

UM SISTEMA DE VISUALIZAÇÃO IMERSIVO E INTERATIVO DE APOIO AO ENSINO DE CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS

Bruno Barberi Gnecco¹
Marcio Calixto Cabral¹
Ronei Marcos de Moraes^{1,2}
Liliane dos Santos Machado¹

¹Laboratório de Sistemas Integráveis - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, 158. Trav.3. CEP: 05508-900 - São Paulo - SP - Brasil.
{brunobg, mcabral, ronei, liliane}@lsi.usp.br

²Departamento de Estatística – CCEN - Universidade Federal da Paraíba
Cidade Universitária s/n CEP 58.051-900 João Pessoa – PB - Brasil
ronei@de.ufpb.br

Abstract: *This paper describes a virtual reality system for education in image processing. Our goal is to provide an interactive and immersive tool to help the image classifier teaching. The system was projected to run in two different versions. The first version is running on a PC/Linux for individual studies. The second version is running on a Digital Cavern/Unix allowing students to have a total immersion in the attribute space.*

Palavras-chave: visualização, realidade virtual, classificação de imagens, ensino.

1. Introdução

O ensino de Processamento de Imagens no Brasil geralmente aborda as áreas de transformadas, filtragem, restauração e segmentação. Alguns assuntos nessas áreas já incluem tópicos interdisciplinares como bases da fotografia, estudo das cores e morfologia matemática (Gonzales e Woods, 2000), o que torna difícil para o aluno, mesmo de pós-graduação, o processo de aprendizado. Interpretação e classificação de imagens vêm aos poucos sendo incorporada às disciplinas de processamento de imagens pela necessidade cada vez maior de se identificar o que há em uma imagem, seja através do reconhecimento de padrões ou através de classificação.

Dada a heterogeneidade das técnicas envolvidas na classificação de imagens, é difícil em uma única disciplina evoluir em conceitos que necessitam de uma base matemática e estatística mais aprofundada. Por exemplo, existem classificadores que se baseiam em princípios discriminantes multivariados da Estatística (Baridó, 1989) que utilizam princípios da Álgebra Linear. Da mesma forma, existem classificadores baseados em Redes Neurais que usam uma concepção biológica do neurônio humano (Simpson, 1990). Outros

classificadores, por sua vez, baseiam-se em princípios da lógica clássica ou da lógica “fuzzy” (Moraes, 1998) e sistemas especialistas são utilizados para executar a tarefa de classificação. Observa-se, portanto, a dificuldade em ensinar tópicos em classificação de imagens sem que os alunos possuam conhecimento dos diversos conceitos necessários.

O ensino de ciências básicas pode ser auxiliado por Sistemas de Realidade Virtual aproximando os estudantes do objeto da pesquisa. Aplicações deste tipo já são utilizadas no ensino da Geometria através de Sistemas de Realidade Aumentada (Kaufmann et alli, 2000). Na Estatística, a interpretação e análise de dados podem ser feitas de forma interativa em sistemas de imersão total do tipo “Caverna” e permitem aos estudantes manipular e entender complexos conjuntos de dados (Sawant et alli, 2000)

O presente trabalho propõe a utilização de Sistemas de Realidade Virtual para auxiliar no aprendizado da concepção estatística e funcionamento espacial dos classificadores de imagens. O objetivo do sistema apresentado é aproximar os estudantes/usuários do universo do problema, colocando-os dentro de dimensões matemáticas abstratas e permitindo a visualização dos conjuntos de dados estatísticos utilizados na classificação de uma imagem.

2. Classificação de Imagens

As técnicas clássicas de Classificação de Imagens são basicamente divididas em dois grandes grupos: classificação não-supervisionada e classificação supervisionada. Os classificadores do primeiro grupo dividem as classes ou agrupamentos automaticamente (Johnson e Wichern, 1982) e alguns métodos podem ser baseados em funções discriminantes matemáticas, como por exemplo, a Teoria dos Grafos e relações nebulosas (Dunn, 1974), abordagens estatísticas assintóticas (Cooper and Freeman, 1970), ou ainda modelos de pertinência nebulosa (Kent e Mardia, 1988). No entanto, os classificadores supervisionados são mais precisos que os não-supervisionados por levarem em consideração informações fornecidas pelo usuário: a verdade terrestre ou mapa de referência (Saebo et alli, 1985). Eles usam a informação contida no próprio pixel para a classificação do mesmo e se baseiam em funções discriminantes, na teoria de Bayes, modelos “fuzzy” (Bezdek, 1986), ou mesmo em Redes Neurais (Mustavi et alli, 1994) e requerem alguns conhecimentos prévios das classes (Saebo et alli, 1985), como por exemplo, a distribuição de probabilidades (Moraes, 1992).

2.1 Classificadores Não-supervisionados

Os métodos não-supervisionados são métodos nos quais o próprio algoritmo procura classes na imagem por agrupamento ou aglomeração, ou seja, procurando agrupar pixels semelhantes entre si, ou separando grupos de pixels diferentes. O usuário apenas deve fornecer ao algoritmo o número de classes desejado ou um critério para que o agrupamento seja considerado estável matematicamente. O resultado desse tipo de método é uma imagem com classes sem rótulos, ou seja, não se conhece previamente a identificação das classes resultantes e o próprio usuário deve ao final do processo rotular as classes da melhor maneira possível.

Um método não-supervisionado bastante didático é o método do Agrupamento Hierárquico (Richards, 1995 e Mather, 1987) o qual não necessita de um número pré-definido de classes. Seu algoritmo inicia assumindo que cada pixel é um agrupamento e as distâncias entre todos os pixels são calculadas e armazenadas em uma matriz de distâncias. Numa segunda fase, procura-se os vizinhos mais próximos unindo-os em um novo agrupamento. Para este novo agrupamento, calcula-se um centro que passa a ser o ponto representativo daquela classe para o recálculo das distâncias. O método termina quando os pixels estão todos reunidos em um único agrupamento de pontos. Os resultados são mostrados em geral em um dendograma (Figura 1) e o usuário pode ao final decidir com quantas classes a imagem deve ficar, rotulando-as.

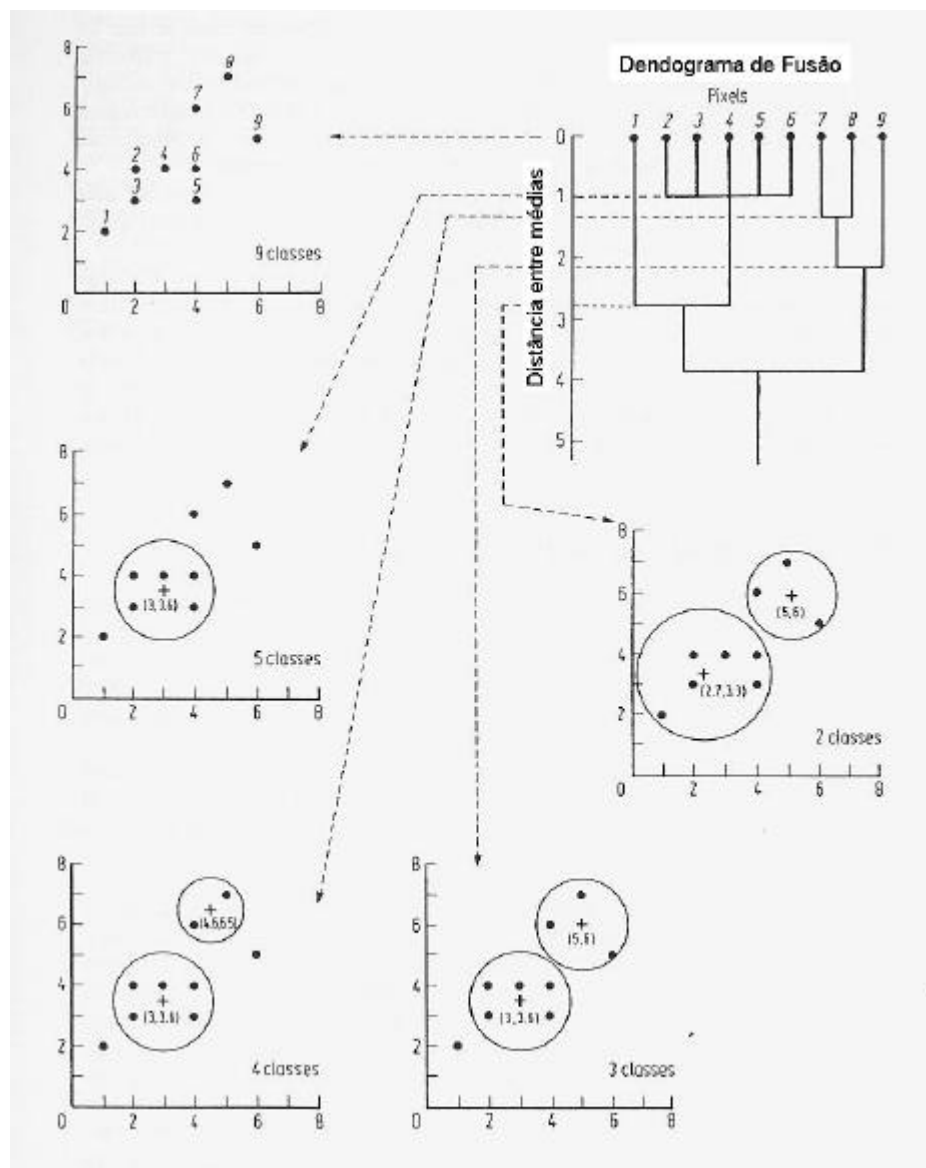


Figura 1 – Esquema de Classificação pelo Método do Agrupamento Hierárquico.

De modo formal, o método do Agrupamento Hierárquico é iterativo e pode partir da premissa que cada ponto da imagem é uma classe, agrupando pontos segundo uma medida de similaridade, em geral, a distância Euclidiana:

$$\begin{aligned} d(x_1, x_2) &= \|x_1 - x_2\| \\ &= \sqrt{(x_1 - x_2)^t(x_1 - x_2)} ; \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_{2i})^2} \end{aligned}$$

onde: N é a dimensão de componentes espectrais ou atributos.

Um critério utilizado para se verificar a qualidade dos agrupamentos é a Soma de Quadrados dos Erros, dada por:

$$SQE = \sum_{j=1}^K \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - m_i\|^2$$

A dificuldade no ensino deste tipo de classificador, embora matematicamente simples, reside na compreensão da dimensão N de componentes espectrais ou atributos. Outra dificuldade apontada por alunos relaciona-se ao entendimento das distâncias no espaço multidimensional.

2.1 Classificadores Supervisionados

Os classificadores supervisionados são métodos nos quais o usuário interage com o algoritmo, fornecendo informações como o número de classes e amostras de áreas conhecidas da imagem para cada classe. O algoritmo deve classificar cada "pixel" da imagem segundo uma função discriminante gerada a partir das informações fornecidas pelo usuário.

O classificador K-NN ("K-Nearest Neighbor" ou K-ésimo vizinho mais próximo) é um método de classificação supervisionado não-paramétrico no qual um "pixel" é associado a uma classe, dependendo do número K de pontos vizinhos que pertençam a essa classe (Duda e Hart, 1973), segundo um critério de distância. Em geral, a medida de distância utilizada é a distância Euclidiana. De maneira formal, no treinamento obtém-se vetores de atributos de "pixels" amostrados na imagem para cada classe c , $c= 1, \dots, C$; presente na mesma. Para um dado "pixel", com vetor de atributos x_i , o classificador KNN busca os K vetores de atributos mais próximos dos dados de treinamento. Dos K vetores de atributos na vizinhança do "pixel" a ser classificado, verifica-se a qual classe pertence a maioria k , $k=0, \dots, K$; dos pontos da vizinhança. O único parâmetro livre do classificador é o número de K -vizinhos a serem pesquisados, que é ajustado pelo usuário para se encontrar a melhor classificação. A regra de classificação será:

$$x_i \rightarrow c^* : c^* = \arg \max_c I_{cK}(x_i),$$

onde: I_{cK} é uma função contadora dos pontos pertencentes à classe c dentre os K -vizinhos na vizinhança de x_i , com imagem no conjunto inteiro $\{0, \dots, K\}$.

A Figura 2 mostra um exemplo de classificação K-NN no espaço de atributos bi-dimensional, onde existem 3 classes com suas amostras e deseja-se determinar as classes dos pontos desconhecidos 1 e 2. A idéia da classificação é bastante simples e intuitiva: para classificar um ponto, primeiro toma-se os K-vizinhos mais próximos dele e dentro desse conjunto, encontra-se a classe mais representativa. Na Figura 2, os 7 vizinhos próximos de cada ponto desconhecido são mostrados pelas linhas que os conectam. Nesse exemplo, o ponto desconhecido 1 será classificado como classe B e o ponto desconhecido 2 como classe A.

Dado que encontrar os K-vizinhos mais próximos para cada ponto a ser classificado, é custoso em termos computacionais, existe uma variação mais rápida desse algoritmo, que consiste em selecionar pontos que estão dentro de uma hiper-esfera de raio R e contar os pontos para cada classe que estão dentro dessa hiper-esfera. O problema é que R deve ser decidido empiricamente pelo usuário e podem ocorrer casos de hiper-esferas sem qualquer ponto.

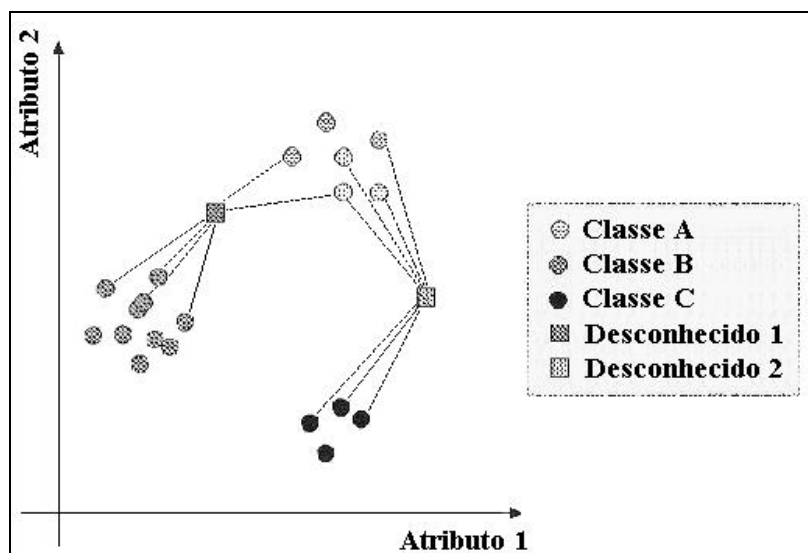


Figura 2 – Esquema de classificação pelo Método K-NN.

A Figura 3 mostra o mesmo exemplo de classificação da Figura 2 com o algoritmo modificado. Nesse caso os pontos que serão considerados como vizinhos são os pontos dentro do círculo centrado no ponto a ser classificado. Para o ponto desconhecido 1, existem 5 pontos dentro ou parcialmente dentro do círculo e portanto ele será classificado como classe B. Para o ponto desconhecido 2 existe somente um ponto da classe A e portanto ele será classificado como classe A.

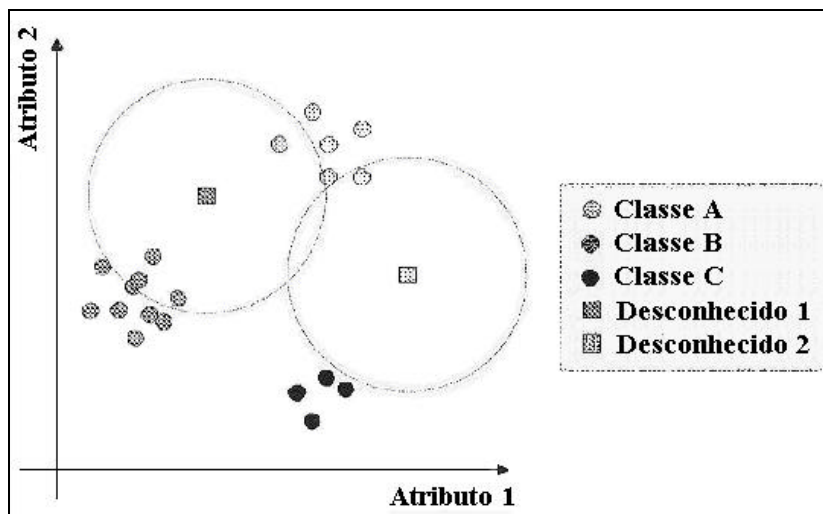


Figura 3 – Variação do esquema de classificação pelo Método K-NN, são usadas hiper-esferas de raio R.

A dificuldade no ensino deste tipo de classificador, assim como no classificador não-supervisionado apresentado anteriormente, reside na compreensão do espaço de atributos e também no entendimento das distâncias no espaço multidimensional.

3. Sistemas de Realidade Virtual para Apoio ao Ensino

Acredita-se que num futuro próximo, estudantes utilizarão sistemas de realidade virtual para a simulação e visualização interativa de dados em ambientes personalizados (Schnepf et alli, 1994). O objetivo principal dos sistemas atualmente em pesquisa e desenvolvimento é possibilitar a visualização interativa de informações em ambientes imersivos ou semi-imersivos que permitam o envolvimento do aluno com o objeto de estudo, facilitando a sua compreensão. Estes sistemas são especialmente importantes nas ciências exatas em disciplinas dependentes da Álgebra e da Geometria, pois permitem a visualização de conceitos abstratos. Em Estatística, no caso específico das disciplinas em que se utilizam dados multivariados, o entendimento dos dados estatísticos pode ser dificultado pela questão das diversas dimensões envolvidas. A imersão oferecida por sistemas de realidade virtual na observação de gráficos que representem esses dados é bastante favorável (Arns et alli 1999). A utilização de ambientes do tipo Caverna (Cruz-Neira et alli, 1992) simulando ambientes totalmente imersivos em 3D, tanto para estudos de visualização de grandes bancos de dados, quanto para trabalhos colaborativos usando telepresença é desejável (Hardin e Ziebarth, 2000).

Arns et alli (1999) comparou a sensibilidade das pessoas para identificar certos tipos de estrutura de dados estatísticos multivariados com a ajuda do sistema XGobi (Swayne et alli, 1998) baseado em *desktop* em relação a um sistema desenvolvido para a Caverna C2 de 4 lados (três paredes e chão) da Universidade de Iowa. Os estudos concluíram que uma boa parte das pessoas envolvidas se sentiram mais confortáveis interagindo com o sistema *desktop*. Na questão da identificação correta da estrutura de dados, porém, evidenciou-se

que as pessoas que primeiro tentaram-na identificar no C2 obtiveram maior sucesso que as pessoas que primeiro tentaram-na identificar no sistema *desktop*. Provavelmente, isto se deve ao fato que no C2 as pessoas puderam visualizar os dados em um ambiente realmente tridimensional, em oposição ao ambiente em projeção da estação de trabalho que não oferecia visualização estereoscópica.

Com o avanço do ensino à distância, espera-se a redução das limitações geográficas, quando escolas e universidades deverão atender a um grande número de estudantes. Estes estudantes necessitarão de pessoal e ferramentas de suporte ao seu aprendizado (Synnes et alli, 1999), incluindo aí a utilização de sistemas imersivos. Atualmente, porém, apesar de poder ser muito útil, a utilização da Realidade Virtual está limitada em vários segmentos pelos altos custos envolvidos tanto dos sistemas computacionais quanto dos dispositivos. Os custos de um ambiente imersivo do tipo Caverna ainda são altos, além de haver a necessidade de redes de alta velocidade com conexões ATM para obter razoáveis performances em aplicações envolvendo áudio e vídeo (Plagemann e Goebel, 1997). Os dispositivos de sensação tátil ainda não são suficientemente populares e nem mesmo padronizados. Porém, já está em fase de pesquisas, novos meios de se interagir com ambientes virtuais que não limitem tanto o usuário, tais como o uso de gestos das mãos ou mesmo a fala (LaViola, 2000) que podem em um prazo relativamente pequeno, tornar a Realidade Virtual mais acessível. Sistemas de baixo custo totalmente imersivos tipo Cavernas também tem sido foco de pesquisas bem sucedidas (Bennett et alli, 2000).

4. O Sistema de Visualização para Apoio ao Ensino

Tendo em mente a preocupação com o acesso às tecnologias imersivas e buscando soluções ao problema do ensino de classificadores de imagens, desenvolvemos um sistema de realidade virtual no qual o aluno pode interagir e visualizar o funcionamento dos dois classificadores citados acima: o classificador não-supervisionado por Agrupamento Hierárquico e o classificador não-supervisionado usando a metodologia K-NN. O objetivo do sistema é fornecer uma visualização imersiva e interativa do funcionamento do classificador no espaço de atributos. Dentro de um ambiente tridimensional, pode-se observar que pontos pertencentes a uma mesma classe estão próximos no espaço.

Na sua primeira versão, o sistema permite a visualização de um conjunto de dados obtidos de imagens reais (bandas 3, 4 e 5 do sistema Landsat) para amostras de uma imagem da região amazônica, próxima a Floresta Nacional do Tapajós (Figura 4a) com quatro classes: Floresta, Rio Tapajós, Área Antropizada e Área de Alagamento. As amostras coletadas na imagem são representadas por pontos em um gráfico 3D, onde cada eixo corresponde a um atributo (banda espectral). Na Figura 4b, pode-se observar as posições das amostras coletadas para cada classe na própria imagem, para utilização pelo classificador supervisionado KNN. O próprio aluno pode marcar as posições de coleta das amostras na imagem. Na Figura 4c, pode-se observar a imagem com as suas classes reais e na Figura 4d, a posição das amostras sobre a imagem com as classes reais.

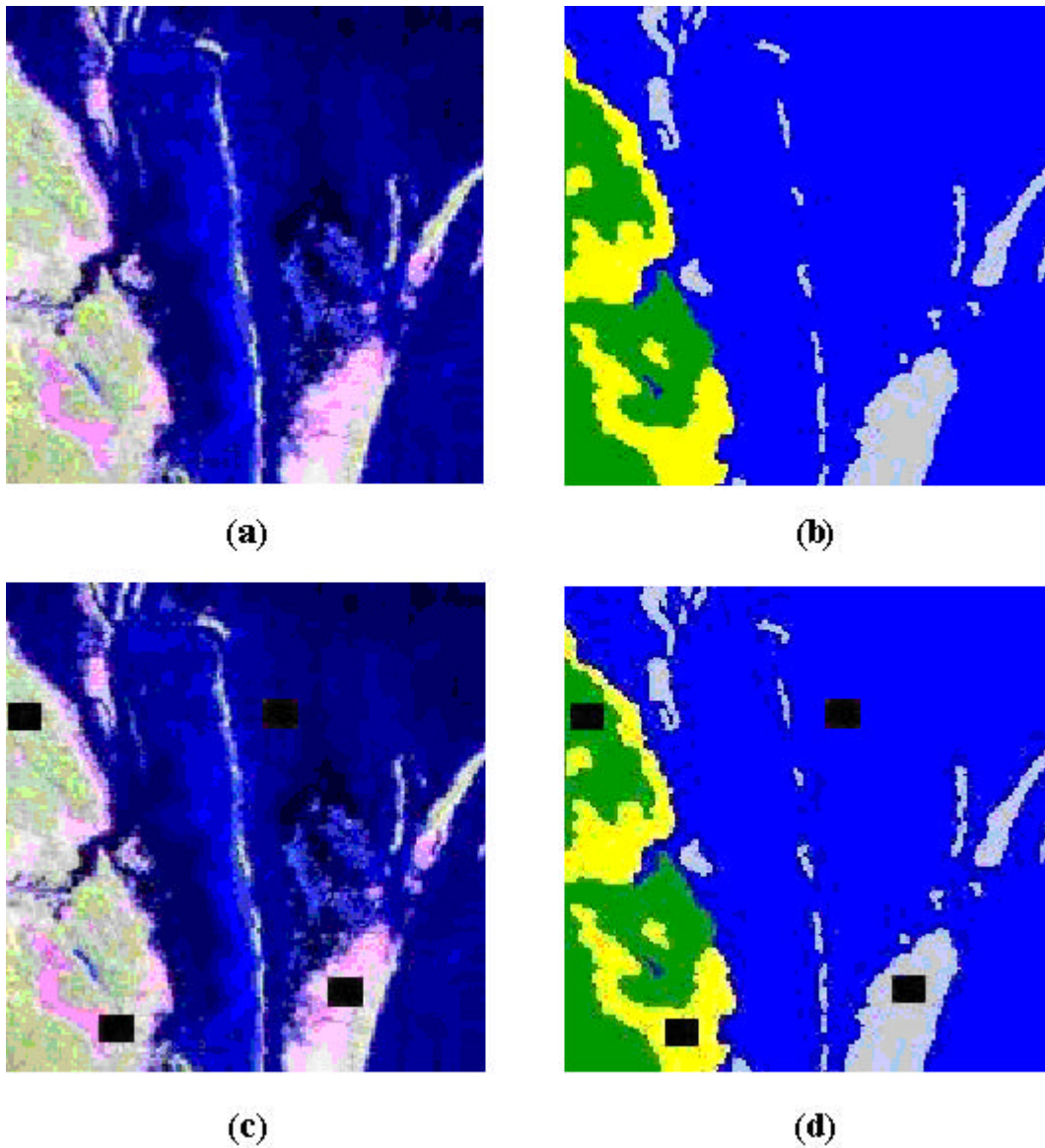


Figura 4 - Imagem usada no Sistema de Visualização: (a) Imagem em composição RGB falsa-cor da área; (b) Área com as classes reais; (c) Amostras coletadas sobre a imagem (a); Amostras sobre a imagem com as classes reais.

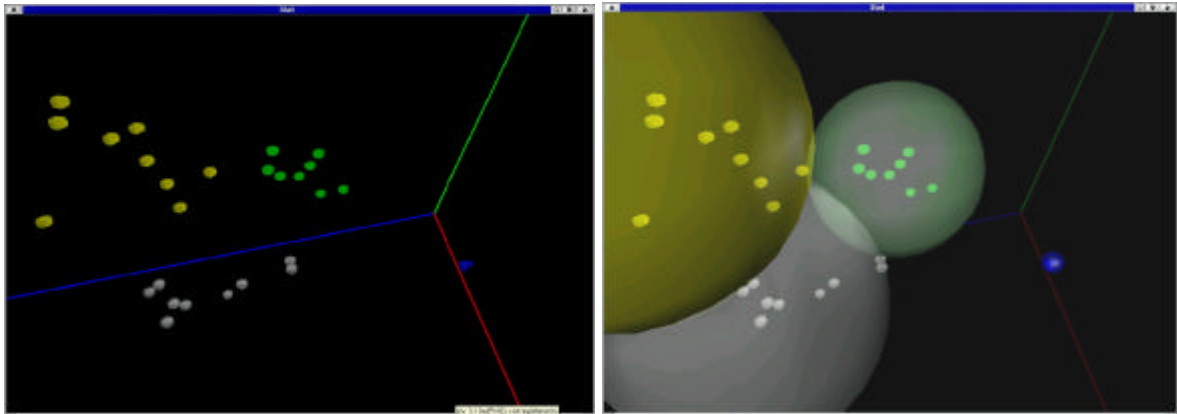


Figura 5 - As quatro amostras no espaço tridimensional e as classes encapsuladas são exibidas no ambiente imersivo.

Na Figura 5, os eixos x,y,z representam cada uma das bandas espectrais da imagem e os pontos representam os valores das amostras segundo essas bandas. As cores verde, azul, amarelo e cinza representam, respectivamente, os valores dos pontos amostrais das classes Floresta, Rio Tapajós, Área Antropizada e Área de Alagamento.



Figura 6 – Duas situações de utilização do sistema na Caverna Digital do LSI/USP.

Foram desenvolvidas duas versões deste sistema. A primeira é voltada para sistemas *desktop* em plataforma Linux/PC e a segunda para ambientes de imersão total – tipo Caverna - em plataformas Unix/SGI. Para a versão *desktop*, o programa desenvolvido utilizou as APIs OpenGL(tm) e GLUT (GL Utility Toolkit), sendo possível executá-lo em máquinas PC sob GNU/Linux. O usuário pode interagir com o sistema usando um *mouse* comum. Esta versão simplificada pode ser utilizada por alunos através de PCs sob plataforma Linux, conforme mostra a Figura 5.

Para a utilização do sistema em ambientes de imersão total, como a Caverna Digital do LSI/USP, são necessárias bibliotecas que permitam o acesso aos diversos projetores, renderizando diferentes pontos de vista por meio de bibliotecas comerciais como a

CAVELib ou usando uma biblioteca própria para *cluster* de PCs que está sendo desenvolvida no LSI/USP. Neste caso, foram utilizadas as funções de exibição gráfica da CAVELib em substituição as da GLUT. Como vantagem, temos que a própria CAVELib inclui formas automáticas para gerar estereoscopia, observada através de óculos obturadores. A interação do usuário com o sistema é feita com 6 graus de liberdade através de um *mouse* e teclado sem fios, ou *trackers (mouse 3D)*, permitindo ações de translação e rotação. A Figura 6 ilustra a utilização do sistema na Caverna Digital de 5 faces do LSI/USP. Esta versão do sistema é apropriada para aulas expositivas das disciplinas de Processamento Digital de Imagens.

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Neste artigo é proposta a utilização de Sistemas de Realidade Virtual para auxiliar no aprendizado da concepção estatística e funcionamento espacial dos classificadores de imagens. Apresenta-se um sistema que coloca os usuários dentro de dimensões matemáticas abstratas permitindo a visualização dos conjuntos de dados estatísticos utilizados na classificação de uma imagem. Este sistema possui duas versões: uma para a fácil utilização por alunos em PCs sob plataforma Linux e uma outra para ambientes de imersão total, onde os alunos podem obter uma melhor compreensão do espaço de atributos e também um melhor entendimento das distâncias no espaço multidimensional. Nesta segunda versão utiliza-se um sistema UNIX em plataforma SGI, específico para Cavernas Digitais, como a do LSI/USP.

Pretende-se, para breve, a finalização de uma nova versão utilizando a biblioteca para *cluster* de PCs que está sendo desenvolvida no LSI/USP também para Cavernas Digitais, incorporando um maior número de classificadores de imagens. Futuramente, esse sistema será convertido em um vídeo educacional interativo para apoio ao ensino de classificação de imagens que também deverá ter duas versões como o sistema aqui relatado: uma versão para sistemas *desktop* e outra versão para Cavernas Digitais.

6. Referências

- All, S.; Nourbakhsh, I. R.; Insect Telepresence: Using robotic tele-embodiment to bring insects face-to-face with humans, *Autonomous Robots*, special issue on Personal Robotics, in print 2000.
- Arns, L.; Cook, D.; Cruz-Neira, C.;. The Benefits of Statistical Visualization in an Immersive Environment. *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, 1999, pp88-95
- Baridó, M.P.F.; *Uma comparação entre diferentes métodos multivariados de classificação*. Dissertação de Mestrado - Instituto de Matemática - UFRJ - Rio de Janeiro, 1989, 189 pág.
- Bennett, D. et alli; A Low Cost Commodity Based System for Group Viewing of 3D Images. In *Proceedings of Visualization Development Environments*, Princeton, 2000.
- Bezdek, J. C.; Chuah, S. K. and Leep, D.; Generalized k-Nearest Neighbor Rules. *Fuzzy Sets and Systems*, 18: 237-256, 1986.

- Cooper, D.B.; Freeman, J.H. "On the Asymptotic Improvement in the Outcome of Supervised Learning Provided by Additional Nonsupervised Learning". *IEEE Transactions on Computers*, vol.19, n.11, novembro, 1970.
- Cruz-Neira, C.; Sandin, D.J.; DeFanti, T.A.; Kenyon, R.V.; Hart, J.C. "The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment". *Communications of ACM*, 35: 64-72, 1992.
- Duda, R. O.; Hart, P. E.; *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York: John Wiley and Sons, 1973.
- Dunn, J.C.; "A Graph Theoretic Analysis of Pattern Classification via Tamura's Fuzzy Relations". *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol SMC-4, 1974, pg 310-313
- Eckert, A.; Geyer, W; Effelsber, W.; A Distance Learning System for Higher Education Based on Telecommunications and Multimedia A Compound Organizational, Pedagogical, and Technical Approach. In: *Proc. ED-MEDIA'97*, World Conference on Educational Multimedia and Hypermedia, Calgary, Canada, June 1997.
- Gonzales e Woods, *Processamento Digital de Imagens*. Ed. Edgard Blücher, 2000
- Hardin, J.; Ziebarth, J.; Digital Technology and its Impact on Education. 2000. [on line] <http://www.ed.gov/Technology/Futures/> , maio de 2001.
- Johnson, R.A. and Wichern, D.W.; *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice-Hall Inc., 1982
- Kaufmann, H.; Schmalstieg, D; Wagner, M.; Construct3D: A Virtual Reality Application for Mathematics and Geometry Education. *Institute of Computer Graphics and Algorithms*, Vienna University of Technology, Technical Report TR-186-2-00-16, June 2000.
- Kent, J.T. and Mardia, K.V.; "Spatial Classification Using Fuzzy Membership Models". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.10, n.5, September, 1988, pp 659-671
- LaViola, J. "MSVT: A Virtual Reality-Based Multimodal Scientific Visualization Tool", In *Proceedings of the Third IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging*, 1-7, November 2000.
- Mather, P. M.; *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*. Chichester: John Wiley and Sons, 1987
- Moraes, R. M.; *Implementação de um sistema contextual de classificação de imagens orbitais compatível com o sistema SITIM*. Dissertação de Mestrado, UFPb, 1992, 100 pg.
- Moraes, R.M.; A Fuzzy Expert Systems Architecture for Image Classification Using Mathematical Morphology Operators. PhD Thesis. INPE, São José dos Campos, Br, 1998 [in Portuguese].
- Mustavi, M. T.; Chan, K. H.; Hummels, D. M. and Kalantri, K.; On the Generalization Ability of Neural Network Classifiers. *IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Intel.* 16, 659-663, 1994.
- Plagemann, T; Goebel, V.; Experiences with the Electronic Classroom - QoS Issues in an Advanced Teaching and Research Facility. In *Proceedings, Workshop on Future Trends in Distributed Computing Systems IEEE FTDCS'97*, 1997.

- Richards, J. A.; *Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction*. Berlin, Springer-Verlag, 1995.
- Sæbo, H.V.; Braten, K.; Hjort, N.L.; Llewlynn, B. and Mohn, E.; *Contextual Classification of Remotly Sensed Data : Statistical Methods and Development of a System* - Report n.768 - Norwegian Computing Center - Oslo - 1985
- Sawant, N. et alli; The Tele-Immersive Data Explorer: A Distributed Architecture for Collaborative Interactive Visualization of Large Data-sets, *4th International Immersive Projection Technology Workshop*, Ames, Iowa, 2000
- Schnepf, J.; Mashayekhi, V.; Riedl, J.; Du, D.; Closing the Gap in Distance Learning: Computer-Supported, Participative, Media-Rich Education. *Education Technology Review*, Autumn/Winter, 1994, pg 19--25.
- Simpson, P. K.; *Artificial Neural Systems*. Pergamon Press, New York, 1990.
- Swayne D. F.; Cook, D. e Buja, ^a; Xgobi: Interactive Synamic Graphics in the X Window System. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1998.
- Synnes, K.; Parnes, P.; Widn, J.; Schefstrm, D.; *Net-based Learning for the Next Millenium*. Lule: Research Report 1999-05 Lule University of Technology, Sweden, 1999.