



## Testes com o método de sísmica multicomponente (3C) visando à investigação de alvos rasos na cidade de São Paulo, Brasil.

Oksana Bokhonok\* (IAG-USP) e Renato L. Prado (IAG-USP)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no 15º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil, de 31 Julho a 3 Agosto.

Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

Visando ao estudo do método de sísmica multicomponente (3C), foram adquiridos dados em duas áreas com características geológicas diferentes: Campus da Universidade de São Paulo (USP), situado na zona oeste do Município de São Paulo e a área da estrutura de Colônia situada na região de Parelheiros, na zona periférica do Município de São Paulo, Brasil. Para realizar o processamento dos dados foi utilizado o pacote Seismic Unix (CWP/SU). Foi analisada a polarização das ondas presentes nos sismogramas e removidas as ondas superficiais aplicando filtro de polarização e filtro FK. O conjunto dos dados CDP foi ordenado por conjunto de receptor comum. Foi analisada a presença das ondas convertidas nos sismogramas. É observada uma marcada diferença nas respostas dos subsolos entre os dois sítios. Nos dados adquiridos no Campus da USP foram observadas tanto as ondas PP como as ondas convertidas (PSv). No entanto nos dados obtidos em área de Colônia, não foi possível visualizar as ondas convertidas.

### Introdução

Nos últimos anos, a aquisição de dados multicomponentes na indústria de óleo e gás sofreu muitos avanços, no entanto o processamento e a interpretação ainda apresentam desafios importantes, sendo especificamente questionada a contribuição da onda convertida na interpretação (Bancroft e Guirigay, 2014). Esses aspectos explicam em parte o fato do método ainda não ser muito disseminado na investigação geológica.

Enquanto o estudo e o emprego da sísmica de reflexão multicomponente são recentes na indústria de óleo e gás, são ainda menos empregados visando à exploração rasa nas áreas da hidrogeologia e geotecnia (Gaiser et al., 2001).

Esses aspectos motivaram esta investigação que visa ao estudo do método de sísmica de reflexão multicomponente (3C) na investigação rasa, especialmente em relação à resposta das ondas convertidas (PSv), realizando aquisição, processamento e interpretação de dados obtidos em duas áreas de estudos.

Para realizar a análise da resposta do subsolo foram escolhidos dois locais que apresentam características geológicas e petrofísicas distintas. O primeiro conjunto de dados foi adquirido em área da estrutura de Colônia,

caracterizada por um pacote sedimentar onde predominam argila siltosa rica em matéria orgânica e lama arenosa, e o nível freático está subflorante. O segundo conjunto de dados foi adquirido no campus da Universidade de São Paulo – USP, onde o pacote sedimentar é caracterizado predominantemente por argila siltosa, areia, e areia siltosa com escassa presença de argila siltosa rica em matéria orgânica, e com o nível freático a uma profundidade aproximada de 8 metros. A diferença notável nas propriedades petrofísicas entre as duas áreas de estudo são observadas na resposta sísmica registrada.

### Local de Estudo

A área da estrutura de Colônia situa-se na região de Parelheiros, Município de São Paulo, Brasil (coordenadas geográficas 23°52'27"S e 46°42'36"O).

Na região de Colônia podem ser distinguidas três unidades litoestratigráficas: embasamento cristalino Pré-Cambriano, sedimentos Terciários e depósitos colúviais e aluviais Quaternários (Velázquez et al., 2013; Riccomini et al., 1991). A Figura 1 traz o perfil descritivo do pacote sedimentar, obtido de uma sondagem realizada para exploração de água subterrânea.

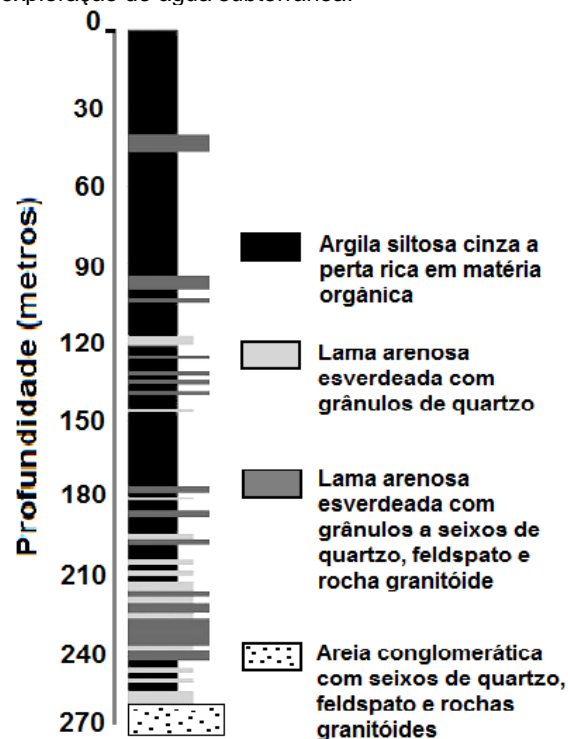
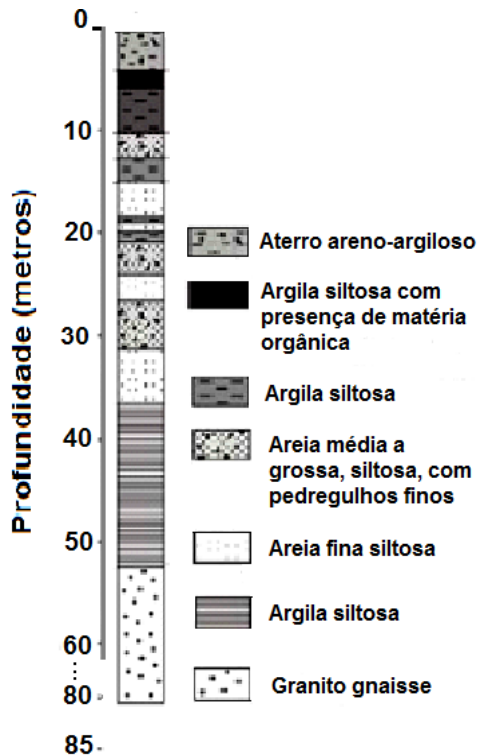


Figura 1 - Perfil descritivo do pacote sedimentar obtido de uma sondagem realizada para exploração de água subterrânea na Região de Colônia. Modificada de Riccomini et al. (2011).

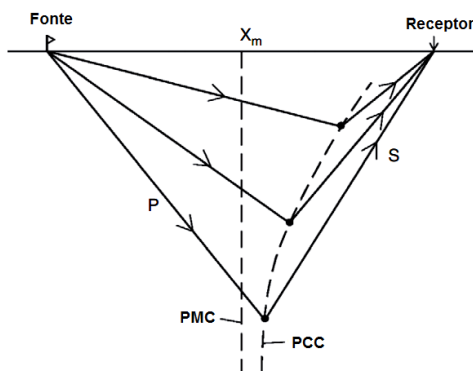


**Figura 2** - Descrição litológica obtida de um poço de investigação situado próximo ao local dos ensaios sísmicos no Campus da USP. Modificada de Porsani et al. (2004).

A segunda área de estudo se situa no Campus da Universidade de São Paulo, zona oeste do Município de São Paulo, Brasil (coordenadas geográficas 23°33'60"S e 46°44'4"O) em terrenos da bacia sedimentar de São Paulo onde ocorrem sedimentos terciários sobre embasamento granito-gnáissico pré-cambriano. A Figura 2 apresenta a descrição litológica obtida de um poço de investigação situado próximo ao local dos ensaios.

### Metodologia

As ondas convertidas do tipo PSv têm sua origem quando uma onda P incidente sobre uma interface, sofre uma conversão parcial de energia, gerando uma onda



**Figura 3** - Variação no ponto de reflexão com a profundidade. Modificada de Hardage et al. (2011).

Sv. A geometria deste tipo de onda é diferente e se produz uma variação no ponto de reflexão com a profundidade em função das velocidades das ondas P e Sv para cada offset dado (Stewart et al., 2002). Neste caso o ponto de reflexão também é chamado como ponto de conversão comum (PCC) (Figura 3).

Para as reflexões rasas e razão V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> grande, as coordenadas do ponto de conversão são próximas às do receptor, o que leva à necessidade de considerar a variação de coordenadas do PCC com a profundidade no caso de aproximação assintótica (Gaiser et al., 2000).

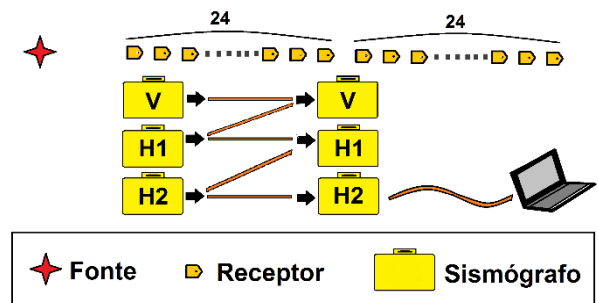
### Aquisição dos dados

Para aquisição das linhas 2D de sísmica de reflexão multicomponente (3C), foram empregados 48 geofones de três componentes de 10Hz (com resposta linear até 250 Hz), 6 sismógrafos Geode da Geometrics de 24 canais e uma marreta de 6 kg como fonte geradora de ondas (Figura 4).

A configuração dos cabos usada (Figura 5), apresenta como vantagem a facilidade para visualizar as três componentes separadas no momento da aquisição.



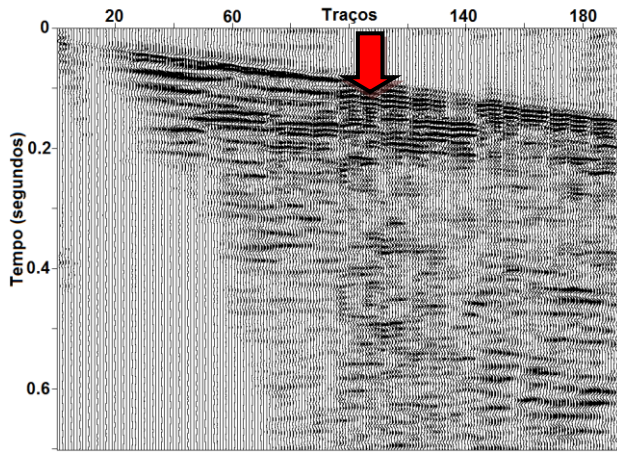
**Figura 4** - Geofone de três componentes de 10 Hz (esquerda), sismógrafo Geode de Geometrics de 24 canais (direita).



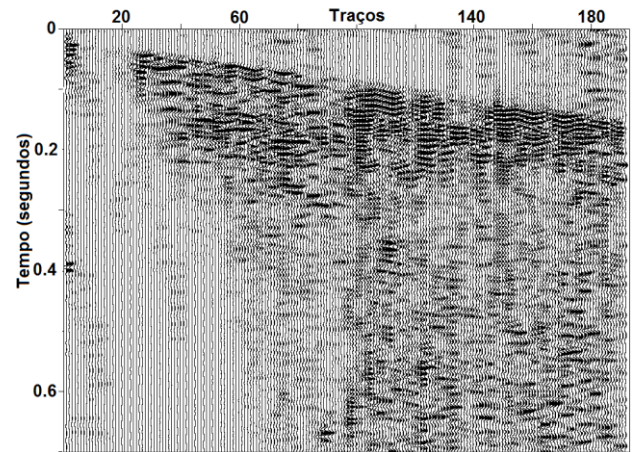
**Figura 5** - Configuração dos cabos usada para aquisição de dados.

Os geofones foram nivelados e orientados conforme a linha formada entre o receptor e a fonte.

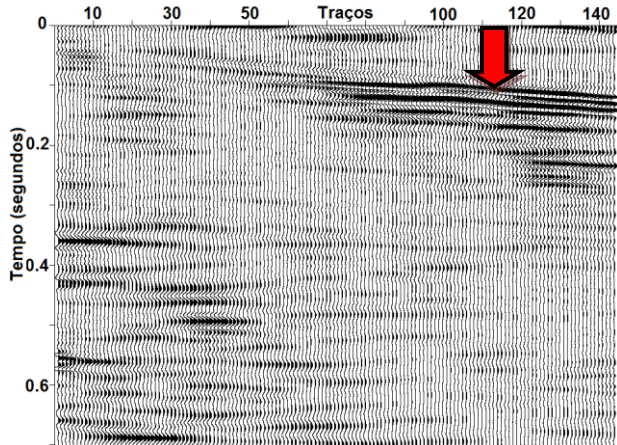
Foram realizadas análises de ruído com espaçamento entre geofones de 1 metro e tiros realizados com offset mínimo de 1 metro, 49 metros e 97 metros no campus da USP e de 1 metro, 49 metros, 97 metros e 145 metros na estrutura de Colônia.



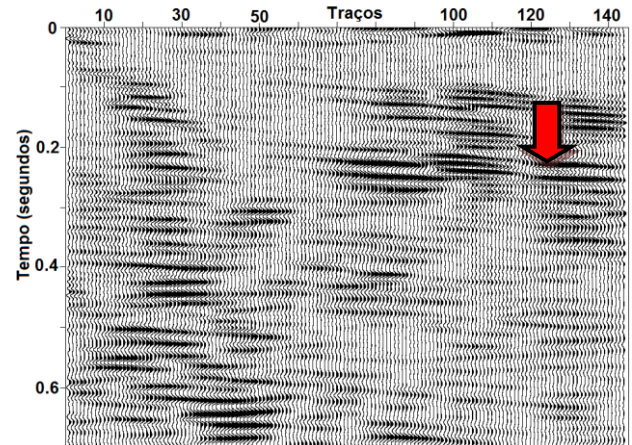
**Figura 6** - Sismograma da análise de ruído, Colônia, componente V. Aplicados filtro PB, Filtro de polarização, filtro FK e Ganho AGC. O evento da onda PP está indicado com seta vermelha.



**Figura 7** - Sismograma da análise de ruído, Colônia, componente H radial. Aplicados filtro PB, Filtro de polarização, filtro FK e Ganho AGC.



**Figura 8** - Sismograma da análise de ruído, USP, componente V. Aplicados filtro PB, Filtro de polarização, filtro FK e Ganho AGC. O evento da onda PP está indicado com seta vermelha.



**Figura 9** - Sismograma da análise de ruído, USP, componente H radial. Aplicados filtro PB, Filtro de polarização, filtro FK e Ganho AGC. O evento da onda PSv está indicado com seta vermelha.

Os parâmetros de aquisição da linha CDP selecionados foram: 2 metros de espaçamento entre geofones, 2 metros de espaçamento entre os tiros, offset mínimo de 24 metros, offset máximo de 164 metros, intervalo de amostragem de 0.5 ms, comprimento de registro de 1 s. Os sismogramas das análises de ruído podem ser observados na Figura 6 e Figura 7 para área de Colônia e na Figura 8 e Figura 9 para área de campus de USP.

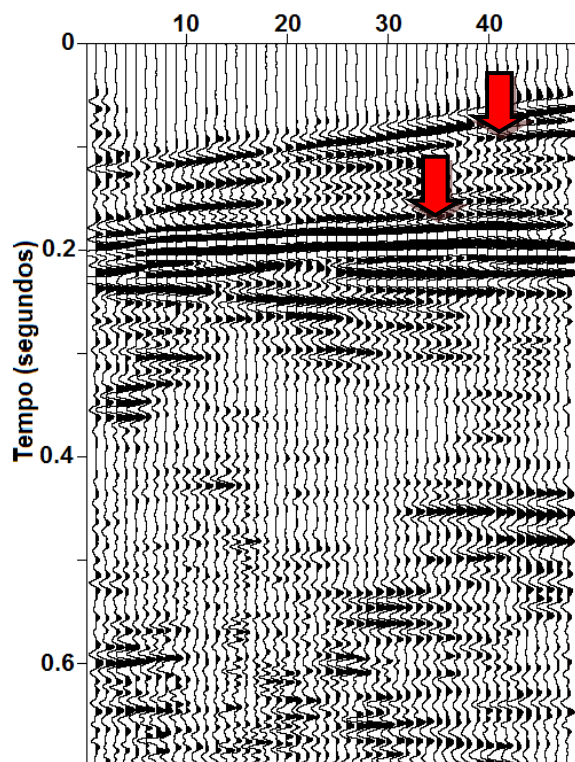
### Processamento dos dados

Para realizar o processamento dos dados foi utilizado o pacote Seismic Unix (CWP/SU) (Stockwell & Cohen, 1998). O processamento é realizado de forma separada para as componentes vertical (V) e horizontal (H). Após a edição da geometria, foi analisada a polarização das ondas presentes no sismograma e removidas as ondas superficiais aplicando filtro de polarização e filtro FK.

Ao realizar as análises de polarização e aplicação de filtro, foram observados resultados positivos no caso dos dados obtidos no campus da USP, ou seja, foram parcialmente removidas as ondas superficiais e a onda PP da componente horizontal, assim como a onda PSv da componente vertical.

Para os dados obtidos na área de Colônia as análises de polarização não resultaram em parâmetros apropriados para realizar a filtragem. Como este filtro está baseado na movimentação elíptica das partículas das ondas Rayleigh e a polarização linear das ondas de corpo, a mudança na movimentação causada por irregularidade de subsolo torna pouco efetivo este processo (Tatham e McCormack, 1991).

Quando as velocidades de campo de ondas descendentes são diferentes das velocidades do campo ascendente, a ideia de ponto médio deixa de ser adequada para o processamento dos dados 3C (Hardage



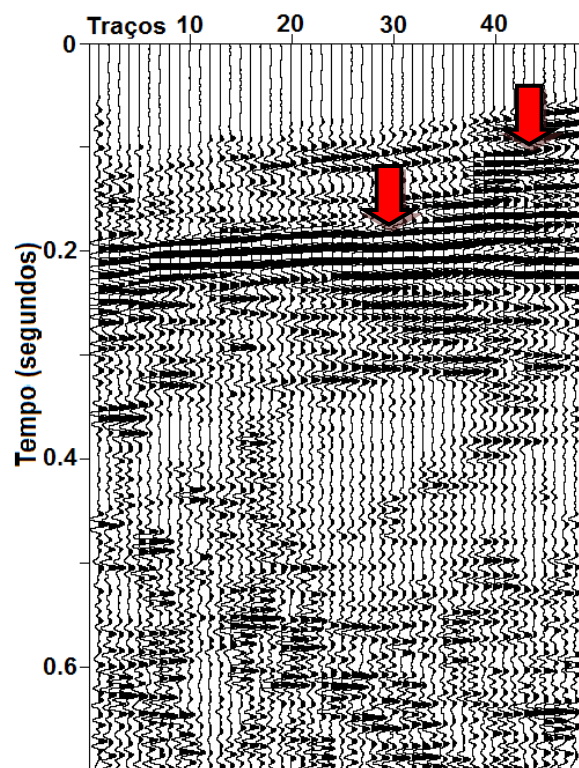
**Figura 10** - Conjunto de receptor comum, Colônia, componente V. Aplicados filtro PB, Filtro de polarização, filtro FK e Ganho AGC. Os eventos da onda PP estão indicados com seta vermelha.

et al., 2011). Tendo em conta isso, um dos passos importantes no processamento de dados multicomponentes (3C) é a estimativa da razão  $V_p/V_s$  já que a partir desta é possível estimar o ponto comum de conversão da onda (Gaiser et al., 2000). Partindo dessa ideia, a partir dos sismogramas (Figuras 6, 7, 8 e 9) é possível observar que o dado adquirido na área de Colônia apresenta maior desafio. Enquanto nos sismogramas obtidos no campus da USP se observa a presença de onda PP e onda convertida PSv nas componentes Vertical (V) e Horizontal radial (H1) (Figuras 8 e 9, respectivamente), a chegada das ondas PSv não é visualizada nos dados obtidos na área de Colônia (Figura 7).

Ordenando os dados obtidos em Colônia por receptor comum, na componente horizontal foi observada a presença de sinal coerente, apresentando velocidades típicas da onda PP (Figura 11). Uma reflexão forte com características similares é observada na componente vertical (Figura 10).

## Resultados

Foram adquiridos e analisados dados de dois locais que apresentam características geológicas e petrofísicas distintas. Nos dados adquiridos no Campus da USP, os eventos das ondas PP e PSv são observadas claramente (Figuras 8 e 9), facilitando o processamento dos dados para obter a imagem de subsolo. Nos dados adquiridos na área de Colônia, são observadas as reflexões da onda



**Figura 11** - Conjunto de receptor comum, Colônia, componente H radial. Aplicados filtro PB, Filtro de polarização, filtro FK e Ganho AGC. Os eventos que apresentam velocidades da onda PP estão indicados com seta vermelha.

PP nas componentes vertical e horizontal (Figuras 6 e 7), no entanto não são observadas as ondas PSv.

## Conclusões

Apesar da presença de dois eventos de onda PP nos sismogramas de Colônia, não foi observada a onda convertida (PSv) nos conjuntos de fonte comum nem nos conjuntos de receptor comum. Neste caso a onda S poderia sofrer atenuação causada por argila siltosa rica em matéria orgânica, constituinte principal do pacote sedimentar da estrutura de Colônia, e o nível freático subafiorante. No Campus da USP foi obtida uma boa resposta, onde argila rica em matéria orgânica representa só uma pequena parte da espessura do pacote sedimentar e o nível freático encontra-se a uma profundidade aproximada de 8 metros.

Por outro lado, a pouca efetividade do filtro de polarização nos dados de Colônia pode indicar a heterogeneidade do subsolo que modifica a polarização das ondas.

Sendo que um dos objetivos da interpretação da sísmica multicomponente é extrair propriedades do meio a partir da comparação dos tempos de chegada das ondas, fase e amplitude (Tatham e McCormack, 1991), uma sequência de processamento deve ser planejada visando destacar a energia da onda convertida e ao mesmo tempo conservar as características das ondas. A

sequência pode incluir uma filtragem 2D combinada para remover as ondas superficiais, deconvolução para remover as reverberações, estudo dos possíveis valores da razão  $V_p/V_s$  e diferentes formas de cálculo de PCC.

### Referencias

**BANCROFT J.,C. , GUIRIGAY T.** 2014. Simplified processing of converted wave data. GeoConvention 2014: FOCUS.

**GAISER J.E., JACKSON A.,R.** 2000. Accuracy and limitations of PS-wave conversion-point computations: How effective is  $\tau_{\text{eff}}$ ? SEG Expanded Abstracts.

**GAISER J., MOLDOVEANU N., MACBETH C., MICHELENA R. E SPITZ S.** 2001. Multicomponent technology: the players, problems, applications, and trends. Summary of the workshop sessions. The Leading Edge, 20(9), 974-977. doi: 10.1190/1.1487318.

**HARDAGE B., A., DEANGELO M., V., MURRAY P.,E., SAVA D.** 2011. "Multicomponent seismic technology" Society of Exploration Geophysicists. ISBN 978-1-56080-282-2.

**PORSANI J.,L., RODRIGUES BORGES W., VAGNER R., E., DIOGO L.,A., HIODO F.,Y., MARRANO A., E BIRELLI C.,A.** 2004. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sitio controlado de geofísica rasa do IAG-USP. Revista Brasileira de Geofísica. 22(3): 245-258.

**RICCOMINI, C., TURCQ, B.J., MARTIN, L., MOREIRA, M.Z.; LORSCHTEITZ, M.L.** 1991. The Colônia Astrobleme, Brazil. Revista do Instituto Geológico, v.12, pp.87-94.

**RICCOMINI C., CROSTA A.P., PRADO R.L., LENDRU M.-P.** 2011. The Colonia structure, São Paulo, Brazil. Meteoritics & Planetary Science 46, Nr 11, 1630–1639, doi: 10.1111/j.1945-5100.2011.01252.x.

**STEWART R.R., GAISER J. E., BROWN J.R. E LAWTON D.C.** 2002. Converted-wave seismic exploration: Methods. Geophysics. vol. 67, no. 5; p. 1348–1363.

**STOCKWELL, J. W.; COHER, J. K.** 1998. The New SU User's Manual. CWP Colorado School Mines. USA, version 2.2.

**TATHAM R. H E. MCCORMACK M.D.** 1991. "Multicomponent seismology in petroleum exploration" Society of Exploration Geophysicists. ISBN 1-56080-051-8.

**VELÁZQUEZ, V.F., RICCOMINI, C., AZEVEDO SOBRINHO, J.M., PLETSCH, M.A.J.S., SALLUN, A.E.M., SALLUN FILHO, W., HACHIRO, J.** 2013. Evidence of shock metamorphism effects in allochthonous breccia deposits from the Colônia Crater, São Paulo, Brazil. International Journal of Geosciences, v. 4(1A), pp. 274-282.

### Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto 2015/01885-1) pelo auxílio pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Mestrado (Processo 133343/2016-2).