

Imagens de alta resolução do satélite *Quickbird* e técnicas de SIG para a análise de problemas geológico-geotécnicos em áreas urbanas: estudo de caso Belo Horizonte (MG).

Hermann Johann Heinrich Kux ¹
Eduardo Henrique Geraldi Araújo¹
Henri Simon Jean Benoît Dupont ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP
{hermann, araujo}@ltid.inpe.br

² UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências
Av. Antonio Carlos, 6627 – Pampulha, 31.270 Belo Horizonte, MG
hdupont@dedalus.Icc.ufmg.br

Abstract: Due to an intense urbanization process occurring in Brazil, indicated by a strong population increase in the cities, with serious impacts on environment and quality of life, there is a growing demand to develop and use methodologies related to new information technologies which would allow faster decision taking by city planning institutions. This paper presents spatial inferences from two quarters of Belo Horizonte (Minas Gerais State Capital) based on topographical, geological and geotechnical data as well as on the municipal Legislation for Parceling, Occupation and Land Use, as well as on the analysis of a *Quickbird* satellite image. Based on such information, those areas of hazard for construction purposes, are indicated for the two city quarters under study, namely Belvedere and Buritis.

Palavras-chave *Quickbird* satellite, high-resolution images, remote sensing, GIS, urban planning, geo-technology, satélite Quickbird, imagens de alta resolução, sensoriamento remoto, SIG, planejamento urbano, geo-tecnologia.

1. Introdução

A associação de informações de diferentes fontes num ambiente computacional permite obter uma visão mais detalhada de áreas urbanas. Este conjunto de dados permite inferências espaciais, fornecendo informações necessárias para o planejamento urbano. Neste trabalho, informações geológicas, geotécnicas e geomorfológicas são consideradas na análise dos impactos da expansão urbana em dois bairros (Belvedere e Buritis) de Belo Horizonte (MG). Foi usada ainda a Legislação de Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo (Belo Horizonte, 1996 e 2000) e uma classificação digital de uso do solo obtida a partir de uma imagem do satélite de alta resolução *Quickbird*. O objetivo deste estudo é usar técnicas de processamento digital para apresentar aqueles setores urbanos com vulnerabilidade geológica/geotécnica a atividades humanas e à propriedade, a partir de informações disponíveis de ambos os bairros. Constitui parte de um trabalho mais detalhado executado por Araújo (2006) no INPE, disponível *online*. Este autor desenvolveu uma metodologia para o estudo multi-temporal do espaço urbano, através da análise de dados de um satélite de alta resolução, usando um novo paradigma: a classificação orientada a objeto (Baatz & Schäpe 2000, Benz et al. 2004) e dados auxiliares.

2. Aspectos relevantes de geologia e geomorfologia dos bairros Belvedere e Buritis do ponto de vista geotécnico

Estes bairros (**Figura 1**) foram escolhidos como estudos de caso, por tratar-se de setores urbanos que sofreram grandes alterações recentemente.

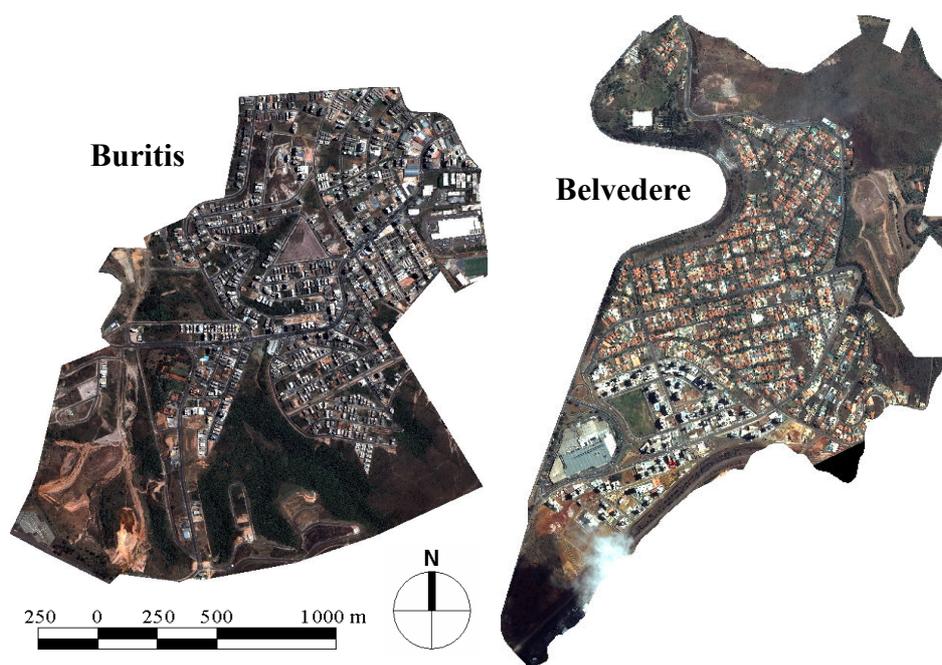


Figura 1: Bairros Buritis e Belvedere em Belo Horizonte. Cena do *Quickbird* de 2004.

Belvedere, o bairro localizado no extremo sul da cidade, está dividido em dois setores bem definidos: um mais antigo e já consolidado, exclusivamente residencial e horizontal e outro, mais recente, com construções multi-familiares (apartamentos) e de uso comercial. De acordo com Silva et al. (1995) a geologia deste bairro constitui-se de litologias do Supergrupo Minas (Grupos Itabira e Piracicaba), a saber: itabiritos, dolomitos, quartzitos, filitos e diferentes tipos de xistos com direção predominante NE-SW e mergulho de 45° para SE. Estas direções de xistosidade e mergulho tornam-se extremamente importantes nas rochas alteradas e são críticas para o posicionamento de cortes de terreno, como em escavações para obras públicas ou privadas. De acordo com Silva et al. (1995), as unidades geotécnicas do Belvedere mostram um denso sistema de fraturas que permite a queda de blocos e deslizamento de encostas. No que concerne aos aspectos geotécnicos para as construções de fundações de prédios, as vertentes inclinadas para SE apresentam condições desfavoráveis para fundações rasas. Quanto à construção de aterros e taludes, há fortes probabilidades de escorregamentos rasos ao longo do plano de xistosidade. As vertentes que coincidem com a direção, inclinação ou xistosidade do substrato, apresentam uma estabilidade inferior, principalmente nas áreas de filitos, especialmente para cortes no terreno e aterros.

Buritis é um bairro com quase somente construções verticais onde, devido a vertentes inclinadas e um substrato instável, fundações de edifícios profundas e caras foram feitas (às vezes as fundações são mais caras que os próprios edifícios). Aqui também está ocorrendo uma forte impermeabilização do solo às custas da redução de área verde, aumentando os riscos de inundações locais e de escorregamento durante a estação chuvosa. O Buritis (**Figura 1**) foi instalado quase que totalmente sobre filitos com xistosidade (Silva et al., 1995) e quanto ao seu comportamento geotécnico, este bairro apresenta bastante similaridade com o Belvedere.

Em ambos bairros as condições de estabilidade dependem da inclinação do substrato ser superior à inclinação das encostas. Mesmo em condições favoráveis, depósitos de vertentes podem escorregar a partir de escavações abertas para a construção de ruas ou prédios. Tais seções são zonas de perigo de deslizamentos. Considerando que Buritis é um bairro com grandes amplitudes de relevo e vertentes fortemente inclinadas em quase toda a sua extensão (**Figura 2**), possui seções com alta probabilidade de escorregamento, considerando

especialmente que se trata de um setor com intensa atividade de construção. Devido às condições geológicas e geomorfológicas desfavoráveis à ocupação da terra de Buritis, Silva et al. (1995) concluíram num laudo técnico que: 1) a estrutura geológica local é caracterizada pela xistosidade e mergulho de 45° para SE; 2) os filitos estão bastante intemperizados; 3) há necessidade de preservação da vegetação arbórea ao longo de rios; 4) as condições de estabilidade de aterros e fundações são favoráveis às vertentes voltadas para NW. Estes autores recomendam, para os projetos de construção de edifícios, intercalações de amplos espaços livres entre os mesmos. Não obstante, estas recomendações não foram seguidas e se observa uma forte concentração de edifícios, aumentando o risco de deslizamentos.

3. Materiais e Métodos

Para se fazer inferências espaciais no âmbito de um SIG, foi necessário inicialmente coletar as informações disponíveis da área em estudo. Os seguintes materiais foram usados: 1) Um mapa geológico-geotécnico elaborado por Silva et al. (1995), na escala 1:25.000, no âmbito de um convênio entre a Prefeitura de Belo Horizonte (PMBH) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e executado pelo Departamento de Geologia (Carvalho, 1999); 2) A Legislação municipal de Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo disponível no site <http://www.pbh.gov.br/mapas/leiuso/mapas.htm>; 3) Uma imagem do satélite *Quickbird* de 2004, tipo ORStandard-2A; PAN 0,60m and MULTI 2,40m; 4) Um Modelo Digital de Elevação (DEM), baseado num mapa topográfico em escala 1:8.000, fornecido pela PRODABEL (Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte, órgão da Prefeitura); 5) Três mapas digitais geológico/geotécnicos com os fatores de risco, estabelecidos por Silva et al. (1995). Cada mapa contém as áreas que apresentam riscos à população e à propriedade relacionados a escavações, escorregamentos de terra e erosão. Estes autores definem os riscos, considerando os processos e fatores abaixo mencionados:

- Escorregamento: mais importante processo geotécnico que ocorre em Belo Horizonte relacionado à geologia (litologia, intemperismo, aspectos estratigráficos e estruturais), e ao contexto geomorfológico (aspectos morfoгенéticos e características das vertentes);
- Erosão: processo que ocorre com velocidade variável e sazonalmente, influenciado pela atividade humana, apresentando avanço lento porém cumulativo com o tempo;
- Escavação: especificamente em áreas geologicamente desfavoráveis, este fator ativa processos que podem envolver perdas materiais e humanas. Frequentemente é a consequência de movimentação de terra mal planejada e/ou executada.

Para usar estas informações num ambiente SIG, foi necessário analisar e eventualmente modificar os dados de entrada. O mapa geológico-geotécnico de Silva et al. (1995) foi digitalizado e simplificado, considerando aquelas feições de interesse e usadas como uma camada (*layer*) de SIG. Os mapas da Legislação Municipal de Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo abaixados do *site* mencionado, em formato incompatível para um SIG, foram editados para usar a sua informação em inferências urbanas. O mapa contém o zoneamento urbano da área em estudo que limita a ocupação a locais específicos (cada setor possui parâmetros diferentes de ocupação). A imagem do satélite *Quickbird* foi processada digitalmente e classificada automaticamente, usando um novo paradigma: a classificação orientada a objetos (Blaschke et al. 2000, Blaschke & Kux, 2005, Herold et al. 2003, Pinho 2005, Thomas et al. 2003). O resultado deste procedimento é um mapa de uso/cobertura do solo da área de estudo, que foi usado para especificar alvos de interesse (p.ex. construções, asfalto, solo nu, vegetação).

O DEM foi usado para gerar mapas de inclinação das vertentes (**Figura 2**) e de sua orientação (**Figura 3**). A inclinação das vertentes é informação importante porque a legislação limita as construções baseadas neste indicador e os perigos geológico-geotécnicos aumentam em encostas

mais inclinadas. Assim, de acordo com a legislação municipal mencionada, definimos 4 classes de inclinação de vertentes; 0-15%, 15-30%, 30-47% e acima de 47% (**Figura 2**).

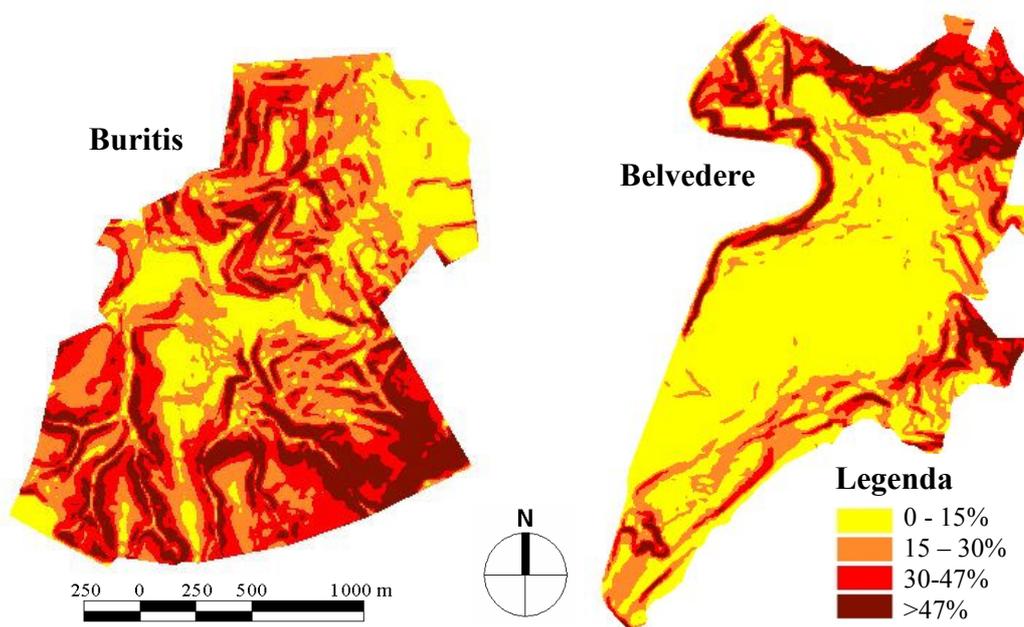


Figura 2: Mapa de inclinação de vertentes.

Informações sobre a direção das vertentes também são relevantes neste tipo de análise. Com base no mapa geológico-geotécnico referido, o arquivo numérico gerado pelo processamento feito no DEM foi fatiado em 3 classes de orientação de vertentes, enfatizando especialmente a direção para SE (**Figura 3**).

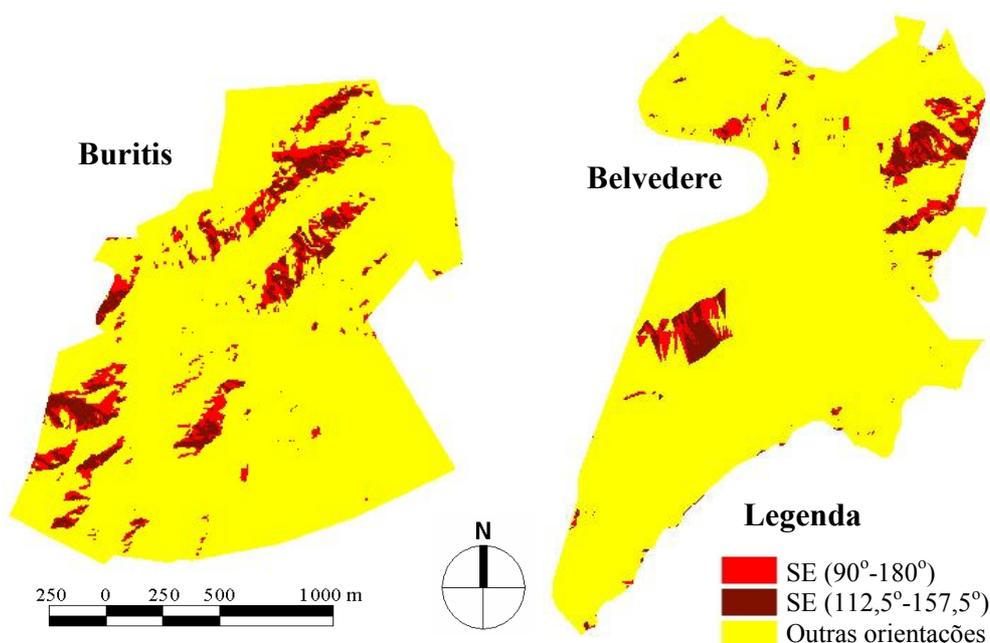


Figura 3: Mapa de orientação das vertentes para SE.

Os 3 mapas de perigos geológicos-geotécnicos (contendo áreas de alto risco à população e propriedade, relacionados a escavações, escorregamentos e erosão), após as correções devidas a deslocamentos de posicionamento, foram importados para um SIG. Com base nestes mapas geramos um mapa-síntese, indicando aqueles pontos sujeitos a um, dois ou todos os três riscos (**Figura 4**).

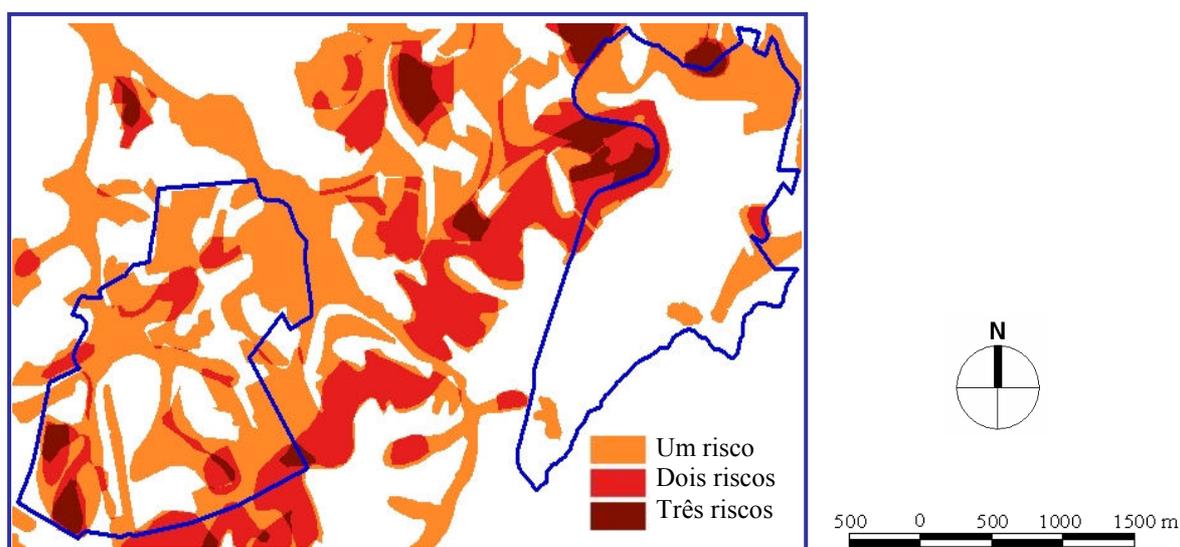


Figura 4: Áreas críticas de riscos geológicos.

Após adquirir e processar as informações disponíveis da área em estudo, este conjunto de dados foi importado para um SIG, para desenvolver as inferências espaciais mencionadas. Estas inferências referem-se a duas análises espaciais feitas em ambos os bairros: a análise de perigos de deslizamento de encostas (**Figura 5**) e uma avaliação da Vulnerabilidade Ambiental à População e Propriedade (**Figura 6**).

Para a análise de perigos de deslizamento de vertentes, introduzimos num SIG dados sobre a orientação de vertentes, inclinação e geologia. O Mapa Geológico-Geotécnico de Silva et al. (1995) não foi considerado diretamente nesta inferência, porque a direção e o mergulho das unidades geológicas são semelhantes nas formações de ambos os bairros analisados. Definimos uma operação *booleana* usando o pacote de software SPRING (INPE, 2005). Geramos um mapa temático, indicando os riscos de escorregamento, incluindo quatro classes: alto, médio, baixo e nulo (**Figura 5**). Na área em estudo, as vertentes direcionadas para SE, com forte inclinação, são mais propícias a deslizamentos, porque a direção geral das camadas é SW-NE, com mergulho médio de 45° para SE (Silva et al. 1995). De acordo com o Mapa Geológico-Geotécnico, as vertentes orientadas para SE numa inclinação de 100% (45°) são mais suscetíveis a deslizamentos. Considerando estas informações, o objetivo deste procedimento foi apresentar aquelas áreas com forte inclinação de vertentes orientadas para SE.

A inferência espacial de Vulnerabilidade Ambiental à População e Propriedade teve por objetivo mapear os locais de ambos os bairros com características que poderiam potencialmente causar acidentes quando ocupados ou alterados pelo homem. As áreas disponíveis para construção com condições geológicas-geotécnicas críticas, associadas à inclinação das vertentes e uma legislação permissiva foram os alvos desta inferência. Dentro desta concepção, as seguintes camadas foram importadas para o SIG: 1ª o mapa de zoneamento urbano com base na legislação municipal de parcelamento, ocupação e uso do solo; 2ª a classificação temática de uso do solo (Araújo, 2006); 3ª o mapa de inclinação das vertentes e 4ª o mapa de áreas críticas a riscos geológicos. O mapa de zoneamento urbano foi usado para identificar aquelas áreas com limites mais tolerantes. Geralmente estes locais são as áreas mais procuradas para construções. O número de andares e de unidades residenciais permitidas para cada prédio e lote e a percentagem de área permeável são alguns dos parâmetros usados para classificar cada zona. A classificação de cobertura do solo baseada na imagem do *Quickbird* permitiu identificar as áreas não-ocupadas. Tal informação foi usada para definir aquelas áreas onde há maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos,

porque tais locais em breve sofrerão alguma intervenção humana. Finalmente o mapa de áreas críticas a riscos geológicos foi usado para indicar aqueles locais predispostos para sofrer riscos geológicos-geotécnicos. As áreas com mais de um processo geológico associado (p.ex. erosão e escorregamentos) representam um risco maior à população e à propriedade (**Figura 4**). Considerando o conjunto de dados acima mencionado, o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental à População e Propriedade (**Figura 6**) foi elaborado por um Processo Hierárquico-Analítico (AHP) que permite atribuir diferentes pesos a cada uma das quatro camadas de SIG consideradas, de acordo com a sua importância para a análise. Cada dado de entrada foi comparado individualmente a um outro e classificado pela sua relevância ao projeto. Procedeu-se desta forma para o estabelecimento de uma hierarquia entre eles. Posteriormente cada classe de cada mapa temático (tipo de dado usado neste procedimento) recebeu uma graduação entre 0 e 1, que mostrou o seu significado dentro deste mapa específico. Assim cada classe de cada mapa obteve a sua ponderação particular no resultado final.

4. Resultados e Discussão

As **Figuras 5 e 6** (Mapa de riscos de deslizamentos de encostas e Mapa de Vulnerabilidade Ambiental à População e Propriedade) resumem os resultados obtidos. As áreas de riscos de deslizamentos de encostas indicam as seções que possuem encostas fortemente inclinadas e estão orientadas para SE.

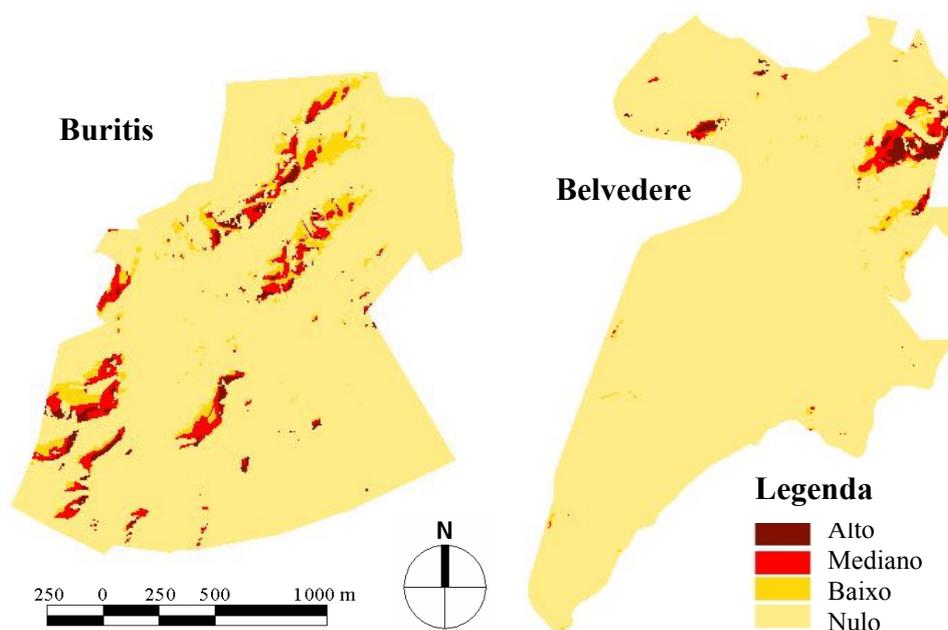


Figura 5: Mapa de riscos de deslizamento de encostas

Observa-se que Buritis é mais suscetível a escorregamentos pelo fato de haver mais encostas voltadas para SE (**Figura 3**) com forte inclinação (**Figura 2**). Aqui consideramos somente estes dois mapas. Não obstante, deve ser mencionado que informações relevantes do tipo de solo e de sua cobertura vegetal não foram usados. Desta forma o resultado desta inferência pode ser um guia geral para o futuro planejamento urbano.

Finalizando, o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental à População e Propriedade (**Figura 6**) resume todos os tópicos anteriormente tratados, considerando dados de riscos geológicos, cobertura da terra, legislação municipal e inclinação das vertentes. Nesta análise, a identificação de áreas críticas de riscos geológicos (**Figura 4**) é essencial, pois estas seções são os locais mais prováveis de danos à população e propriedade.

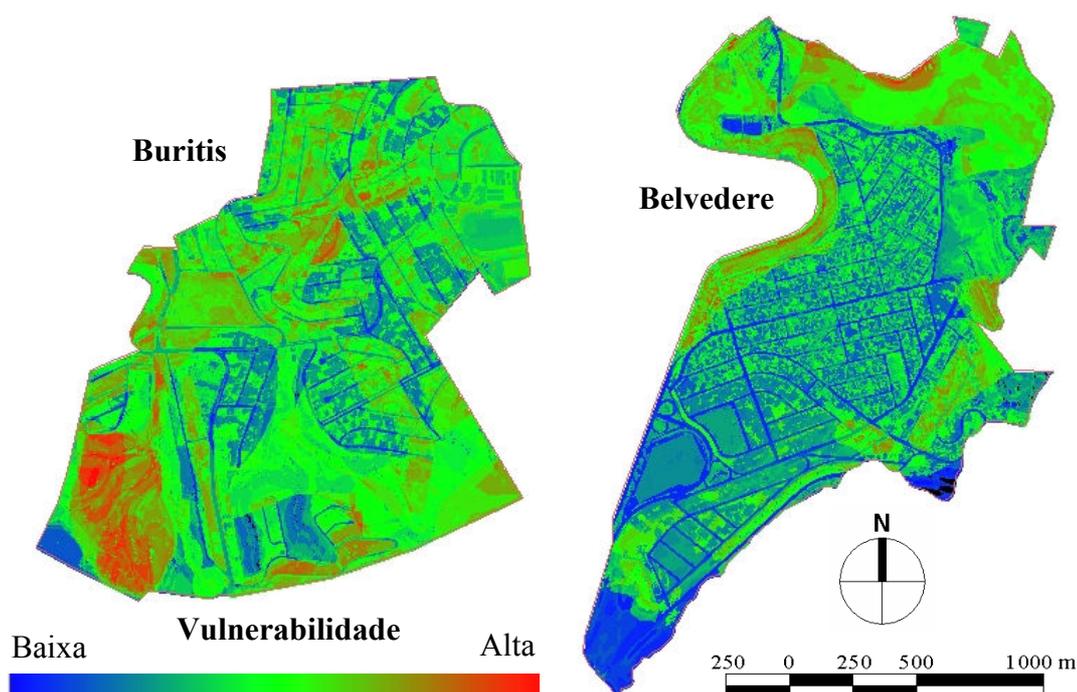


Figura 6: Mapa de Vulnerabilidade Ambiental à população e propriedade

Aqui se observa as áreas onde há uma alta probabilidade de ocorrência dos fenômenos naturais mencionados. Tais áreas encontram-se sob uma legislação menos restritiva para construções, o que incentiva a construção de edifícios em áreas desfavoráveis do ponto de vista geotécnico, aumentando assim os riscos para a população e propriedade. Isto pode ser observado, comparando-se este mapa com o Mapa de Risco de Deslizamento de Encostas (**Figura 5**). Apresenta também os locais considerados adequados para intervenções público/privadas de acordo com a legislação atual, mas que são suscetíveis a escorregamentos ou erosão, porque tais processos não foram considerados na época de elaboração da legislação pertinente. Observa-se que o Buritis é claramente o bairro mais suscetível a estas ocorrências (**Figura 6**), devido à não-consideração dos seus aspectos geológicos-geotécnicos (**Figura 3**) e topográficos (**Figura 2**) durante o seu zoneamento e da construção de edifícios com vários andares em locais inapropriados. A metodologia usada fornece informação confiável da área em estudo, já que considera diversas bases de dados e a relevância de cada uma. Outras informações significativas poderiam ser usadas na inferência AHP, dependendo porém da sua disponibilidade e qualidade. Um dos objetivos desta inferência foi demonstrar a sua efetividade e os procedimentos aplicados.

5. Conclusão

Este estudo demonstrou como dados de satélite de alta resolução, técnicas de SIG, informações geológicas-geotécnicas e outros dados relevantes podem ser combinados e usados para o planejamento urbano, especialmente naquelas áreas de risco para a população e propriedade. Indica também a necessidade de se manter e atualizar uma base de dados com informações geológicas-geotécnicas relevantes para o planejamento. Esperamos que possa ser uma contribuição para a atualização da Legislação Municipal de Parcelamento, Ocupação e Uso do solo (Belo Horizonte 1996 e 2000) que restringe a construção de casas acima de uma certa inclinação de vertentes, porém não considera os aspectos geológicos-geotécnicos envolvidos.

6. Agradecimentos

Agradecemos a ajuda da PRODABEL pelo fornecimento de um mapa topográfico de alta qualidade, bem como por mapas geológicos-geotécnicos e relatórios da área de estudo. Agradecemos também à Intersat Imagens de Satélite S/C Ltda pelo fornecimento das imagens *Quickbird*.

Referencias bibliográficas

- Araújo, E. H.G. **Análise multi-temporal de cenas do satélite *Quickbird* usando um novo paradigma de classificação de imagens e inferências espaciais: estudo de caso Belo Horizonte (MG)**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m13.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.24.19.43>>
- Baatz, M., Schäpe, A., Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J. & BLASCHKE, T. (Hrsg.): **Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII**. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000. Karlsruhe. (Herbert Wichmann Verlag) 2000, 12-23.
- Belo Horizonte. Lei Nº 8137, 21.12.2000. Disponível em: <www.pbh.gov.br/mapas/leiuso/lei-8137.htm>
- Belo Horizonte. Lei Nº 7165, Agosto 1996. Disponível em: <<http://pbh.gov.br/siga/procuradoria/pgmlegis.htm>>
- Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, vol. 58, n.3-4: 239-258, 2004.
- Blaschke, T., Lang, S., Lorup, E., Strobl, J., Zeil, P. Object-oriented image processing in an integrated GIS/Remote Sensing environment and perspectives for environmental applications. **Environmental Information for Planning**. Vol. 2, 555-570, 2000.
- Blaschke, T. & Kux, H. **Sensoriamento Remoto e SIG avançados - novos sistemas sensores, métodos inovadores**. Oficina de Textos Ltda., São Paulo, SP, 2005. 286 p.
- Carvalho, E. T. **Geologia Urbana para todos: uma visão de Belo Horizonte, Belo Horizonte, MG**, 1999. 176 p.
- Herold, M., Liu, X. & Clarke, K.C. Spatial Metric and Image texture for mapping urban land use. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 69: 999-1001, 2003.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.html>>
- Moreira, S.J.M., Guimarães, A.G., Diniz, A.D. Estudos dos impactos ambientais causados pelo uso e ocupação do solo no bairro Belvedere III. In: X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, **Anais...** Rio de Janeiro, UFRJ, Set. 2003, vol. 1, 823-830.
- Pinho, C.M.D., **Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos - SP**. São José dos Campos, 179 p., Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- Silva, A.B., Carvalho, E.T., Fantinel, L.M., Romano, A.W., Viana, C.S. **Mapa Geológico de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, MG, PMBH, 1995 (Escala 1:25.000).
- Thomas, N., Hendrix, C., Congalton, R.G. A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 69 (9): 963-972, 2003.