm forma similar àquelas do peixe mostrado na foto”*. Uma combinação desta consulta com predicados textuais e espaciais consistiria em *“Mostre as bacias hidrográficas onde as espécies de peixe com ‘olhos grandes’ coexistem com peixes cujas nadadeiras são similares às do peixe da foto”*.

Esta consulta é processada pelo *BIS Manager* da Figura 1, que a transforma em consulta por conteúdo (peixe com nadadeiras, enviada ao módulo CBISC para busca

por similaridade); consultas sobre dados textuais (“olhos grandes”, enviado ao módulo MBSC) e consulta espacial (bacias hidrográficas e o fato de que há convivência entre espécies — relacionamento espacial, tratado pelo GDSC). Os módulos CBISC e MBSC retornam os resultados, sendo então feita busca geográfica para detectar vizinhança. O resultado final é retornado aos usuários.

Nossa solução está sendo instanciada em um Sistema de Informação de Biodiversidade para espécies de peixe em uma aplicação real: identificação de espécies. Uma versão inicial do sistema que gerencia dados textuais e imagens de peixes está funcionando [da S. Torres et al. , da S. Torres et al. 2005], faltando porém a implementação da busca espacial, atualmente em andamento. Este sistema foi testado por especialistas em biodiversidade (icitiólogos da Virginia Tech) [da S. Torres et al. , da S. Torres et al. 2005], visando a sua comparação com o método tradicional de identificação de espécies que é baseado em chaves – regras de identificação. Por intermédio do método tradicional, os profissionais conseguiram identificar 100% das famílias, 82,9% dos gêneros e 51,4% das espécies. Já com o uso do sistema desenvolvido, esses percentuais foram de 100%, 91,4% e 62,9%, respectivamente. O tempo médio necessário para promover a identificação correta pelo método convencional foi de 6,1 minutos, enquanto que pela nova ferramenta foi de 4,1 minutos.

4.2. Descritores de Imagens

A contribuição em processamento de imagens consiste em novos descritores de forma para recuperação por conteúdo, associados às publicações [da S. Torres et al. 2002, da S. Torres et al. 2004a, da S. Torres et al. 2003b, da S. Torres and Falcão 2004a, da S. Torres and Falcão 2004b]. São eles: dimensão fractal multi-escala do contorno — *Contour Multiscale Fractal Dimension*, saliências do contorno — *Contour Saliences* — e saliências de segmentos do contorno — *Contour Segment Saliences*. O cálculo destes descritores usa a Transformada Imagem-Floresta (*image foresting transform* — IFT), uma abordagem baseada em grafo para projeto de operadores de processamento de imagens [Falcão et al. 2004]. Neste caso, os descritores de forma são obtidos a partir de representações criadas pela IFT.

A contribuição publicada em [da S. Torres et al. 2004a] introduz melhoramentos no cálculo da dimensão fractal multi-escala e das saliências do contorno. A abordagem original para cálculo da dimensão fractal multi-escala sofre com oscilações indesejadas na curva fractal, e a localização dos pontos de maior curvatura ao longo do contorno, importante para cálculo das saliências, é muito sensível no caso de formas complexas e intrincadas. O problema da oscilação é resolvido usando regressão polinomial. As Figuras 2 (a) e (b) mostram, respectivamente, o contorno da curva de Koch e o descritor fractal multi-escala correspondente. A relação entre pontos de saliência de um contorno e dos seus esqueletos interno e externo é usada para localizar os pontos de maior curvatura ao longo do contorno, melhorando consideravelmente a robustez do cálculo de suas saliências. Esta relação é obtida de maneira direta através do arcabouço da IFT. O descritor de saliência de contorno é também redefinido de modo a incluir a localização e o valor de saliência ao longo do contorno e uma métrica de distância especial, o que produz uma alta eficácia no reconhecimento de formas. As Figuras 2 (c) e (d) mostram um polígono (e seus esqueletos interno e externo) e o descritor saliências do contorno, respectivamente.

Em[da S. Torres and Falcão 2004a, da S. Torres and Falcão 2004b], um outro

descritor baseado nos valores de saliência de segmentos do contorno é proposto. O contorno é dividido em um número fixo de segmentos e as áreas de influência dos seus pixels dentro e fora do contorno são usadas para calcular as saliências de cada segmento. O descritor de saliências de segmento consiste nos valores de saliência dos segmentos de contorno e de um algoritmo de casamento como função de distância. As Figuras 2 (e) e (f) ilustram o cálculo deste descritor para um contorno de peixe.

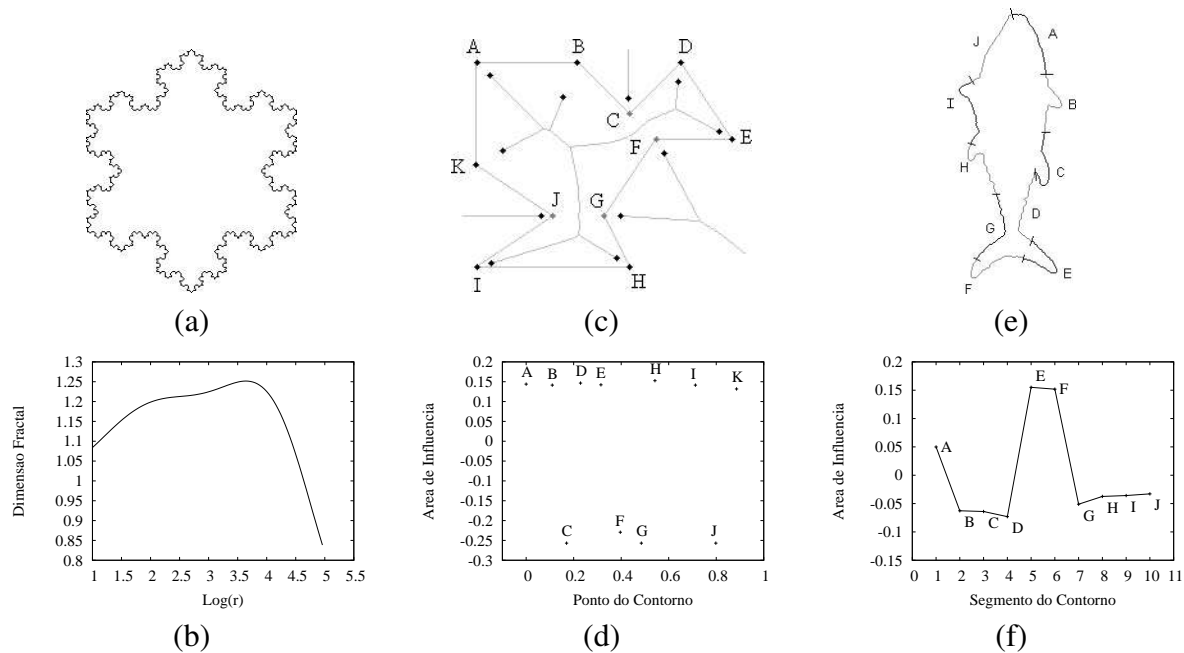


Figura 2. (a) Curva de Koch. (b) Fractal multi-escala da curva de Koch. (c) Polígono com seus esqueletos interno e externo. (d) Saliências do contorno do polígono. (e) Contorno de peixe e segmentos do seu contorno. (f) Saliências dos segmentos do contorno do peixe.

Os descritores propostos são comparados com descritores clássicos (*Fourier descriptors* [Gonzalez and Woods 1992] e *moment invariants* [Gonzalez and Woods 1992]) e descritores recentemente propostos (*Curvature Scale Space (CSS)* [Mokhtarian and Abbasi 2002] e *Beam Angle Statistics (BAS)* [Arica and Vural 2003]) no que diz respeito aos seguintes aspectos: *compactabilidade e separabilidade*. A compactabilidade de um descritor indica sua invariância a variações de objetos pertencentes a uma mesma classe, enquanto a separabilidade indica sua habilidade de discriminar objetos que pertencem a classes diferentes. Em outras palavras, um descritor é considerado “bom” quando ele cria agrupamentos compactos bem separados uns dos outros, para todas as classes em um espaço de características correspondente. Os resultados desta comparação mostra que os descritores propostos têm um desempenho superior aos demais.

4.3. Interfaces e Estruturas Visuais

A contribuição em interfaces, publicada em [da S. Torres et al. 2003a], consiste na adoção de técnicas de Visualização de Informação para prover usuários com apresentações de resultados semanticamente enriquecidos e novos tipos de mecanismos de interação em sistemas de recuperação de imagens por conteúdo. Os principais resultados deste trabalho

são as seguintes: (a) apresentação de duas técnicas de visualização baseadas em *Espiral* e *Anéis Concêntricos* para explorar resultados em bancos de dados de imagens (veja Figura 3). Estas técnicas possibilitam a usuários novos meios de ranqueamento de imagens similares sem sobreposições; (b) descrição de um protótipo de sistema de recuperação de imagem por conteúdo que incorpora estes paradigmas de visualização.

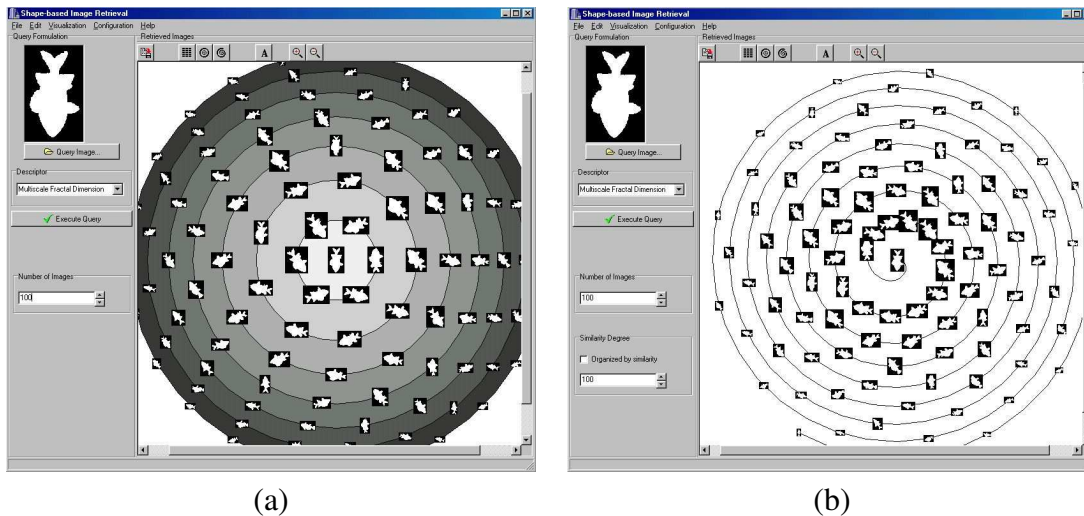


Figura 3. Estruturas visuais. (a) Anéis Concêntricos. (b) Espiral.

5. Extensões

Há várias extensões previstas, tanto do ponto de vista teórico quanto de implementação, contemplando as diferentes camadas da arquitetura proposta. Estes trabalhos incluem pesquisa em diferentes áreas, alguns dos quais já em andamento: bancos de dados, processamento de imagens e bibliotecas digitais.

Proposta de Novos Descritores de Imagem: A tese desenvolve vários descritores de forma. É preciso investigar outros descritores baseados na IFT, não somente baseados na forma de objetos, mas também envolvendo diferentes propriedades dos pixels (por exemplo, cor e textura).

Uso de Ontologias: A arquitetura proposta pode ser estendida para o uso de ontologias na definição e processamento de consultas. Ontologias podem ser utilizadas no gerenciamento das diferentes fontes de evidências: metadados de imagens podem estar associados a um conjunto de termos definidos em uma ontologia; ontologias específicas para as aplicações ambientais podem guiar consultas envolvendo, por exemplo, informação sobre ecossistema ou habitat de uma espécie.

Extensão para outros Domínios: O trabalho de implementação do doutorado foi centrado em sistemas de biodiversidade, considerando as necessidades deste tipo de usuário e especificidade dos dados utilizados, em especial informação sobre coletas e os metadados. A arquitetura, no entanto, é genérica. Assim, outra extensão possível seria testar a implementação para outros tipos de sistemas ambientais — por exemplo, em modelagem de ecossistemas ou em estudos de impacto ambiental. Neste caso, seria necessário um novo tipo de análise de conteúdo de imagens. Além disso, haveria necessidade de prover outras combinações de consulta.

Referências

- Arica, N. and Vural, F. T. Y. (2003). BAS: A Perceptual Shape Descriptor Based on the Beam Angle Statistics. *Pattern Recognition Letters*, 24(9-10):1627–1639.
- da S. Torres, R., da Silva, C. G., Medeiros, C. B., and da Rocha, H. V. (2003a). Visual Structures for Image Browsing. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Information and Knowledge Management*, pages 167–174, New Orleans, LA, USA.
- da S. Torres, R. and Falcão, A. X. (2004a). Contour Saliency Descriptors for Effective Image Retrieval and Analysis. *Image and Vision Computing*. Submitted.
- da S. Torres, R. and Falcão, A. X. (2004b). Contour Saliency Descriptors for Effective Image Retrieval and Analysis. Technical Report IC-04-11, Institute of Computing, UNICAMP, Campinas, SP, Brazil.
- da S. Torres, R., Falcão, A. X., and da F. Costa, L. (2002). Shape Description by Image Foresting Transform. In *Proceedings of the 14th International Conference on Digital Signal Processing*, volume 2, pages 1089–1092, Santorini, Greece.
- da S. Torres, R., Falcão, A. X., and da F. Costa, L. (2004a). A Graph-based Approach for Multiscale Shape Analysis. *Pattern Recognition*, 37(6):1163–1174.
- da S. Torres, R., Halleman, E., Jenkins, R. E., and Burkhead, N. M. EKEY, <http://virginia.cc.vt.edu:8086/ekey> (as of October 2004).
- da S. Torres, R., Medeiros, C. B., Goncalves, M. A., and Fox, E. A. (2004b). An OAI Compliant Content-Based Image Search Component. In *Proceedings of the 4th Joint ACM/IEEE Conference on Digital Libraries*, page 418, Tucson, AZ.
- da S. Torres, R., Medeiros, C. B., Goncalves, M. A., and Fox, E. A. (2005). A Digital Library Framework for Biodiversity Information Systems. *International Journal on Digital Libraries*. To appear.
- da S. Torres, R., Medeiros, C. B., Hallerman, E. M., Goncalves, M. A., and Fox, E. (2004c). Integrating Image and Spatial Data for Biodiversity Information Management. Technical Report IC-04-12, Institute of Computing, UNICAMP, Campinas, SP, Brazil.
- da S. Torres, R., Picado, E. M., Falcão, A. X., and da F. Costa, L. (2003b). Effective Image Retrieval by Shape Saliencies. In *Proceedings of the Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, pages 49–55, São Carlos, SP, Brazil.
- Falcão, A. X., Stolfi, J., and Lotufo, R. A. (2004). The Image Foresting Transform: Theory, Algorithms, and Applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(1):19–29.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (1992). *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
- Kochtanek, T. R. and Hein, K. K. (1999). Delphi Study of Digital Libraries. *Information Processing and Management*, 35(3):245–254.
- Mokhtarian, F. and Abbasi, S. (2002). Shape Similarity Retrieval Under Affine Transforms. *Pattern Recognition*, 35(1):31–41.

- Rigaux, P., Voisard, A., and Scholl, M. (2001). *Spatial Databases. With Application to GIS*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA.
- Smeulders, A. W. M., Worring, M., Santini, S., Gupta, A., and Jain, R. (2000). Content-Based Image Retrieval at the End of the Years. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(12):1349–1380.