

Geomorfologia Cárstica da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar, utilizando LiDAR e VANT – dados preliminares

Orildo Lima e Silva^{1 2}
Francisco Hilário Bezerra²
Alanny Christiny Costa de Melo²
Giovanni Bertotti³
Kevin Bisdom³

¹ PETROBRAS / E&P / UO-RNCE / Gerência de Exploração
Av Eusébio Rocha, 1000, 59070-660, Natal, Brasil
orildo@petrobras.com.br

² UFRN/PPGG - Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica
Campus Universitário S/N, 59078-970, Natal, Brasil
bezerrafh@ufrn.br ; alannymelo@hotmail.com

³ Delft University of Technology
Department of Geoscience & Engineering, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands
{ g.bertotti, k.bisdom }@tudelft.nl

Abstract. This paper presents the results of a project in which a cloud points acquired by Light Detection and Ranging (LIDAR) technology was used to define a few karst geomorphological characteristics in the limestones of the Jandaíra Formation in Potiguar Basin, Brazil. In addition, high resolution aerial photographs acquired by an unmanned aerial vehicle were used. The study area was located next to the cities of Caraúbas, Felipe Guerra, and Governador Dix-Sept Rosado (State of Rio Grande do Norte). The area is crossed by the Mossoró-Apodi river alluvial plain, characterized by a numerous and large karstified outcrops of Late Cretaceous limestones. The preliminary automatic processing of cloud points was adequate for visualization at a regional scale. For the detail-scale analysis of karst geomorphology, the modeled results show distortions of karst landforms, preventing the immediate characterization of the typical ruiniform relief by features generated by dissolution processes, without adequate accuracy. Previous researches have demonstrated that Terrain Analysis or Geomorphometry is the most appropriate tool to quantify and characterize the karst geomorphology. To fulfill the objective of this research, some steps are still needed: selection of software for reprocessing the cloud points; reclassification of data points separating vegetation and rock in different layers; reinterpolation of resulting points from reclassified clouds using geomorphometric parameters; generation of digital terrain models to detail the karst with sub-meter accuracy and the mosaicking of the reprocessed data in a GIS environment.

Palavras-chave: DEM, Drone, karst geomorphology, modelos digitais de terreno, geoformas, dolinas

1. Introdução

A Geomorfologia Cárstica é o estudo das geoformas que se desenvolvem pela dissolução de rochas e seus processos associados, tanto em superfície quanto em sub-superfície. Geoformas cársticas possuem um maior desenvolvimento sobre calcários e margas com altos teores de carbonato de cálcio (De Waele et al., 2009). O termo “Karst” deriva do pré-indo europeu “Krs”, pedra dura, que em céltico significa deserto de pedra (Fenelon, 1972; Sweeting, 1972 e 1981 – citados por Kohler, 1995).

A utilização integrada de produtos de sensoriamento remoto, fotografias aéreas, imagens orbitais e modelos digitais de elevação, com apoio de sistemas georreferenciados (GIS), tem se mostrado bastante efetiva para o mapeamento geomorfológico de áreas cársticas conforme Sallun Filho e Karmann (2007), Siart et al. (2009) e Weishampel et al. (2011), bem como para análise de redes de fraturas (Strijker et al., 2012).

A última década assistiu a um aumento explosivo nas descobertas científicas em geologia e geomorfologia a partir de dados de imagens geodésicas com resolução decimétrica (modelos digitais de terreno) derivados de mapeamentos obtidos com tecnologia *laser* aerotransportada (LiDAR - *Light Detection and Ranging*), conforme Glennie et al., (2013) e Meigs (2014). Utilizando dados LiDAR, Weishampel et al. (2011) caracterizaram a paisagem cárstica sotoposta à floresta equatorial, na região ocidental de Belize, identificando 60 depressões verticais, poços e entradas de cavernas até então não registradas por outros pesquisadores.

Na Bacia Potiguar, a caracterização de geformas cársticas e paleocársticas teve início com Xavier Neto (2006), que executou o imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução na região de Fazenda Belém, através do processamento e interpretação de dados bidimensionais e tridimensionais de GPR (*ground penetrating radar*). Além do GPR, o uso de imagens de alta resolução e MDE's, integrados em ambiente GIS, tem se mostrado uma excelente ferramenta para caracterização das interferências do relevo na gestão eficaz das atividades de exploração e produção de petróleo, principalmente nas áreas com ocorrências cársticas, conforme Lima e Silva et al. (2010) e Lima e Silva e Silva (2013). Na Formação Jandaíra a carstificação possui importante condicionamento estrutural, notadamente dos tensores associados à tectônica pós-campaniana, impressa no carste através de falhas, fraturas e blocos elevados que propiciaram o rejuvenescimento do perfil hidrodinâmico, favorecendo e condicionando a espeleogênese em diversos níveis estratigráficos (Maia et al., 2012). Segundo Xavier Neto et al. (2008), a carstificação é essencialmente epigênica, e os planos de falhas e fraturas servem como condutos para a percolação de águas meteóricas que promovem a dissolução da rocha carbonática .

Por outro lado, pesquisas geomorfológicas em áreas cársticas ativas tem se tornado relevantes para o entendimento do relevo paleocárstico, fornecendo elementos significativos para interpretações sísmicas e estudos de correlação, em áreas exploratórias, bem como fornecendo insumos essenciais para estudos de análogos de reservatórios produtores de petróleo e gás. Zeng et al. (2012) utilizando dados sísmicos tridimensionais de alta resolução reconstituíram a geomorfologia cárstica do topo da discordância Siluriano/Ordoviciano, na Bacia do Tarim (NW da China), integrando dados sísmicos, perfis elétricos e radiativos, testemunhos de rocha amostrados pela perfuração de poços e afloramentos correlatos em superfície. Tais autores estabeleceram um modelo de superfície paleocárstica associado ao intenso desenvolvimento de dolinas, coerente com o modelo de reservatórios carbonáticos gerados por sistemas de paleocavernas colapsadas. Esses sistemas são uma importante categoria de reservatórios, que podem apresentar excelentes características permo-porosas, complexa história de formação e grau acentuado de heterogeneidade, especialmente quando envolvem múltiplas fases de carstificação e soterramento (Jesus et al., 2012). Na Formação Jandaíra, Reis Jr. et al. (2014) caracterizaram um sistema de paleocavernas colapsadas, integrando dados de afloramentos em corte de estrada e o uso de GPR, para imageamento da geometria (2D) das paleocavernas.

O objetivo deste trabalho é mapear e caracterizar a geomorfologia cárstica da Formação Jandaíra, usando como base um modelo digital de terreno com acurácia sub-métrica, a partir de nuvem de pontos adquirida por levantamento LIDAR aerotransportado, que poderá fornecer elementos para o entendimento da gênese do relevo cárstico e alimentar um banco de dados que possa subsidiar estudos futuros de modelagem de reservatórios.

A área de estudo está localizada na porção meridional da Bacia Potiguar, entre os municípios de Felipe Guerra, Governador Dix-sept Rosado e Caraúbas, no estado do Rio Grande do Norte (Figura 1). Nesta área vem sendo caracterizadas extensas ocorrências superficiais de calcáreos, conhecidos localmente como lajedos, como também até a presente data, já foram identificadas e estudadas centenas de cavernas e abrigos pelas equipes de espeleólogos do ICMBio/CECAV, conforme Cruz et al. (2010).

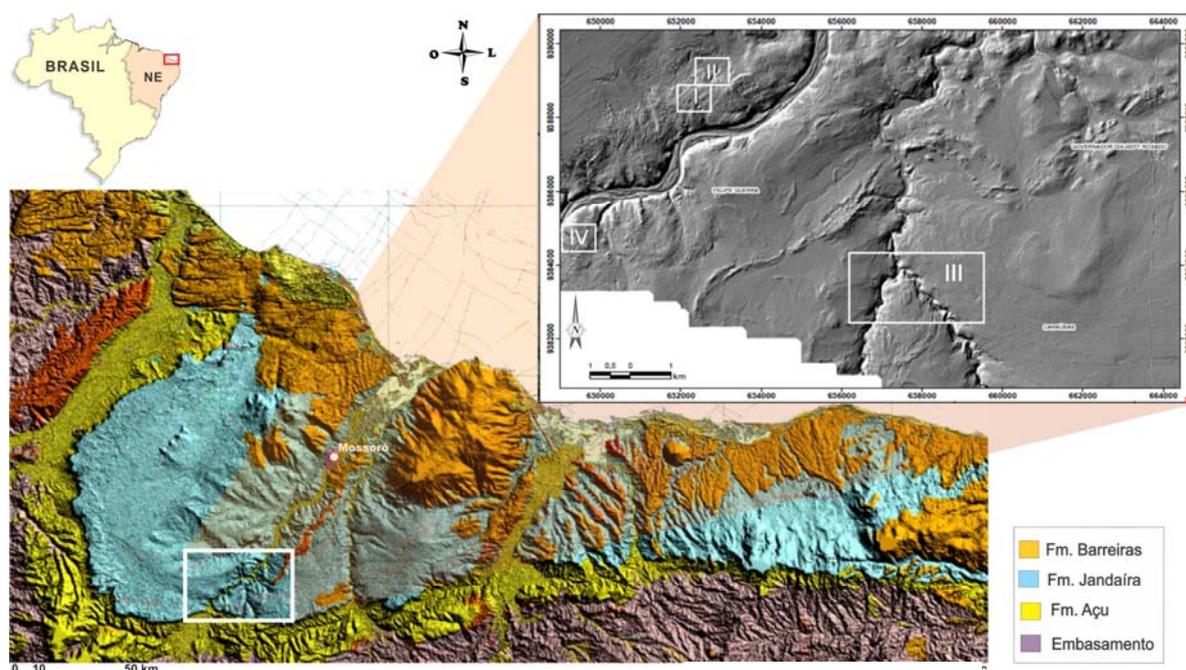


Figura 1- Localização geográfica da área de estudo sobre MDE-LiDAR. Os polígonos brancos representam as sub-áreas descritas no texto. Imagem de fundo: modelo digital de elevação SRTM, integrado com o mapa geológico da Bacia Potiguar emersa (modificada de Milani et al., 2007).

2. Metodologia de Trabalho

Análises de terreno e estudos geomorfológicos tem crescido em importância com a popularização dos modelos de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e a capacidade dos Sistemas de Informações Geográficas de visualizar/analisar grandes áreas de uma só vez. Este fator era, até então, limitado pela escala de imagens de satélite, mosaicos de Radar e pelo baixo nível de detalhe dos modelos de elevação regionais (Grohmann et al., 2008; Valeriano, 2008; Grohmann e Riccomini, 2012).

Dados digitais de altimetria obtidos a partir de sensores *laser* possibilitam a análise do terreno em escala de detalhe, quando comparados com aqueles obtidos por modelos de elevação com características globais (Figura 2). A manipulação de tais parâmetros em ambiente GIS e a utilização de ferramentas de análise geomorfológica permitem ganhos de velocidade e precisão ao processo (Grohmann, 2004).

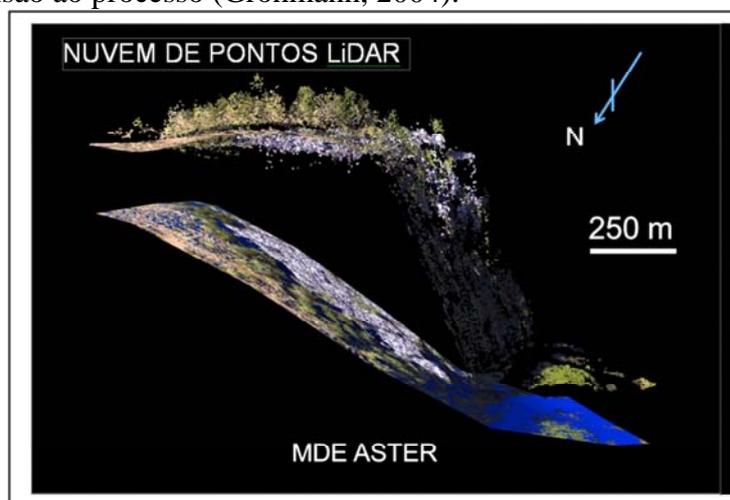


Figura 2 – Visualização comparativa, tridimensional, de dados altimétricos da área de estudo. Acima: nuvem de pontos LiDAR do afloramento da Área IV – dados brutos sem extração dos pontos de retorno da vegetação. Abaixo: Recorte do modelo digital de elevação obtido pelo projeto ASTER-Terra.

A geração de modelos digitais de terreno através nuvens de pontos LiDAR, para posterior utilização em mapeamento geológico-geomorfológico tem, conforme será demonstrado neste estudo, desafios iniciais. O principal desafio a ser atingido, para uma fiel representação do terreno, corresponde a uma eficiente filtragem da nuvem de pontos correspondentes ao solo nu (Silva et al., 2013). No entanto, a distinção entre o solo e as demais feições é um enorme desafio dependendo das características naturais da área (Meng et al., 2010).

Neste projeto, os dados da nuvem de pontos LiDAR foram, preliminarmente, analisados através do software ArcGIS 10.2, sendo também utilizado o software Globalmapper 15. Tais softwares permitem um processamento básico dos dados: classificação dos pontos, filtragem e visualização tridimensional. A interpolação dos pontos obtidos após a filtragem, para geração do MDT pode ser feita utilizando vários softwares, conforme Hug et al. (2004), Iseburg et al. (2006), Weishampel et al. (2011) e Silva et al. (2013).

Dentro do plano de trabalho do Projeto POROCARSTE, um Convênio entre a UFRN, a PETROBRAS e a *Delft University of Technology* foram adquiridas fotografias aéreas de alta resolução através de um sistema VANT (veículo aéreo não tripulado). Estas imagens estão sendo utilizadas para análise integrada e medição de fraturas e lineamentos, subsidiando o mapeamento de detalhe das feições cársticas e morfoestruturais descritas em afloramentos, complementando o mapeamento de detalhe e semi-detallhe a ser gerado, a partir das análises geomorfométricas após o reprocessamento da nuvem de pontos LiDAR.

3. Resultados e Discussão

Este projeto apresenta os primeiros resultados da avaliação do potencial de utilização de nuvens de pontos LiDAR para caracterização das feições cársticas, morfológicas e morfotectônicas desenvolvidas sobre a Formação Jandaíra, integrados com ortofotografias aéreas digitais, fotografias aéreas de ultra-detallhe adquiridas através de um VANT e dados de afloramentos. São aqui apresentados recortes das quatro subáreas de trabalho ilustradas na Figura 1, considerando feições distintas da geomorfologia cárstica da região, já descritas na literatura ou reconhecidas em afloramentos, fotografias aéreas e imagens orbitais.

A identificação e visualização da geomorfologia cárstica em fotografias aéreas e imagens orbitais é, via de regra, dificultada pela densidade da cobertura vegetal. A integração daquelas imagens com um modelo digital de elevação, em ambiente GIS, permite o realce imediato de feições cársticas com expressão superficial, como as dolinas da Área I, mostradas na Figura 3A.

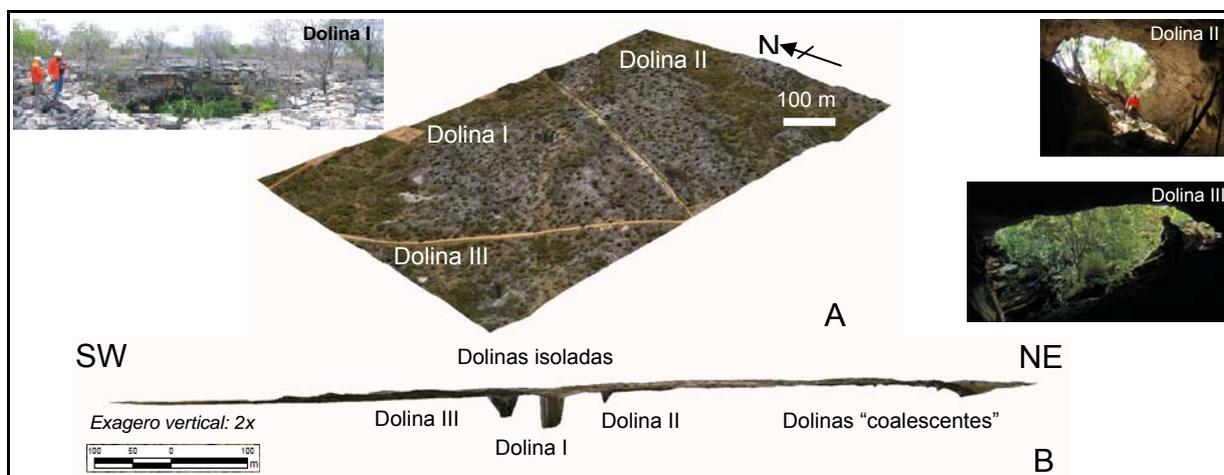


Figura 3 – Identificação de dolinas na Formação Jandaíra através da integração de fotografias aéreas digitais e MDE-LiDAR, utilizando visualizador tridimensional, em ambiente GIS. A) Dolinas isoladas da Área I. B) Dolinas identificadas na Área II, mostrando coalescência e alinhamento SW-NE.

A partir da identificação inicial, das dolinas citadas, ampliou-se o recorte da área de reconhecimento, obtendo-se a caracterização do relevo da vizinhança das dolinas já mapeadas, de modo a identificar outras feições semelhantes no entorno. Obteve-se assim a identificação das geoformas da Área II, feições cársticas de menor porte, com indicação de processo de coalescência, conforme mostra o perfil tridimensional obtido na Figura 3B.

A influência da densidade da vegetação, no período em que foram registrados os dados, e conseqüentemente no produto final obtido, pode ser observada nas Figuras 4A e 5A, embora a vegetação local seja do tipo Caatinga arbóreo-arbustiva esparsa (Figura 4C).

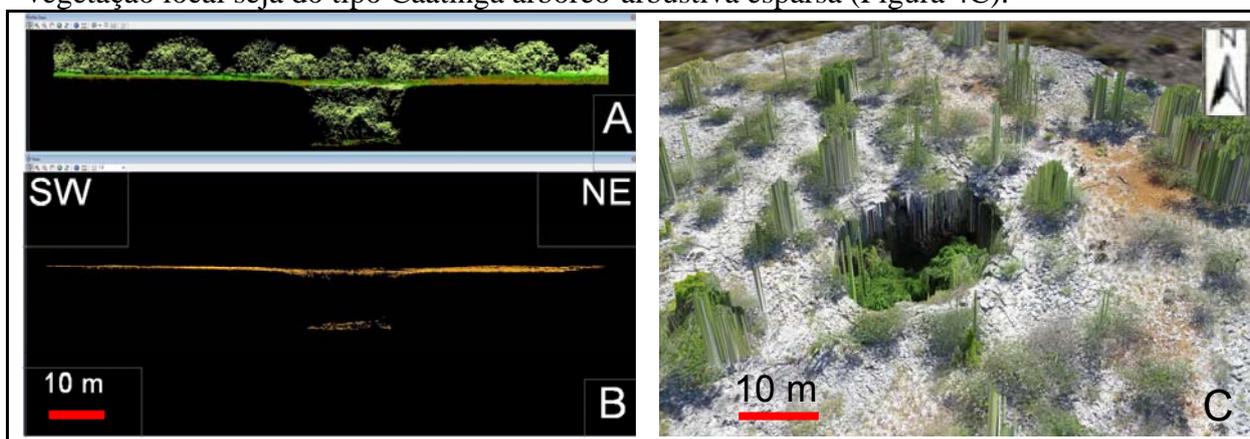


Figura 4 – Identificação de dolinas da Área I, em ambiente GIS. A) Perfil mostrando a nuvem de pontos referentes ao retorno do feixe de laser, incluindo a vegetação. B) Seleção dos pontos classificados como terreno após a extração da vegetação. C) Visualização da dolina através de fotografia digital obtida por VANT, integrada com o respectivo modelo digital do terreno.

A classificação dos pontos da nuvem com software apropriado permite a exclusão dos pontos de retorno relativos à vegetação e a análise dos pontos de resposta relativos à rocha subjacente (Figuras 4B, 5B e 5C). Aplicativos para visualização tridimensional mostram-se bastante úteis e necessários para a interpretação da nuvem de pontos (Figuras 2 e 3). A análise das figuras 5B e 5C indica uma provável coalescência das dolinas, seu menor porte em relação aquelas da Área I (Figuras 3 e 4), bem como o seu alinhamento SW-NE, com suave basculamento para NE.

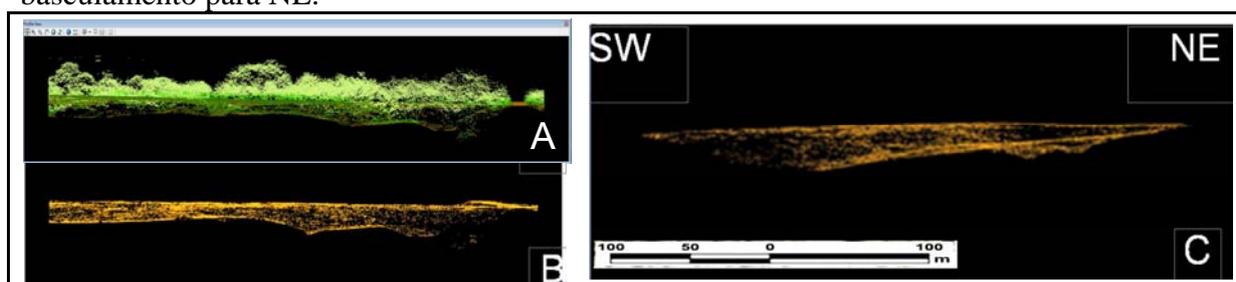


Figura 5 – Identificação das dolinas da Área II, em ambiente GIS. A) Perfil mostrando a nuvem de pontos referentes ao retorno do feixe de laser, incluindo a vegetação. B) Seleção dos pontos classificados como terreno após a extração da vegetação. C) Visualização tridimensional da coalescência das dolinas, com alinhamento SW-NE e suave inclinação para NE (figura rotacionada para norte no eixo maior e para leste no eixo menor).

O modelado digital sombreado obtido por classificação automática mostra-se bastante útil para análises de caráter regional, podendo ser utilizado como modelo digital de elevação, permitindo a identificação de macrofeições cársticas, como as dolinas capturadas pelo vale do Riacho do Livramento, conforme caracterizado na Figura 6.

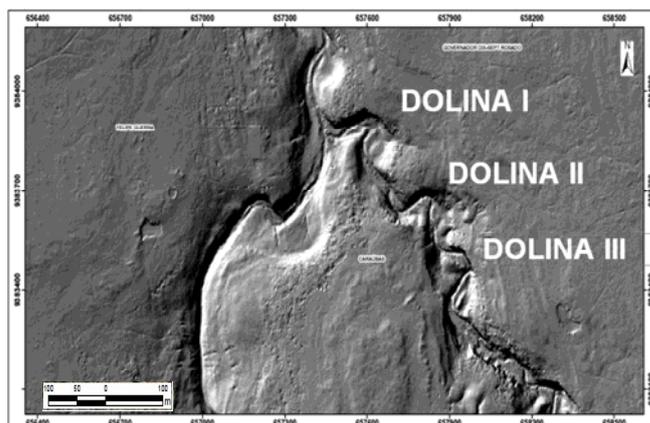


Figura 6 – Identificação de processo de captura de dolinas pela drenagem na Área III, sobre modelo digital de elevação sombreado com iluminação a 315°.

Todavia, a caracterização da geomorfologia cárstica, em escala de detalhe, com acurácia sub-métrica, considerando suas características ruiformes, exige um reprocessamento da nuvem de pontos. Feições lineares, como o padrão ortogonal de fraturas e reativação de falhas, nas direções NE e NW, realçadas pelo processo de dissolução são marcadamente visíveis em fotografias aéreas (Figura 7A) e imagens orbitais de alta resolução. No entanto, tais geofomas cársticas tornam-se “invisíveis”, caso o processamento dos dados brutos não tenha utilizado procedimentos acurados para classificação e interpolação (Figura 7B).

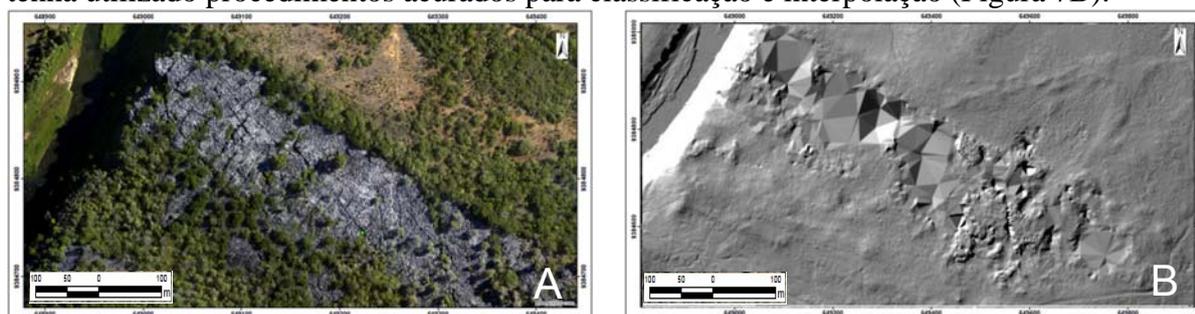


Figura 7 – Feições lineares como o padrão ortogonal, predominantemente nas direções NE e NW, realçadas pela dissolução de fraturas e zonas de reativação de falhas sobre a Formação Jandaíra, na Área IV (ver perfil tridimensional na Figura 2). A) Fotografia aérea digital. B) Modelo sombreado a 315°, obtido por processamento automático preliminar da nuvem de pontos, com baixa acurácia.

4. Conclusões

Este projeto tem como objetivo a caracterização da geomorfologia cárstica da Formação Jandaíra tendo como suporte modelos digitais de elevação, em escala submétrica, gerados a partir de dados obtidos com tecnologia laser aerotransportada e sua integração com fotografias aéreas digitais.

O processamento automático preliminar da nuvem de pontos mostrou-se adequado para visualização regional do relevo. Para análise da geomorfologia cárstica, em escala de detalhe, os modelados resultantes mostram distorções das geofomas cársticas, impedindo a caracterização imediata do relevo ruiforme típico das formações suscetíveis aos processos de dissolução cárstica, com acurácia adequada. Essas distorções provavelmente estão associadas à classificação incipiente dos dados, que comprometeu a qualidade inicial da interpolação da nuvem de pontos.

Procurou-se demonstrar alguns resultados preliminares para a Formação Jandaíra e as dificuldades encontradas. As pesquisas bibliográficas demonstram que a análise quantitativa de terreno ou geomorfometria é a ferramenta mais apropriada para quantificação do relevo e caracterização da geomorfologia cárstica em escala de detalhe. Para o cumprimento do

objetivo desta pesquisa serão ainda necessárias algumas etapas: seleção e adequação de softwares para reprocessamento da nuvem de pontos; reclassificação dos dados separando pontos de vegetação e rocha, em camadas diferentes; reinterpolação dos pontos resultantes da nuvem reclassificada, utilizando parâmetros geomorfológicos; geração de modelos digitais de terreno, para detalhamento do relevo cárstico com acurácia submétrica e mosaicagem dos dados reprocessados em ambiente GIS.

Agradecimentos

Nossos agradecimentos à PETROBRAS pela autorização para divulgação desse trabalho; à UFRN e ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica; à Delft University of Technology; ao biólogo MsC. Diego Bento do ICMBio/CECAV-RN pela fotografia da “Dolina III”; aos colegas Nilton Lima da Silva pelo tratamento dos dados GIS e Solange Cunha Pereira pela edição das figuras e ao Prof.Dr. Carlos Henrique Grohmann pela revisão crítica do texto.

Referências Bibliográficas

- Cruz, J.; Bento, D.M.; Bezerra, F.H.R.; Freitas, J.I.; Campos, U.P.; Santos, D.J; Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 1, n. 1, 2010.
- De Waele, J. D; Plan, L.; Audra, P. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. **Geomorphology**, v.106, p. 1–8, 2009.
- Fenelon,1972. **Phénomènes Karstiques**. Paris. Mémoire et Documents. CNRS, 1972.
- Glennie, C.L.; Carter,W.E.; Shrestha, R.L.;Dietrich, W.E. Geodetic imaging with airborne LiDAR: the Earth's surface revealed. **Reports on Progress in Physics**. V.76, p.1-24, 2013. doi:10.1088/0034-4885/76/8/086801.
- Grohmann, C.H. Morphometric analysis in Geographic Information Systems: applications of free software GRASS and R. **Computers & Geosciences**. V. 30, n. 9-10, p. 1055–1067, 2004.
- Grohmann, C.H.; Riccomini, C.; Steiner, S.S. Aplicações dos Modelos de Elevação SRTM em Geomorfologia. **Revista Geográfica Acadêmica**, vol.2, n.2, p. 73-83, 2008.
- Grohmann, C.H.; Riccomini, C. Análise digital de terreno e evolução de longo-termo de relevo do centro-leste brasileiro. **Geologia - USP, Série Científica**. v. 12, n. 2, p.129-150, 2012 . Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000200009>. Acesso em: 03set 2014.
- Hug, C.; Krzystek, p.; Fuchs,w. Advanced LiDAR Data processing with LasTools. In: ISPRS Congress, 20, Istanbul, Turkey. **Proceedings** ..., Articles, p. 12-23, 2004.
- Isenburg, M.; Liu, Y.; Shewchuk, J.; Snoeyink, J.; Thirion, T. Generating raster DEM from Mass Points via TIN Streaming. In: GIScience'06. **Proceedings** ..., Articles, p. 186 - 198, 2006.
- Jesus, T.E.S.; Reis Jr., J.A.; de Castro, David L.; Lima Filho, F.P. Imageamento digital de paleocavernas colapsadas com ground penetrating radar. **Geologia - USP. Série Científica**, vol. 12, p. 71–84, 2012.
- Kohler, H. G. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: Uma atualização de Bases e Conceitos**. 2ª edição. Rio de Janeiro. Editora Bertrand Brasil, 1995.
- Lima e Silva, O., Xavier Neto, P. e Campos, S. Utilização de imagem de alta resolução espacial para suporte à gestão ambiental de atividades de perfuração de poço de petróleo em área com ocorrência de cavernas no município de Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 4966-4972. On-line. ISBN: 978-85-17-00056-0. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.13.17.05/doc/p1667.pdf> . Acesso em: 19 abr.2011.

- Lima e Silva, O.; Silva, N. L. da. Utilização de MDE-Lidar Integrado com Fotografias Aéreas para Análise Ambiental Prévia de Locação Exploratória de Petróleo – Várzea do Rio Angicos, Mossoró / RN. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Artigos, p. 4625-4632. On-line. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0997.pdf>>. Acesso em: 24 mai.2013.
- Maia, R. P.; Sousa, M.O.L.; Bezerra, F.H.B.; Xavier Neto, P.; Silva, C.C.N. DA; Moura-Lima, E.N.; Santos, R.D. A importância do controle tectônico para a formação da paisagem cárstica na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, nº 4 p.451-463, 2012.
- Meigs, A. Active tectonics and the LiDAR revolution. **Lithosphere**, v. 5, n. 2, p.226-229, 2014. doi: 10.1130/RF.L004.1. Acesso em: 5 abr.2014.
- Meng, X.; Currit, N.; Zhao, K. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. **Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 833-860, 2010.
- Milani, E.J.; Rangel, H.D.; Bueno, G.V.; Stica, J.M.; Winter, W.R., Caixeta, J.M.; Pessoa Neto, O.C. Mapa das Bacias Sedimentares Brasileiras e suas cartas estratigráficas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.15, n.2, p.572-573 – Poster, 2007.
- Reis Jr., J.A.; de Castro, David L.; Jesus, T.E.S.; Lima Filho, F.P. Characterization of collapsed paleocave systems using GPR attributes. **Journal of Applied Geophysics**, vol. 103, p. 43-56, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.007>. Acesso em: 25 fev.2014.
- Sallun Filho, W.; Karmann, I. Geomorphological map of Serra da Bodoquena Karst, west-central Brazil. **Journal of Maps** v.3, n.1, p.282-295, 2007. Disponível em: <http://www.journalofmaps.com>.
- Siart, C.; Bubenzer, O.; Eitel, B. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology**. V.112, p. 106–121, 2009.
- Silva, C.A.; Liesenberg, V.; Klauberg, C.; Hudak, A.; Liebermann, R.; Rodrigues, L. C. E. Variações de MDTs gerados a partir de dados LiDAR: Estudo comparativo entre diferentes classificadores. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p. 6113-6120. On-line. ISBN : 978-85-17-00066-9. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0486.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2014.
- Strijker, G.; Bertotti, G.; Luthi, S.M. Multi-scale fracture network analysis from an outcrop analogue: A case study from the Cambro-Ordovician clastic succession in Petra, Jordan. **Marine and Petroleum Geology** v. 38, p. 104-116, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.07.003>>.
- Sweeting, M.M. **Karst Landforms**. London. Macmillan, 1972.
- Sweeting, M.M. (Ed.). **Karst Geomorphology**. Benchmark Papers in Geology, vol. 59. Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, Pennsylvania. 1981.
- Valeriano, M. de M. Dados Topográficos. In: Florenzano, T. G. (Org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. 1a. edição. São Paulo. Editora Oficina de Textos, 2008. Capítulo 3, p.72-104.
- Weishampel, J.N.; Hightower, J. N.; Chase, A. F.; Chase, D. Z.; Patrick, R. A. – Detection and morphologic analysis of potential below-canopy cave openings in the karst landscape around the Maya polity of Caracol using airborne LiDAR. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 73, n. 3, p. 187–196, 2011.
- Xavier Neto, P., 2006. **Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém – CE**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica. UFRN. Natal. 177 p.
- Xavier Neto, P., Bezerra, F.H.R., Silva, C.C.N. da; Cruz, J.B. Condicionamento Estrutural do Carste Jandaíra e da espeleogênese associada pela tectônica pós-campaniana na Bacia Potiguar. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 44., Curitiba. **Anais...** 2008. CD-ROM
- Zeng, H.; Loucks, R.G.; Janson, X., Wang, G.; Xia, Y.; Yuan, B.; Xu, L. Three-dimensional geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China. American Association of Petroleum Geologists. **AAPG Bulletin**, v. 95, n.12, p. 2061-2083, 2011. Doi:10.1306/03111110136.