

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DA ESTRUTURA DE IMPACTO DO DOMO DE VARGEÃO, BRASIL

César Kazzuo-Vieira¹, Alvaro Penteadó Crósta², Fernando Gamboa³ e Martin Tygel⁴

Recebido em 10 fevereiro, 2009 / Aceito em 10 agosto, 2009
Received on February 10, 2009 / Accepted on August 10, 2009

ABSTRACT. Vargeão Dome constitutes a rare example of a complex meteoritic impact structure formed in the Cretaceous volcanic lava flows of Serra Geral Formation, in South America. This conspicuous circular depression has its center at 26°49'S and 52°10'W and a diameter of 12.4 km. Impact deformation features found at Vargeão include shatter cones in sandstone and basalt, as well as planar deformational features in quartz. Available geophysical data for this structure comprise airborne magnetics and seismic surveys, which were processed and interpreted in combination with remote sensing data, such as digital elevation model generated by the SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) and Radarsat-1 and TERRA/ASTER satellites images. Magnetic and seismic data analysis allowed: (i) to interpret it as shallow structure, with a strongly deformed zone underneath; (ii) to associate a magnetic high spatially coincident with the central portion of the structure to the occurrence of pseudotachylite impact breccia; (iii) to associate the circular magnetic low located near the rim of the structure to the occurrence of large blocks of the Ácidas Chapecó volcanics unit. Favorable exposure of the shocked rocks, combined with easy access, makes this impact structure potentially important for conducting analogue studies of planetary surfaces, thus helping to understand the evolution of solid bodies such as the Moon, Mars, Venus, among others.

Keywords: impact crater, shock metamorphism, volcanic lava flows, Serra Geral Formation.

RESUMO. O Domo de Vargeão representa um notável e raro exemplo de estrutura de impacto meteorítico formada sobre derrames vulcânicos cretáceos da Formação Serra Geral, na América do Sul. Esta conspícua depressão circular tem seu centro localizado em 26°49'S e 52°10'W, e possui 12,4 km de diâmetro. No interior do Domo ocorrem feições características de deformação por impacto, tais como *shatter cones* em arenitos e basaltos, e feições microscópicas do tipo deformação planar em quartzo. Dados magnéticos e sísmicos de reflexão disponíveis para a região da estrutura foram processados e interpretados em conjunto com dados de sensoriamento remoto, tais como modelos digitais de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e imagens Radarsat-1 e TERRA/ASTER. A análise dos dados magnéticos e sísmicos permitiu: (i) classificar o Domo de Vargeão como uma estrutura de expressão crustal rasa, com indicativos da existência de uma zona de intensa deformação situada abaixo da mesma; (ii) associar o alto magnético coincidente com o núcleo da estrutura à ocorrência de brechas de impacto do tipo pseudotachilíticas; e (iii) associar a zona de baixo magnético, localizada próxima às bordas da estrutura, à ocorrência de blocos da unidade Ácidas Chapecó. O grau de exposição e fácil acesso aos afloramentos rochosos em seu interior tornam esta estrutura um sítio potencial para a realização de estudos de análogos em processos de evolução das superfícies planetárias, que contribuam para o entendimento da evolução de corpos planetários sólidos como a Lua, Marte e Vênus, entre outros.

Palavras-chave: cratera de impacto, metamorfismo de impacto, derrames vulcânicos, Formação Serra Geral.

¹Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6152, Campinas, SP, Brasil. Tel.: (19) 3521-4599; Fax: 3289-6215 – E-mail: kazzuo@petrobras.com.br

²Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6152, Campinas, SP, Brasil. Tel.: (19) 3521-5120; Fax: 3289-6215 – E-mail: alvaro@ige.unicamp.br

³Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), ECOPETROL, Caixa Postal 4185, Bucaramanga (Santander), Colômbia. Tel.: (577) 6847-093; Fax: 6847-444 – E-mail: jose.gamboa@ecopetrol.com.co

⁴Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6065, Campinas, SP, Brasil. Tel.: (19) 3521-5968; Fax: 3289-1466 – E-mail: tygel@unicamp.br

INTRODUÇÃO

A colisão de corpos celestes (asteróides e cometas) é reconhecida como o principal processo de modificação superficial de corpos planetários sólidos no sistema solar (Koeberl, 2001). Esses eventos foram essenciais para a evolução dos planetas interiores e decisivos para a origem, a extinção e, conseqüentemente, a evolução da vida na Terra (Alvarez et al., 1980; Stöffler & Langehorst, 1994).

As pesquisas sobre estruturas de impacto também envolvem aspectos de ordem econômica, uma vez que elas podem servir de condicionantes para a concentração de recursos minerais e de petróleo e gás. Grieve & Masaitis (1994) mencionam que 25% das estruturas de impacto terrestres conhecidas estão associadas a algum tipo de depósito mineral, sendo que 12% estão sendo explotadas, ou o foram em tempos recentes. Donofrio (1998) relaciona a existência, somente na América do Norte, de ocorrências de hidrocarbonetos associadas a 17 estruturas de impacto, das quais 9 são explotadas. Um dos exemplos mais emblemáticos refere-se às acumulações de óleo e gás do Golfo do México, associados à estrutura de impacto de Chicxulub (Donofrio, 1998).

O objetivo deste trabalho é a integração de dados geológicos e geofísicos do Domo de Vargeão, com vistas à caracterização dessa estrutura de impacto em superfície e subsuperfície. O Domo de Vargeão foi inicialmente identificado como uma anomalia estrutural no final da década de 1970, quando Paiva Filho et al. (1978), com base em imagem de radar do projeto RADAMBRASIL, observaram uma notável feição circular formada sobre derrames de lavas da Formação Serra Geral contendo, em sua porção central, arenitos correlacionados à Formação Botucatu. A presença anômala desses arenitos em superfície foi apontada por esses autores como evidência de uma "janela estratigráfica", uma vez que nessa porção da Bacia eles se encontram a aproximadamente 1.000 metros abaixo da superfície.

A caracterização dos aspectos geológicos do Domo de Vargeão reveste-se de importância por se tratar de uma das poucas estruturas de impacto terrestres de grande porte, formada em rochas vulcânicas de composição predominantemente basáltica. Nesse sentido, o Domo de Vargeão representa um análogo importante e de fácil acesso para a condução de estudos sobre processos de evolução planetária de corpos sólidos com rochas de composição similar, como a Lua, Marte, e Vênus, entre outros.

ESTRUTURAS DE IMPACTO NO BRASIL

No Brasil, as crateras comprovadamente formadas por eventos de impacto são em número reduzido, em função da inexistência de pesquisas sistemáticas para sua identificação. Atualmente, há

cinco estruturas cuja origem por impacto é comprovada: Domo de Araguinha-(GO-MT), Serra da Cangalha-(TO); Riachão-(MA), Vargeão-(SC) e Vista Alegre-(PR), conforme mostra a Figura 1a. Uma sexta estrutura do mesmo tipo encontra-se em fase de caracterização, a de Cerro do Jarau (RS) (Crósta et al., 2010). Das cinco crateras cuja origem por impacto já foi comprovada, apenas uma conta com estudos geológicos com algum grau de detalhamento. Trata-se do Domo de Araguinha, maior estrutura de impacto da América Latina, para a qual existem trabalhos de cartografia geológica, caracterização das feições de metamorfismo de impacto, litogeoquímica e geoquímica isotópica (Crósta et al., 1981; Engelhardt et al., 1992; Lana et al., 2008). Serra da Cangalha e Riachão contam apenas com estudos geofísicos e de identificação das feições de metamorfismo de impacto (McHone, 1986; Adepelumi et al., 2005a, 2005b).

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

O Domo de Vargeão está inserido no domínio das rochas vulcânicas da bacia do Paraná (Fig. 1b), tendo se formado sobre o extenso platô ígneo correspondente à Formação Serra Geral que domina a região centro-oeste do estado de Santa Catarina. No interior da estrutura de Vargeão ocorrem os litotipos presumivelmente atribuíveis às formações Pirambóia, Botucatu, expostos na forma de blocos estruturalmente deformados na região central da estrutura, além de vulcanitos da Formação Serra Geral.

Paiva Filho et al. (1978) elaboraram o primeiro esboço geológico-estrutural desta estrutura, no qual se destacam: (i) uma sucessão de quatro derrames vulcânicos nas suas bordas norte e leste; (ii) a ocorrência em superfície de corpos de arenitos no seu interior, atribuídos à formação Botucatu e/ou Pirambóia; (iii) o padrão anelar-radial de fraturas com mergulho concêntrico para o interior do Domo; (iv) dois lineamentos regionais paralelos, com orientação NE-SW. Para explicar a origem da estrutura esses autores sugeriram uma possível intrusão alcalina sub-afiorante do Cretáceo, numa analogia com as estruturas ígneas intrusivas de Lages e Anitápolis, também no Estado de Santa Catarina.

Barbour & Corrêa (1981) realizaram levantamentos geológicos de detalhe no Domo de Vargeão, como parte dos trabalhos de prospecção de petróleo e gás na região. Em concordância com Paiva Filho et al. (1978), identificaram os mesmos quatro derrames vulcânicos, apontando a natureza basáltica dos três derrames inferiores e a composição ácida do derrame superior, classificado por eles como quartzo-latito pórfiro (Fig. 2).

Paiva Filho (2000) e Freitas et al. (2002) individualizaram e cartografaram regionalmente fácies vulcânicas na parte oeste do Estado de Santa Catarina. Na região do Domo de Vargeão, a

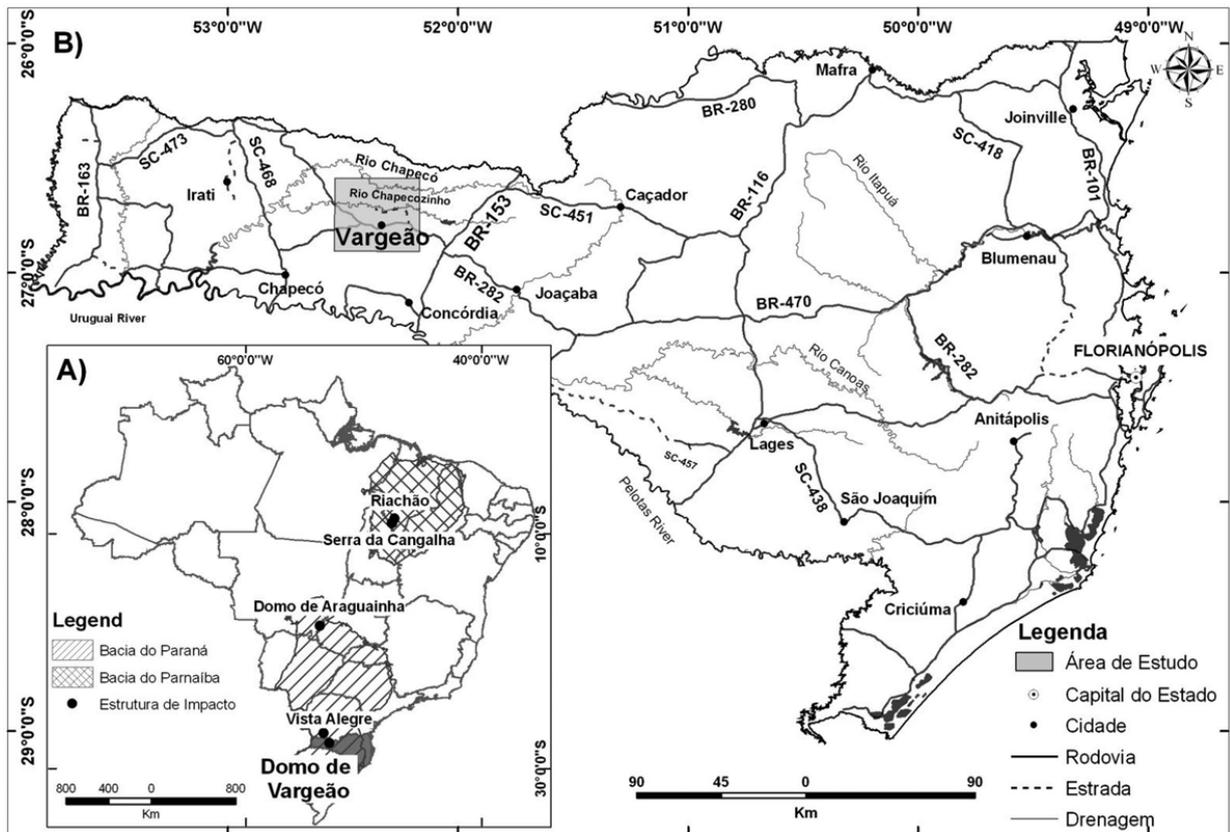


Figura 1 – a) Localização das estruturas de impacto brasileiras. b) Mapa de localização e acesso à cidade de Vargeão (SC), onde se situa a estrutura de impacto homônima.

Formação Serra Geral foi subdividida em três seqüências estratigráficas (Fig. 2):

1. Unidade inferior, com predominância de derrames de basaltos toleíticos da unidade Basaltos Alto Uruguai;
2. Unidade intermediária, caracterizada pelos litotipos de natureza intermediária-ácida das unidades Ácidas Chapecó e Ácidas Palmas;
3. Unidade superior, constituída por basaltos toleíticos da unidade Basaltos Cordilheira Alta.

Paiva Filho (2000) nomeou de forma diferente as unidades cartografadas por Freitas et al. (2002). A unidade Basaltos Alto Uruguai foi por ele denominada de Membro Serra Geral Inferior, a unidade Ácidas Chapecó de Membro Goio En e a unidade Basaltos Cordilheira Alta de Membro Serra Geral Superior. No presente trabalho o termo Serra Geral foi mantido para toda a seção vulcânica e sedimentos interderrames associados. No entanto, adotou-se a nomenclatura proposta por Freitas et al. (2002) para a subdivisão deste pacote vulcânico.

A unidade Basaltos Alto Uruguai representa a base da coluna vulcânica da Formação Serra Geral (Fig. 2). Na área próxima ao Domo de Vargeão esta unidade encontra-se sotoposta à unidade Ácidas Chapecó (Paiva Filho, 2000; Freitas et al., 2002). A principal assinatura geoquímica dos Basaltos Alto Uruguai é representada por teores de TiO_2 inferiores a 1,5%, o que permite enquadrá-los no grande grupo dos basaltos de baixo titânio (LTIB) da Província Vulcânica da Bacia do Paraná (Bellieni et al., 1984; Mantovani et al., 1985; Freitas et al., 2002).

Todas essas unidades litoestratigráficas ocorrem na região do Domo de Vargeão, exibindo a distribuição espacial mostrada na Figura 2. Na parte nordeste da área externa à estrutura, ao longo de um platô com altitude média de 1.250m, ocorrem dois derrames de riolitos afíricos da unidade Ácidas Palmas (Fig. 2). Já a unidade Ácidas Chapecó, constituída por quartzo-latitos, dacitos e riolitos porfíricos a fortemente porfíricos, mostra ampla continuidade lateral na área de estudo. Na parte nordeste da área, essa unidade sobrepõe-se localmente às Ácidas Palmas, recobrindo os Basaltos Alto Uruguai no restante da área (Fig. 2).

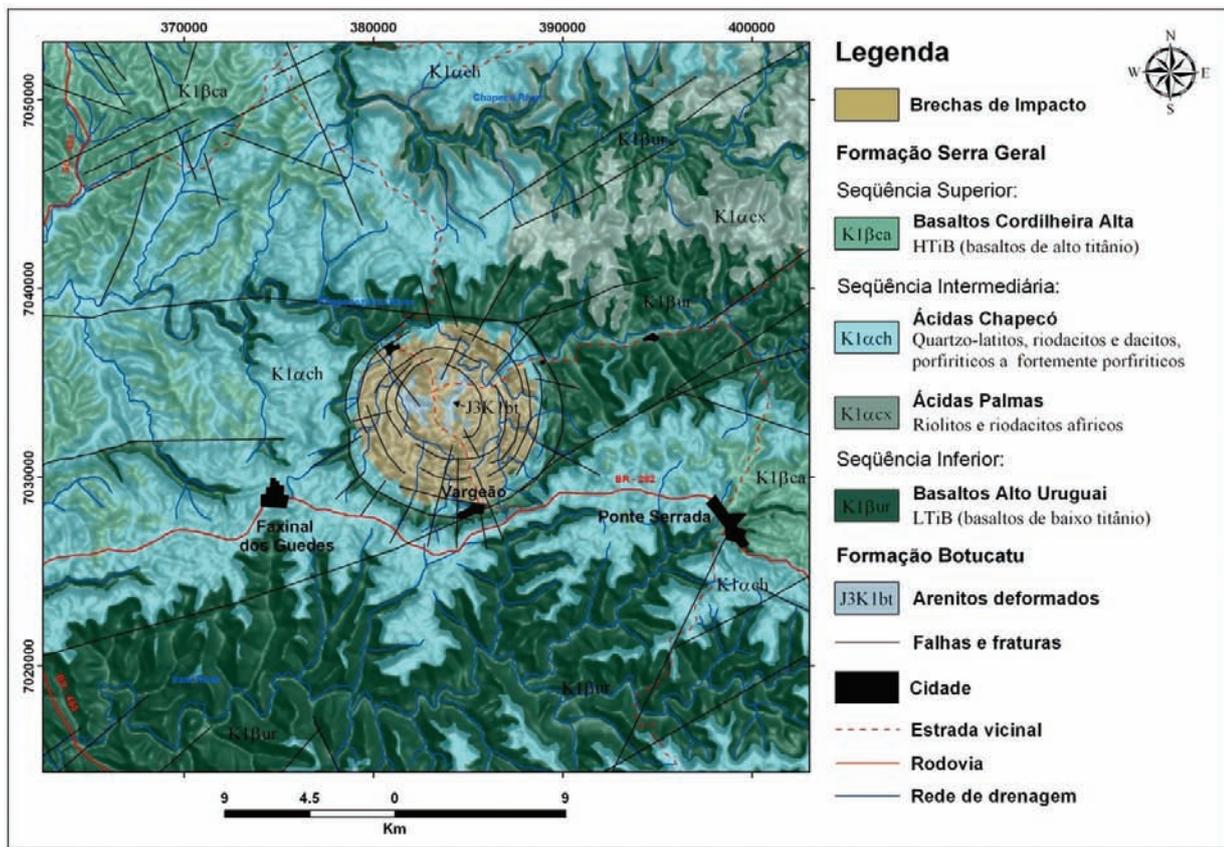


Figura 2 – Mapa geológico regional da área do Domo de Vargeão integrado com o modelo digital de elevação obtido a partir dos dados SRTM. O centro da estrutura contém arenitos das formações Pirambóia ou Botucatu, que estão envolvidos por brechas de impacto, delimitadas por um colar de quartzitos da unidade Ácidas Chapecó. Fonte: Paiva Filho (2000) e Freitas et al. (2002).

Sobrepostos às Ácidas Chapecó encontram-se os Basaltos Cordilheira Alta, principalmente nas porções leste, oeste e NW da região (Fig. 2). A assinatura geoquímica dessa unidade mostra teores de TiO_2 acima de 3,0%, o que permite enquadrá-la no grupo dos basaltos de alto titânio (HTiB) da Província Vulcânica da Bacia do Paraná (Bellieni et al., 1984; Mantovani et al., 1985; Freitas et al., 2002).

DADOS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA DO DOMO DE VARGEÃO

Os dados de sensoriamento remoto utilizados neste estudo incluíram imagens adquiridas pelos satélites e sensores TERRA/ASTER, SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e Radarsat-1.

A imagem TERRA/ASTER (identificação AST:L1A.003:20169-96854) adquirida em 03/09/2003 possui azimute de iluminação solar de $41,40^\circ$ e elevação de $46,89^\circ$.

A imagem Radarsat-1 foi adquirida em 1998 em modo Standard-7 (12,5 m de resolução espacial), com órbita ascendente e visada lateral para a esquerda.

O modelo digital de elevação do SRTM foi elaborado a partir dos dados disponibilizando pela NASA (Fig. 3). A aquisição desses dados foi realizada pelo ônibus espacial Endeavour de 11 a 22 de fevereiro de 2000. Os modelos digitais de elevação disponibilizados possuem resolução espacial de 3 arcsec (aproximadamente 90 m).

Os dados aeromagnetométricos fazem parte do Projeto Rio Iguaçu, cujo levantamento foi contratado pelo consórcio Paulipetro (CESP/IPT) e executado pela Enca (Fig. 3). O projeto foi realizado no período de 12/1980 a 03/1981, e abrangeu a parte oeste dos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, perfazendo uma área de 66.486 km^2 e 39.600 km de perfis.

As linhas de vô foram orientadas segundo a direção N-S e as de controle na direção E-W, com espaçamento de 2 e 20 km, respectivamente. O intervalo de amostragem utilizado foi de 100 m ao longo da linha de vô, a uma altura constante de vô de 500 m. Os aeromagnetômetros de prótons, modelos G-801/3 (aeronave Bandeirante) e G-803 (aeronave Islander) da GEOMETRICS, foram montados na ponta das caudas das aeronaves.

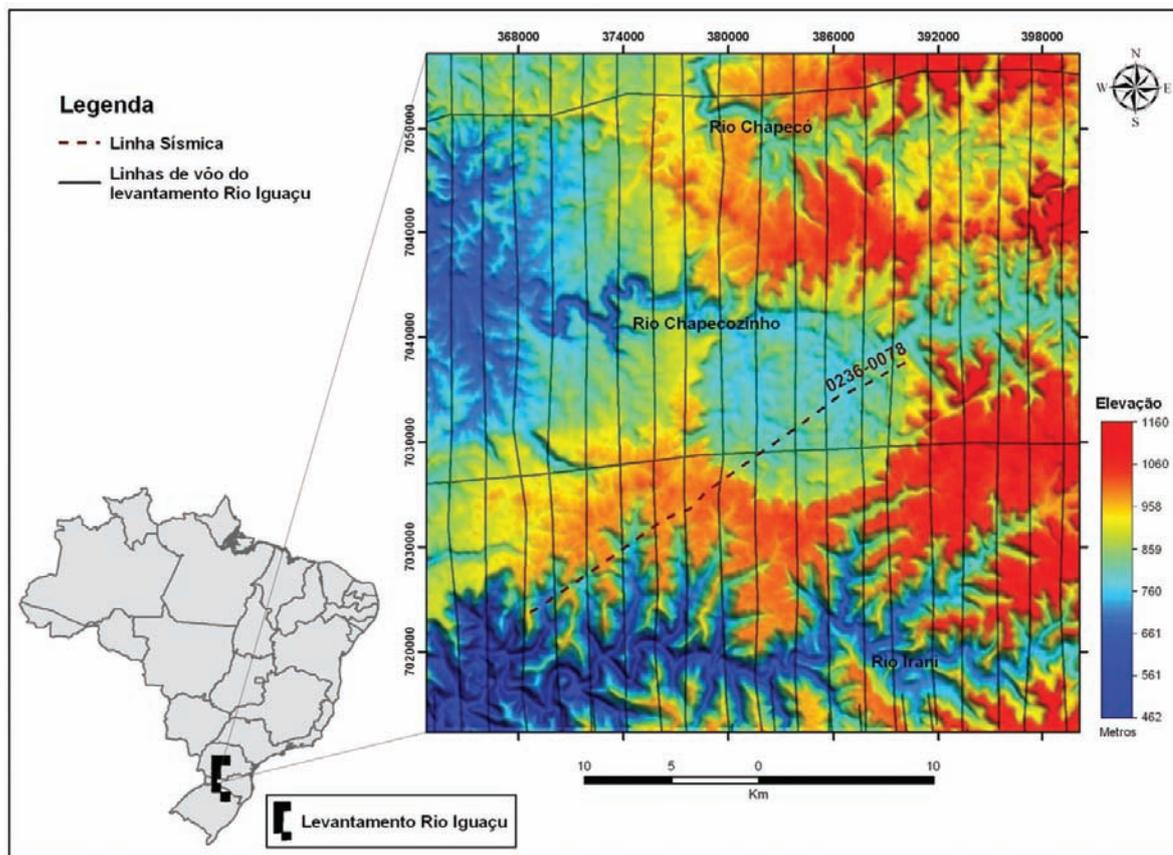


Figura 3 – Localização das linhas de aquisição dos dados aerogeofísicos e da linha sísmica 0236-0078 sobre o modelo digital de elevação SRTM. O padrão geomorfológico regional é caracterizado pelo predomínio de amplos platôs e morros residuais formados sobre os vulcanitos da Fm. Serra Geral, em meio aos quais o Domo de Vargeão se configura como uma estrutura anômala. A conformação topográfica regional e local deve-se principalmente à atividade erosiva causada pela evolução das bacias hidrográficas dos rios Chapecó, Chapecozinho e Irani. Na parte nordeste da área ocorrem dois lineamentos NE-SW.

Os dados sísmicos de reflexão na área de Vargeão referem-se à linha sísmica 00236-0078, cedida pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) para uso neste estudo. O levantamento dessa linha sísmica foi contratado pela PETROBRAS e a aquisição dos dados realizada pela empresa LASA-SDU em 10/1992 (Fig. 3).

PROCESSAMENTO E REALCE DOS DADOS

Os recursos e aplicativos de *software* utilizados para o processamento digital das imagens de sensoriamento remoto orbital e dos dados aerogeofísicos, digitalização de mapas e cartas topográficas e integração de dados integram o Laboratório de Processamento de Informações Georreferenciadas (LAPIG) do Instituto de Geociências da Unicamp. O processamento dos dados sísmicos foi realizado com o apoio do Laboratório de Geofísica Computacional (LGC) no Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Unicamp.

Imagens de sensores remotos orbitais

O processamento das imagens TERRA/ASTER envolveu a retificação geométrica imagem-para-mapa, a partir dos dados da folha topográfica Ponte Serrada. A partir dos dados corrigidos foram elaboradas composições ternárias RGB (*red*, *green* e *blue*) de distintos conjuntos de bandas espectrais do ASTER, de forma a alcançar o melhor realce de contraste visual para o mapeamento de estruturas e unidades litológicas do Domo de Vargeão.

O processamento dos dados do projeto Radarsat-1 envolveu a aplicação de filtro *General Median Filter* 3×3 , presente no aplicativo de *software* ER Mapper™, para redução do ruído tipo *speckle* e o realce de contraste linear, sendo a imagem utilizada para interpretação estrutural por meio de seus atributos de textura.

Com os modelos de elevação SRTM foram elaboradas imagens sombreadas em tons de cinza ou em pseudo-cor, com o objetivo de realçar os padrões texturais da estrutura de Vargeão

e das áreas em seu entorno, bem como permitir e extração de informações sobre as estruturas geológicas presentes (Fig. 3).

Dados aeromagnetométricos

As etapas de pré-processamento dos dados aeromagnetométricos consistiram na verificação da geometria do levantamento e na minimização dos ruídos, utilizando os testes de derivada quarta e P. Em seguida, procedeu-se ao recorte de uma área de aproximadamente 1.573 km² do levantamento original, a qual foi utilizada nas fases posteriores de processamento e interpretação (Fig. 3). Decidiu-se utilizar os dados geofísicos referente a uma área consideravelmente maior (8,4 vezes) do que a que foi utilizada no mapeamento geológico (186 km²) devido à necessidade de caracterizar melhor a assinatura magnética da estrutura de Vargeão em relação ao *background* regional. Com isso foi possível obter um quadro mais completo das estruturas geológicas de caráter regional.

As etapas posteriores de processamento incluíram: (i) subtração do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) do campo magnético total (CMT), produzindo-se o campo magnético anômalo (CMA); (ii) interpolação do CMA pelo método dos quadrados mínimos, produzindo células com 500 × 500m (1/4 do espaçamento das linhas de vôo); (iii) micronivelamento do CMA pela técnica proposta por Minty (1991).

A interpretação do CMA micronivelado e interpolado foi auxiliada pelas informações obtidas por meio da amplitude do sinal analítico (ASA) de ordem 0 para a localização espacial das fontes magnéticas, e da continuação para cima para a análise das fontes magnéticas em profundidade. A análise da eventual correlação das fontes magnéticas com os dados topográficos e com as unidades litoestratigráficas presentes na área foi feita empregando-se a técnica de fusão IHS (intensidade, matiz e saturação) (Harris et al., 1999) dos dados SRTM com os dados da ASA.

Dados de sismica de reflexão

O principal objetivo do processamento sísmico foi gerar informações sobre as rochas e estruturas subjacentes ao Domo de Vargeão, posicionando os eventos refletores em termos de suas profundidades e possibilitando a interpretação do seu arcabouço geológico-estrutural.

Para se obter a seção sísmica empilhada em tempo seguiu-se o fluxo padrão de processamento descrito por Yilmaz (1994). De forma simplificada, essas etapas compreendem: (i) leitura dos dados em SEG-Y; (ii) construção da geometria e carregamento do levantamento, ou seja, o sistema de coordenadas dos traços

baseado na distância entre os pontos de tiro e as estações; (iii) edição/remoção de traços ruidosos; (iv) estática da primeira quebra e aplicação das correções estáticas; (v) atenuação de ruído coerente de tipo *Ground Roll* e recuperação da amplitude do sinal; (vi) a deconvolução para a retirada do sinal proveniente da fonte; (vii) análise de velocidades e correção NMO (*Normal Moveout*); (viii) empilhamento (seção sísmica empilhada); (ix) aplicação de ganho tipo *automatic gain control* (AGC); (x) filtro de frequência 10-20-60-80; (xi) migração; e (xii) saída SEG-Y.

INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICOS

Dados de sensores remotos

Apesar do estágio erosivo relativamente avançado em que aparenta se encontrar o Domo de Vargeão é possível identificar suas principais características morfológicas a partir de imagens de sensoriamento obtidas tanto em nível orbital, como também em fotografias aéreas. Imagens dos sensores orbitais TERRA/ASTER e Radarsat-1, interpretadas em conjunto com modelos digitais de elevação SRTM, permitiram a caracterização das principais feições estruturais da estrutura de Vargeão. Estas feições estão possivelmente associadas aos processos de formação e evolução da cratera de impacto, bem como aos processos erosivos que atuaram desde a fase final de formação até os dias atuais.

Em escala regional os dados SRTM mostram um padrão morfológico caracterizado pelo predomínio de amplos platôs e morros residuais, esculpidos sobre as rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral (Fig. 3). A conformação topográfica regional e local se deve principalmente à atividade erosiva causada pela evolução das bacias hidrográficas dos rios Pelotas, Irani e Chapecozinho (Fig. 3).

Uma visão tridimensional em perspectiva do Domo de Vargeão, elaborada a partir dos dados SRTM, permite constatar que a estrutura de Vargeão é caracterizada por múltiplos conjuntos de lineamentos anelares/radiais concêntricos e cristas topográficas alinhadas, que se destacam sobremaneira dos padrões de textura observados na região (Fig. 4a).

Perfis topográficos elaborados a partir dos dados SRTM, ao longo das direções NWN e ESE, ilustram de forma clara e distinta os limites escarpados com até 200 m de desnível, entre a borda externa da estrutura e seu fundo atual, assim como o núcleo soerguido em sua porção central (Fig. 4b). Nos dois perfis observa-se a presença de cristas concêntricas, relacionadas a falhas normais. Estas falhas ocorrem de forma escalonada a partir das bordas, controlando o sistema de drenagem neste setor e individualizando cristas residuais alinhadas ao longo de todo o limite do Domo.

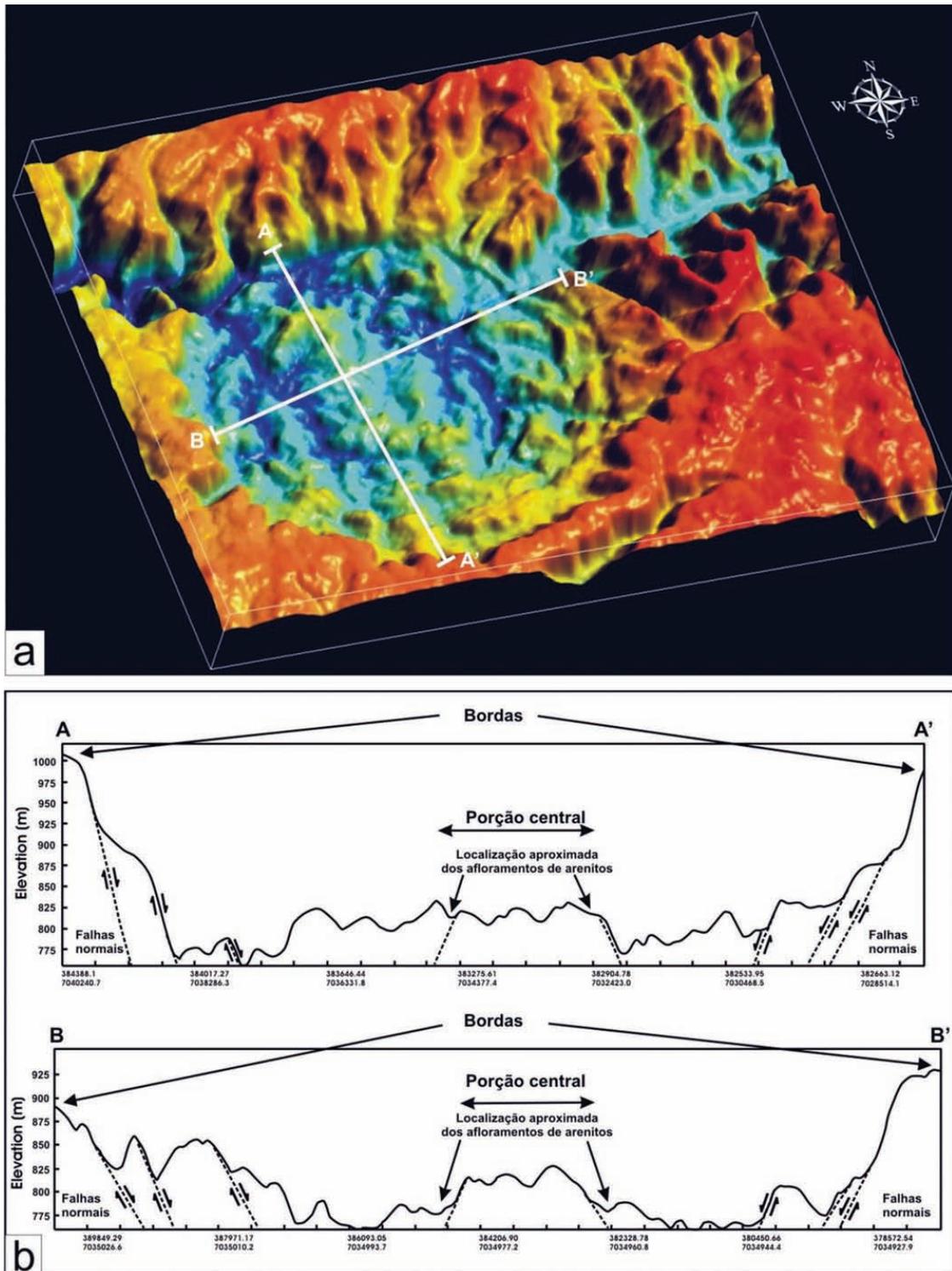


Figura 4 – a) Vista em perspectiva 3D do Domo de Vargeão a partir do modelo digital de elevação SRTM. As cores quentes indicam altitudes elevadas e as cores frias as baixas. Notar a presença de cristas escalonadas concêntricas da borda para o interior da cratera. A morfologia típica de platôs na área externa ao Domo é dada pelos litotipos da unidade Ácidas Chapecó. Notar a presença dos lineamentos NE-SW próximos a borda da estrutura de Vargeão. b) Perfis topográficos de direção NNW/ESE e ENE/SSW, onde se observa o acentuado gradiente topográfico das bordas da cratera, o núcleo central soerguido e as feições anelares concêntricas, decorrentes de falhamentos normais associados à formação da cratera.

Os dados Radarsat-1 foram processados de forma a realçar as estruturas presentes no interior do Domo, revelando de forma singular esses mesmos conjuntos de lineamentos anelares/radiais concêntricos observados nos dados SRTM (Fig. 5a). Estas estruturas são observadas apenas no interior da estrutura de Vargeão, circunscritas aos seus limites topográficos, diferindo do quadro estrutural da área externa ao Domo. Essa área externa é caracterizada por dois lineamentos regionais principais de direção NE-SW e E-W que ocorrem a leste e nordeste e são interrompidos na borda do Domo de Vargeão (Fig. 3). Esses dois lineamentos magnéticos coincidem com os lineamentos regionais observados em imagens de sensoriamento remoto, correlacionáveis à zona de falha Lancinha-Cubatão (Zalán et al., 1991).

Os múltiplos conjuntos de lineamentos radiais/anelares concêntricos do interior da estrutura são aqui interpretados como a expressão geomorfológica da intersecção dos planos de falhas normais, ou de colapso gravitacional, com a superfície do terreno. Essas falhas normais possuem mergulhos altos nas zonas próximas às bordas, os quais diminuem progressivamente no sentido do centro da estrutura (Fig. 5b). A influência dos lineamentos na dinâmica superficial é observada pelo controle que os mesmos exercem sobre o sistema de drenagem de toda a zona interior da estrutura, o qual é caracterizado por um padrão de drenagem centrípeto-anelar.

Análise dos dados aerogeofísicos e sísmicos

A partir do processamento dos dados aeromagnéticos foram obtidos dois tipos de imagens geofísicas: (i) campo magnético anômalo (CMA); (ii) continuações para cima do CMA para as altitudes de 1000, 2000 e 3000 m (CMA-CA) – Figura 6. Segundo Jacobsen (1987) a profundidade real investigada pelo filtro de continuação para cima é igual a metade do valor da altitude investigada, neste caso de 1000, 2000 e 3000 m. Assim, as profundidades investigadas para a expressão magnética do Domo de Vargeão foram 500, 1000 e 1500 m. A partir CMA e do CMA-CA foi calculada a amplitude do sinal analítico de ordem 0, constituindo as imagens ASA-CMA e ASA-CA, respectivamente (Fig. 7).

A análise da imagem do campo magnético (CMA) revela a existência de feições magnéticas regionais com direção aproximada ENE-WSW, sendo que a principal delas corta o Domo de Vargeão e extrapola os limites da área de estudo (Fig. 6). As imagens das continuações para cima (CMA-CA) indicam que há atenuação da expressão magnética dessas estruturas a partir da profundidade de 1000 m (Fig. 6). O sinal analítico obtido a partir do CMA (ASA-CMA) e suas continuações para cima (ASA-

CA) indicam que o lineamento magnético próximo ao Domo de Vargeão é constituído na verdade por duas estruturas magnéticas com direção ENE/WSW, interrompidas pela estrutura de Vargeão (Figs. 3 e 7), correlacionáveis possivelmente à zona de falha Lancinha-Cubatão (Zalán et al., 1991).

Os dados do ASA-CMA também indicam que a estrutura de Vargeão produz uma anomalia magnética circular peculiar e distinta da região circundante, caracterizada por um alto magnético com valor próximo de 0.324 nT/m. Este alto é circunscrito por um anel de baixo magnético de 0.025 to 0.002 nT/m (Fig. 7). As imagens das continuações para cima (ASA-CA) indicam claramente que a assinatura magnética associada à estrutura de Vargeão possui razoável expressão até os 1000 m de profundidade, da mesma forma que os lineamentos magnéticos (Fig. 7).

A imagem do ASA-CMA foi integrada com os dados de elevação SRTM utilizando-se o algoritmo IHS (intensidade, matiz e saturação), conforme mostrado na Figura 8. O algoritmo IHS permite a integração de imagens de diferentes naturezas, neste caso representando dados magnéticos e topográficos, em uma única imagem bidimensional ou em perspectiva tridimensional (Crósta, 1992; Harris et al., 1999).

A imagem IHS integrando dados ASA-CMA com os de elevação SRTM ilustra a expressão dos altos e baixos magnéticos em relação à topografia regional (Fig. 8). A partir dessa imagem foram delimitados quatro domínios magnéticos principais: alto (>0.067 nT/m), alto a médio (0.067–0.030 nT/m), médio a baixo (0.030–0.014 nT/m) e baixo (<0.014 nT/m).

Os dados sísmicos 2D da linha 0236-0078 não possuem uma boa qualidade de imageamento das estruturas em subsuperfície, devido à baixa razão sinal/ruído inerente à presença em superfície do espesso empilhamento de derrames basálticos (Fig. 9). Mesmo assim, é possível identificar nesta seção sísmica os refletores correspondentes à base do empilhamento de derrames basálticos e sua interrupção na borda da estrutura de Vargeão, às falhas normais que delimitam a estrutura e também à presença de um volume com forma cônica, situado na porção central da estrutura.

No interior desse cone não é possível identificar a continuidade de refletores. Essa feição é aqui interpretada como correspondente à zona de alto grau de deformação resultante do impacto, onde as superfícies refletoras originais foram mais intensamente perturbadas pela deformação. A essa zona de intensa deformação está associado o evento de ascensão dos arenitos Botucatu/Pirambóia a partir de profundidades de cerca de 1000 m abaixo da superfície atual. Esse mecanismo, ligados aos processos de criação do núcleo central em crateras com-

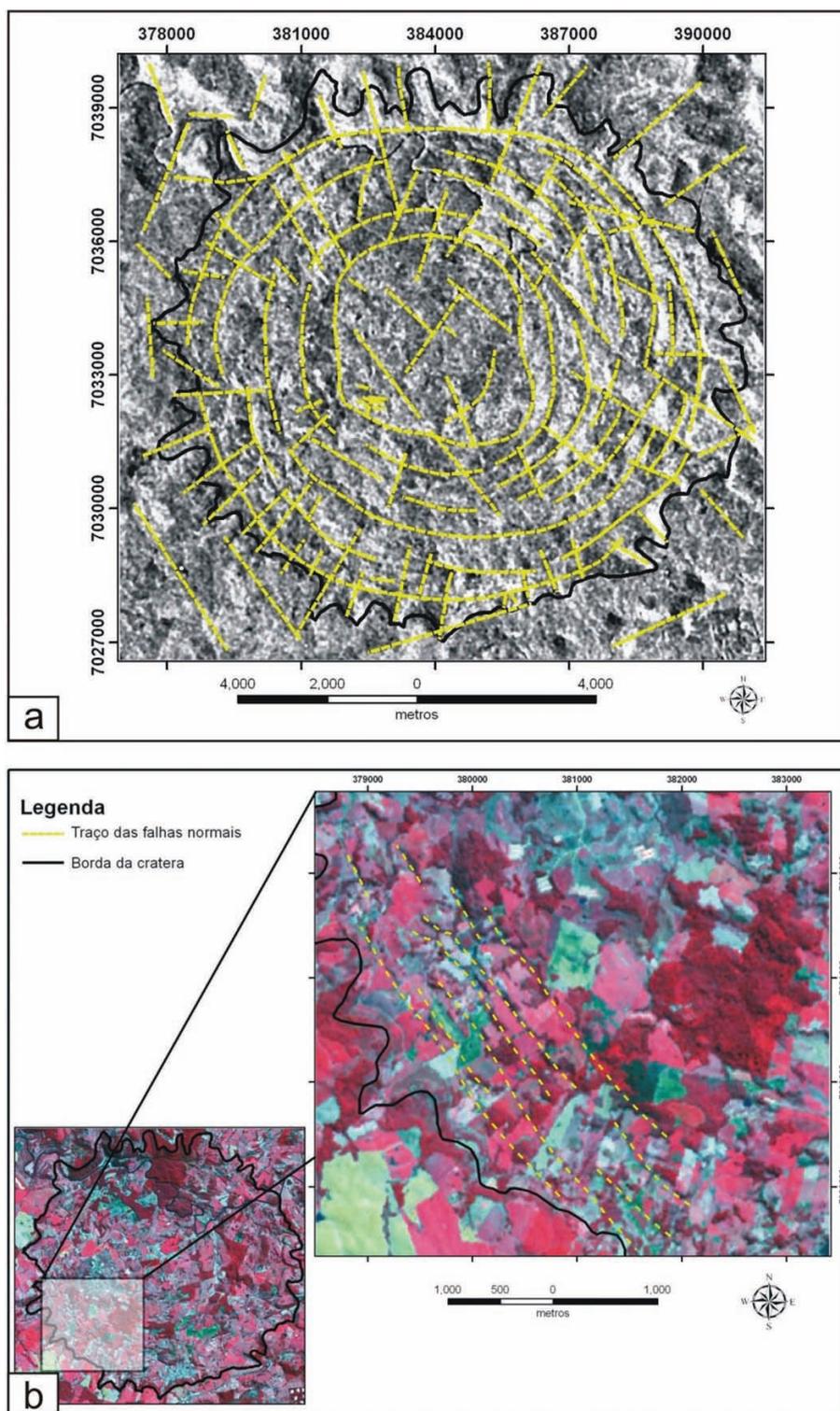


Figura 5 – a) Imagem Radarsart-1 da estrutura de Vargeão. O padrão morfológico interno de Vargeão é caracterizado por múltiplos conjuntos de lineamentos concêntricos concatenados (em amarelo) na região entre o núcleo e suas bordas. Esses lineamentos são interpretados como a expressão geomorfológica das superfícies de falhas normais ou de colapso gravitacional. A borda da estrutura está representada pela linha preta. b) Composição colorida nas bandas 3, 2 e 1 do sensor TERRA/ASTER em RGB, indicando as falhas normais escalonadas com mergulhos altos nas zonas próximas às bordas.

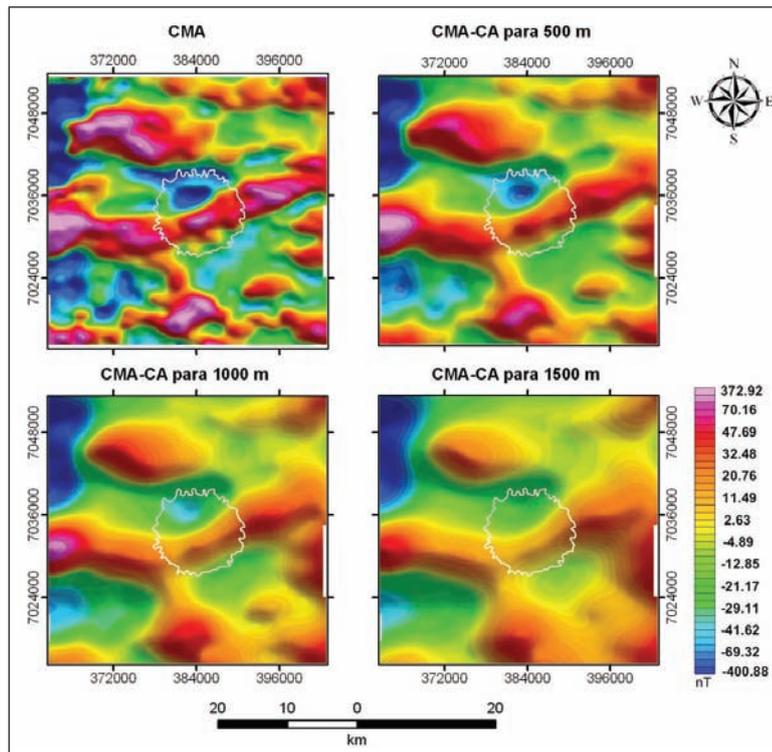


Figura 6 – Imagem do campo magnético anômalo (CMA) e das continuações para cima (CMA-CA) para as profundidades de 500, 1000 e 1500 m. Notar a presença de feições magnéticas com direção aproximada NE-SW possivelmente correlacionáveis com os lineamentos de mesma direção na borda nordeste do Domo de Vargeão (Figs. 3 e 4a).

plexas de impacto (French, 1998), explicaria a posição estruturalmente anômala desses arenitos em suas áreas atuais de ocorrência em superfície no interior do Domo de Vargeão.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os múltiplos conjuntos de lineamentos radiais/anelares concêntricos identificados nos dados de sensoriamento remoto são aqui interpretados como a expressão geomorfológica das superfícies de falhas normais, ou de colapso gravitacional, relacionadas aos estágios finais de formação da cratera de impacto de Vargeão. A associação do complexo sistema de lineamentos às falhas normais constitui o principal arcabouço estrutural do Domo. Além disso, permite inferir que os conjuntos de cristas topográficas alinhadas, claramente visíveis nos dados SRTM e ASTER, sejam os remanescentes erosivos dos blocos das unidades Basaltos Alto Uruguai e Ácidas Chapecó que sofreram colapso em direção ao interior da estrutura.

Assim, os topos das cristas topográficas alinhadas representam a evidência geomorfológica da ocorrência dos litotipos da unidade Ácidas Chapecó no interior da estrutura de Vargeão.

Os dois lineamentos magnéticos, com direção NE e ENE,

são interpretados como a assinatura magnética de estruturas pré-existent em relação à estrutura de impacto, por serem claramente interrompidos por esta. Ainda segundo a interpretação aqui adotada, eles estariam relacionados à zona de falha Lancinha-Cubatão, proposta por Zalán et al. (1991). Nesse sentido, a sugestão de Paiva Filho et al. (1978) e Barbour & Corrêa (1981), de que essas estruturas poderiam ser relacionadas à formação da estrutura de Vargeão, não é suportada pela análise dos dados magnéticos aqui apresentada.

A perda de resolução desses lineamentos magnéticos a partir de 1000 m de profundidade, observada nos dados ASA-CA, é uma indicação que seu sinal magnético corresponde aproximadamente à espessura total do empilhamento de derrames de basaltos. Embora possam ter continuidade ao longo do restante da coluna sedimentar da bacia do Paraná abaixo dos basaltos, as estruturas indicadas pelos lineamentos magnéticos não foram preenchidas por rochas suficientemente magnéticas, como por exemplo, diques máficos.

O resultado da integração dos dados magnéticos e SRTM a partir da técnica IHS, quando analisado em conjunto com o mapa geológico regional (Figs. 2 e 8), possibilita a correlação das unidades geológicas com a assinatura magnética dos lito-

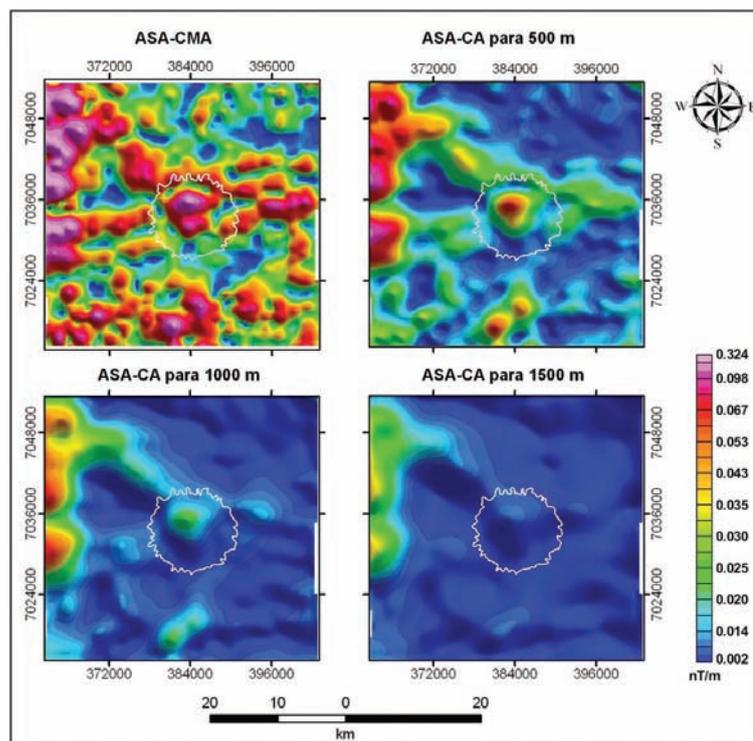


Figura 7 – Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem 0 para o CMA (ASA-CMA) e suas continuações para cima (ASA-CA). A imagem ASA-CMA mostra que os dois lineamentos magnéticos de direção NE-SW são interrompidos próximo à borda da estrutura de Vargeão, tanto na porção ENE como na WSW. Os dados do ASA-CA para as profundidades de 500, 1000 e 1500 m indicam que as assinaturas magnéticas, tanto dos lineamentos como da estrutura de Vargeão, possuem expressão até 1000 m. A linha em branco representa o limite da estrutura de Vargeão.

tipos da Formação Serra Geral na região do Domo de Vargeão. Desse modo, os quatro domínios magnéticos identificados são associados com a unidade Basaltos Alto Uruguai, que exibe assinatura magnética alta a média (0,067–0,030 nT/m); com a unidade Ácidas Palmas, exibindo assinaturas média a baixa (0,030–0,014 nT/m); Ácidas Chapecó com assinatura baixa (<0,014 nT/m); e com os Basaltos Cordilheira Alta com assinatura alta (>0,067 nT/m).

Nos domínios da estrutura de Vargeão os dados magnéticos indicam que o alto magnético ($\sim 0,324$ nT/m) e o baixo magnético com forma anelar (0,025 a 0,002 nT/m) correlacionam-se, respectivamente, à unidade de brechas de impacto e à unidade Ácidas Chapecó, esta última basculada em direção ao interior da estrutura. A parte central da estrutura de Vargeão, na qual ocorre a unidade de brechas de impacto, é aqui interpretada como o remanescente erosivo do núcleo soerguido (*central uplift*) da estrutura.

Os dados sísmicos em tempo indicam que os conjuntos de lineamentos escalonados que ocorrem nas bordas de Vargeão correspondem a falhas normais de colapso, formadas na etapa de

colapso e modificação das crateras de impacto (French, 1998). Além disso, a análise desses dados aponta a existência, abaixo da porção central da estrutura, de uma zona de alta deformação com forma cônica, no interior da qual a continuidade de refletores é quase que totalmente obliterada por perturbações associadas a essa deformação.

CONCLUSÕES

A contribuição principal da análise integrada dos dados geofísicos e de sensoriamento remoto do Domo de Vargeão é a caracterização dos principais aspectos morfológicos desta estrutura de impacto, bem como das assinaturas magnéticas dos principais litotipos que nela ocorrem e da sua assinatura sísmica em sub-superfície.

O Domo de Vargeão caracteriza-se de forma inequívoca como uma estrutura com expressão crustal rasa. Seus lineamentos anulares e as cristas topográficas alinhadas, ao longo de toda a sua borda e também em seu interior, representam múltiplos conjuntos

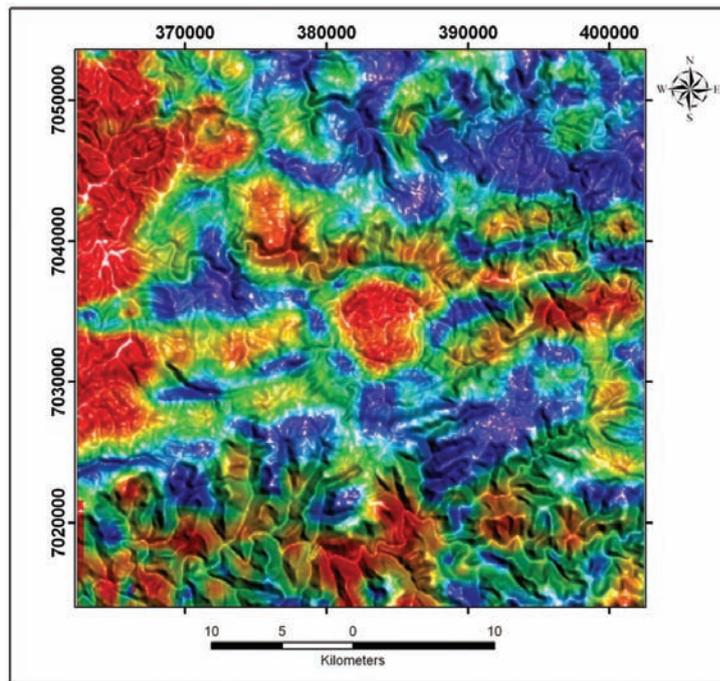


Figura 8 – Imagem ASA-CMA integrada com os dados de elevação SRTM. Há uma correlação evidente entre os diferentes domínios magnéticos e as unidades geológicas (Fig. 2).

de falhas normais concatenadas. Essas falhas foram causadas por dois processos atuando conjuntamente. O primeiro deles envolveu o colapso das bordas da cratera original, com o conseqüente solapamento dos blocos da unidade Ácidas Chapecó para o interior da estrutura e ampliação do diâmetro da cratera, enquanto o segundo abrangeu o processo de soerguimento e exposição em superfície das camadas sedimentares subjacentes (formações Botucatu e Pirambóia) na parte central da estrutura, com a conseqüente implantação do núcleo central soerguido.

A variação do gradiente magnético regional, correlacionado com os limites espaciais das principais unidades geológicas presentes na região do Domo de Vargeão, permitiu associar a cada unidade uma assinatura ou um gradiente magnético característico. Assim, pode-se caracterizar e individualizar as assinaturas da unidade Ácidas Chapecó e das brechas de impacto presentes no interior da estrutura.

Os resultados da análise integrada de dados geológicos, geofísicos e sensoriamento remoto aqui apresentados para o Domo de Vargeão contribuem significativamente para a compreensão de sua origem e evolução, da sua relação com as rochas encaixantes da Formação Serra Geral e com as rochas sedimentares das formações Botucatu/Pirambóia que ocorrem de forma estratigraficamente anômala em sua porção central, assim como com os principais elementos estruturais regionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela cessão dos dados geofísicos e à Radarsat Internacional pela cessão dos dados Radarsat. Este projeto teve suporte financeiro da Barringer Foundation (EUA), do Fundo de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAPEX) da Universidade Estadual de Campinas (Proc. 475/2003), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Proc. 01/01068-0 e 04/03295-2), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Proc. 305203/2003-7 e 303065/2004-4), da Landmark Graphics Corporation – Strategic University Alliance (no. 2002-COM-014331) e do consórcio Wave Inversion Technology (WIT).

REFERÊNCIAS

- ADEPELUMI AA, FONTES SL, SCHNEGG PA & FLEXOR JM. 2005a. An integrated magnetotelluric and aeromagnetic investigation of the Serra da Cangalha impact crater, Brazil. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150: 159–181.
- ADEPELUMI AA, FLEXOR JM & FONTES SL. 2005b. An appraisal of the Serra da Cangalha impact structure using the Euler deconvolution method. *Meteoritics and Planetary Science*, 40(8): 1149–1157.
- ALVAREZ LW, ALVAREZ W, ASARO F & MICHEL HV. 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208: 1095–1108.

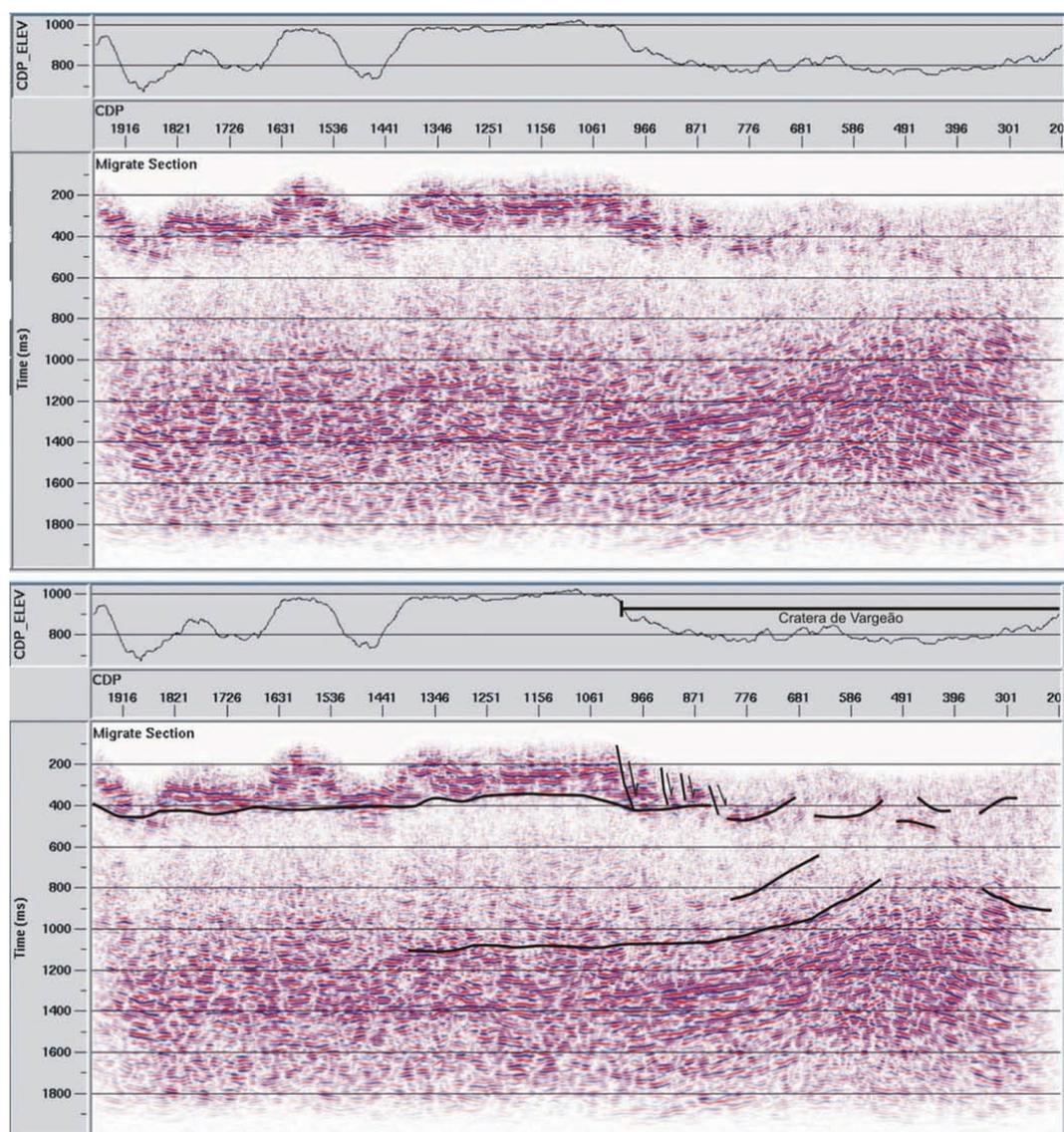


Figura 9 – Seção sísmica 2D em tempo com a respectiva interpretação, onde se observa o limite da base do pacote de rochas vulcânicas, a presença das falhas normais na borda da estrutura e a ocorrência de uma zona de alta deformação com forma cônica coincidente com o centro da estrutura.

BARBOUR EJR & CORRÊA WAG. 1981. Geologia da estrutura de Vargeão, SC. Relatório Técnico, PAULIPETRO, 65 pp.

BELLIENI G, COMIN-CHIRAMONTI P, MARQUES LS, MELFI AJ, NARDY AJR, PICCIRILLO EM & ROISENBERG A. 1984. High- and low-TiO₂ flood basalts from Paraná Plateau (Brazil): Petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Neues Jahr. Miner. Abh.*, 150: 273–306.

CRÓSTA AP. 1992. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Editora da Unicamp, Campinas, 154 pp.

CRÓSTA AP, GASPAR JC & CANDIA MAF. 1981. Feições de metamorfismo de impacto no Domo de Araguinha. *Revista Brasileira de Geo-*

ciências, 11: 139–146.

CRÓSTA AP, LOURENÇO FS & PRIEBE GH. 2010. Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul: a possible new impact structure in Southern Brazil. In: GIBSON RL & REIMOLD WU (Eds.). *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV. The Geological Society of America, Special Paper #465* (no prelo).

DONOFRIO RR. 1998. North American impact structures hold giant field potential. *Oil and Gas Journal*, 96(19): 69–83.

ENGELHARDT W Von, MATTHÄI SK & WALZEBUCK J. 1992. Araguinha impact crater, Brazil. The interior part of the uplift. *Meteoritics*, 27: 442–457.

- FREITAS MA, CAYE BR & MACHADO JLF. 2002. Projeto Oeste de Santa Catarina (PROESC): diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do Oeste do Estado de Santa Catarina. Relatório Técnico: Convênio CPRM/Governo do Estado de Santa Catarina, 100 pp.
- FRENCH BM. 1998. Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. Lunar and Planetary Institute, Houston, 130 pp.
- GRIEVE RAF & MASAITIS VL. 1994. The economic potential of terrestrial impact craters. *International Geology Review*, 36(2): 105–151.
- HARRIS JR, VILJOEN DW & RENCZ AN. 1999. Integration and visualization of geoscience data. In: RENCZ AN (Ed.). *Remote Sensing for the Earth Sciences – Manual of Remote Sensing*. vol. 3, John Wiley and Sons Inc., 307–354.
- JACOBSEN BH. 1987. A Case for upward continuation as a standard filter for potential-field maps. *Geophysics*, 52(8): 1138–1148.
- KOEBERL C. 2001. Craters on the moon from Galileo to Wegener: A short history of the impact hypothesis, and implications for the study of terrestrial impact craters. *Earth, Moon and Planets*, 85-86: 209–224.
- LANA C, SOUZA FILHO CR, MARANGONI YR, YOKOYAMA E, TRINDADE RIF, TOHVER E & REIMOLD WU. 2008. Structural evolution of the 40 km wide Araguinha impact structure, central Brazil. *Meteoritics and Planetary Science*, 43(4): 701–716.
- MANTOVANI MSM, MARQUES LS, SOUZA MA, CIVETTA L, ATALLA L & INOCCENTI F. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of the Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). *J. Petrol.*, 26: 187–209.
- McHONE JF. 1986. Terrestrial impact structures: their detection and verification with two new examples from Brazil. PhD thesis, Universidade de Illinois, Urbana-Champaign, 210 pp.
- MINTY BRS. 1991. Simple micro-leveling for aeromagnetic data. *Expl. Geoph.*, 22: 591–592.
- PAIVA FILHO A. 2000. Estratigrafia e tectônica do nível de riodacitos pórfiros da Formação Serra Geral. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, São Paulo, Tese de Doutorado, 185 p.
- PAIVA FILHO A, ANDRADE CAV & SCHEIBE LF. 1978. Uma janela estratigráfica no oeste de Santa Catarina: O Domo de Vargeão. In: *Cong. Bras. de Geol.*, 30., 1978, Recife. *Anais...* Recife: SBG, 1978. p. 408–412.
- STÖFFLER D & LANGENHORST F. 1994. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. *Meteoritics*, 29: 155–181.
- YILMAZ O. 1994. Seismic data processing. In: NEITZEL EB & DOHERTY SM (Ed.). *Investigations in Geophysics*. vol. 2, Society of Exploration Geophysicists, 546 pp.
- ZALÁN PV, WOLFF S, CONCEIÇÃO JCJ & MARQUES A. 1991. Bacia do Paraná. In: GABAGLIA GPR & MILANI EJ (Ed.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Ed. Gávea, 415 pp.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

César Kazuo-Vieira graduou-se em Geologia pela Universidade Estadual de Campinas (2003). Possui especialização em Geofísica de Exploração de Petróleo pela UFRJ em conjunto com a Universidade PETROBRAS. Mestre em Geociências no Instituto de Geociências da Unicamp. Atua no processamento e interpretação digital de dados de sensoriamento remoto, aerogeofísicos e sísmicos, com ênfase em aplicações geológicas.

Alvaro Penteadó Crósta graduou-se em Geologia pela Universidade de São Paulo (1977) e fez Mestrado e Doutorado (PhD) em Sensoriamento Remoto, respectivamente pelo Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE (1982) e Imperial College, Londres (1990). Realizou pós-doutorado junto ao Desert Research Institute, Universidade de Nevada, Reno (1995). Em 1994 recebeu o prêmio “Zeferino Vaz” da Unicamp. É Professor Titular do Instituto de Geociências da Unicamp. Atua em sensoriamento remoto e processamento digital de imagens, com ênfase em aplicações geológicas.

Fernando Gamboa é formado em Engenharia Mecânica (UIS – Colômbia/1997). PhD em Ciências e Engenharia de Petróleo (Unicamp/2007). Trabalha em processamento sísmico desde 1998, tendo participado de projetos sísmicos 2D e 3D. Atualmente trabalha para a empresa colombiana de petróleo – ECOPETROL.

Martin Tygel é formado em Física (UERJ/1969). Mestre em Matemática (PUC-Rio/1973) e PhD em Matemática (Stanford University/1979). É Professor da Unicamp desde 1984, tendo lecionado na UFRN (Natal/1979-1980), PPPG-UFBA (Salvador/1981-1983) e Instituto de Geofísica da Universidade de Karlsruhe (Alemanha), em 1990. É detentor dos prêmios Schlumberger (EAGE/2002) e Zeferino Vaz (Unicamp/1997 e 2003). É fundador do Laboratório de Geofísica Computacional da Unicamp. O Laboratório é um dos membros do Consórcio Wave Inversion Technology (WIT), com sede em Karlsruhe. Foi consultor da Petrobras em processamento e imageamento sísmicos, Editor Associado da Revista *Geophysics* (SEG) e membro do Comitê Assessor de Geofísica do CNPq. Atualmente é pesquisador visitante no Instituto de Engenharia de Petróleo e Geofísica Aplicada da NTNU, Trondheim, Noruega.