



V CONEPETRO
V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

ANÁLISE PALEOMAGNÉTICA DO COMPLEXO DE INJEÇÃO DE AREIA PANOCHÉ: UM ESTUDO NA BACIA DE SAN JOQUIN, CALIFÓRNIA

Caroline Azzolini Pontel¹, Jairo Francisco Savian², Ruy Paulo Philipp³, Gustavo Zvirtes⁴, Matthew Brett⁵, Andrew Hurst⁶

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, azzolinicaroline@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jairosavian@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ruy.philipp@ufrgs.br

⁴ Universidade de Aberdeen, gustavo.zvirtes1@abdn.ac.uk

⁵ Universidade de Aberdeen, matthew.brett@abdn.ac.uk

⁶ Universidade de Aberdeen, ahurst@abdn.ac.uk.

Resumo: Os extruditos, formados pela extrusão de areia fluidizada e pressurizada na superfície e impulsionados por diques subjacentes, representam um papel bastante relevante na exploração de hidrocarbonetos. Eles podem não apenas afetar o volume adicional de um reservatório, ampliando as conectividades laterais e verticais em campos petrolíferos, mas também têm potencial para se tornarem zonas de vazamento de fluidos. Nesse contexto, métodos paleomagnéticos foram empregados em amostras do Complexo de Injeção Gigante de Panoche (PGIC), situado na Bacia de San Joaquin, Califórnia, com o intuito de aprimorar a compreensão de sua geometria e magnetismo. Os resultados revelam complexidades nas características magnéticas das extrusões, sublinhando a necessidade de uma abordagem integrada para um mapeamento detalhado e interpretação geológica adequada. As análises evidenciam uma variedade de padrões direcionais, com predominância de foliações magnéticas horizontais em lamitos adjacentes e oblíquas a sub-horizontais em arenitos associados a ambientes plataformais. Os vulcões de areia exibem predominantemente foliações magnéticas verticais em suas porções centrais, enquanto os valores de inclinação se tornam progressivamente horizontais em direção às margens, indicando um paleo-fluxo sedimentar cônico. Magnetita e titanomagnetita emergem como principais fontes de magnetização, caracterizadas por baixa coercividade e propriedades de domínio pseudo-simples. Este estudo enriquece significativamente a compreensão das extrusões de areia, enfatizando sua relevância geológica e as complexidades envolvidas em sua caracterização mineral e magnética, em uma das maiores exposições de injetitos de areia do mundo.

Palavras-chave: Anisotropia de suscetibilidade magnética, Magnetoestratigrafia, Mineralogia magnética, Formação Moreno.

1. INTRODUÇÃO

Na Bacia de San Joaquin, localizada no estado da Califórnia, Estados Unidos, encontra-se o Complexo de Injeção Gigante de Panoche (PGIC), um complexo de injeção de areia regionalmente desenvolvido em resposta a um evento de sobrepressão em escala de bacia. Os injetitos de areia são formações geológicas resultantes da remobilização de corpos arenosos em estratos rochosos, apresentando complexidade estrutural devido à redistribuição da areia no interior das rochas. A Formação Moreno (Figura 1), situada na parte noroeste da Bacia de San Joaquin e desenvolvida na sucessão do Cretáceo ao Paleógeno do PGIC, demonstra a viabilidade de remobilizar areias por mais de 1200 m de espessura de argilitos de baixa permeabilidade e extrudi-las em fundo marinho (HURST & CARTWRIGHT, 2007).



V CONEPETRO

V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

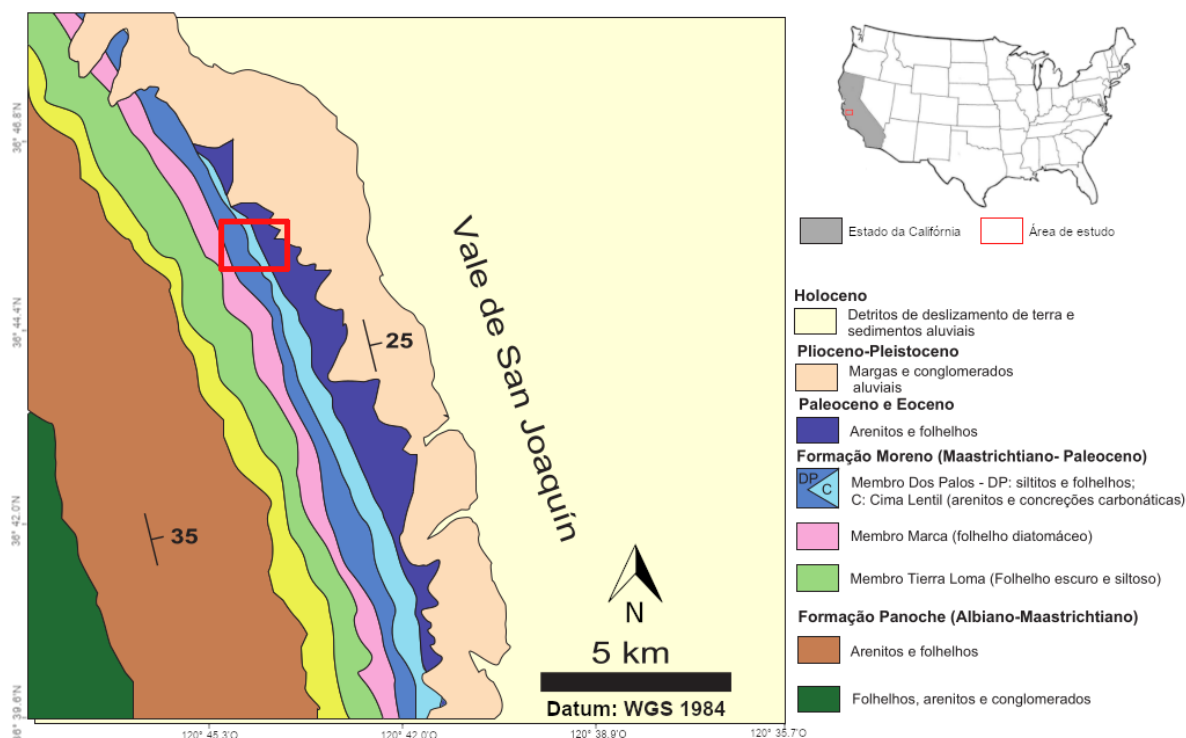


Figura 1: Mapa geológico da área de estudo, na Califórnia (EUA). Modificado de BARTOW *et al.* (1991).

A detecção e análise de injetitos são cruciais na exploração de bacias sedimentares, uma vez que sua presença pode afetar substancialmente o volume de reservatórios, as rotas de migração de fluidos e a conectividade vertical e lateral dos mesmos. A ocorrência de injetitos tem sido cada vez mais estudada e associada à exploração de hidrocarbonetos, especialmente em sistemas clásticos de águas profundas, onde influenciam a distribuição e recuperação de reservas, como observado em campos de óleo no Mar do Norte (*e.g.* HUUSE & MICKELSON, 2004; HURST & CARTWRIGHT, 2007; HURST *et al.*, 2016). No entanto, sua caracterização em subsuperfície é limitada devido à baixa resolução de detecção e imageamento sísmico de corpos intrusivos, correlação espacial limitada entre poços e dificuldades na identificação, diferenciação e interpretação de fácies associadas. Portanto, a caracterização e o estudo de complexos de injeção em afloramento oferecem a melhor oportunidade de entender a arquitetura e geometria dessas formações e aplicar diferentes técnicas para a compreensão de sua formação.

Nesse contexto, é relevante empregar métodos de análise avançados para identificar essas estruturas, destacando-se a aplicação de técnicas magnéticas que fornecem informações cruciais sobre a direcionalidade dos injetitos. Este estudo visa aprofundar a compreensão da seção superior Formação Moreno por meio de métodos como a anisotropia de suscetibilidade magnética, especialmente em relação aos depósitos de extruditos de areia, bem como identificar os minerais responsáveis pela magnetização das rochas sedimentares na área de estudo.

2. METODOLOGIA

Foram selecionados três sítios representativos de estruturas e litologias encontradas em campo na porção superior da Formação Moreno na Bacia de San Joaquin, correspondente aos Membros Dos Palos e Cima Lentil. O Sítio 34 consiste em um arenito extrudido, ou vulcão de areia, enquanto o Sítio 35 possui lamitos e o Sítio 37 é composto por um arenito depositado convencionalmente em

ambiente plataformar. No total, foram analisados 31 espécimes, sendo eles seis amostras de lamitos. (grãos em tamanho argila, marrom acinzentados, com laminações plano paralelas) e 25 de arenitos (grãos de tamanho areia fina a média, cinza amarelados, com estratificações cruzadas de baixo ângulo). Inicialmente, procedeu-se a análise de anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM), utilizando o suscetibilímetro Kappabridge da marca AGICO Ltd., modelo MFK1-FA. Este equipamento é capaz de ler os vetores em três eixos e determinar a trama magnética de cada espécime (JACKSON, 1991; ROCHETTE *et al.*, 1992; TARLING & HROUDA, 1993).

A ASM, em alguns casos, reflete a orientação preferencial dos minerais contidos nas rochas. Em rochas sedimentares, pode indicar a direção na qual o corpo aquoso transportava os sedimentos e a inclinação do plano de estratificação (JELEŇSKA & KADZIAKO-HOFMOKL, 1990; JENSEN & ELMING, 2012). O formato do elipsoide em uma formação rochosa está associado ao processo de deposição, permitindo a aplicação de modelos físicos para determinar o regime deposicional.

A técnica foi complementada com análises mineralógicas para caracterização dos minerais portadores das magnetizações. Para tal, foram utilizadas curvas de histerese e de magnetização remanente isotermal (MRI), realizadas no magnetômetro de rochas de amostra vibrante da Princeton Measurement Corp, e curvas termomagnéticas, realizadas no suscetibilímetro Kappabridge. A mineralogia magnética é fundamental na identificação de minerais magnéticos, baseando-se em fatores como coercividade, temperatura de bloqueio e suscetibilidade magnética, vinculados ao ambiente deposicional e à área fonte.

Os dados das amostras do extrudito foram analisados utilizando a técnica de particionamento K-Medoids (KAUFMAN & ROUSSEUW, 1990), um algoritmo clássico que divide um conjunto de dados em clusters, com o objetivo de minimizar a distância entre pontos atribuídos ao mesmo cluster e seu medoide. O medoide de um cluster é o ponto cuja dissimilaridade média em relação a todos os outros pontos do cluster é a menor, sendo considerado o ponto central do grupo. A escolha dessa técnica se deu pela dificuldade em avaliar visualmente as diferentes porções da estrutura do extrudito em campo.

Além disso, a análise mineralógica foi realizada para caracterizar os minerais responsáveis pelas magnetizações. Foram empregadas curvas de histerese e de magnetização remanente isotermal (MRI) utilizando um magnetômetro de rochas de amostra vibrante da Princeton Measurement Corp, além de curvas termomagnéticas realizadas no suscetibilímetro Kappabridge. A mineralogia magnética desempenha um papel fundamental na identificação dos minerais magnéticos, levando em consideração fatores como coercividade, temperatura de bloqueio e suscetibilidade magnética, os quais estão diretamente relacionados ao ambiente deposicional e à área fonte das amostras. Essa abordagem integrada permitiu uma caracterização mais completa dos minerais presentes nas amostras, contribuindo para uma compreensão mais profunda das propriedades magnéticas e da história geológica dessas rochas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise dos dados do Sítio 34, relacionados à porção do afloramento correspondente a um nível de extrudito, foi utilizada clusterização utilizando o algoritmo k-medoids, que revelou um agrupamento de diferentes porções do vulcão de areia conforme os valores das inclinações e declinações do polo da foliação magnética (K3). O resultado mostrou cinco *clusters* principais, conforme ilustrado na Figura 2. Considerando que os dados são relativos a um extrudito, os *clusters* foram classificados de acordo com suas possíveis posições dentro dessa estrutura, como centro (*cluster* 5), porção intermediária (*cluster* 1) e bordas externas I (*cluster* 2), II (*cluster* 3) e III (*cluster* 4).



V CONEPETRO
V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

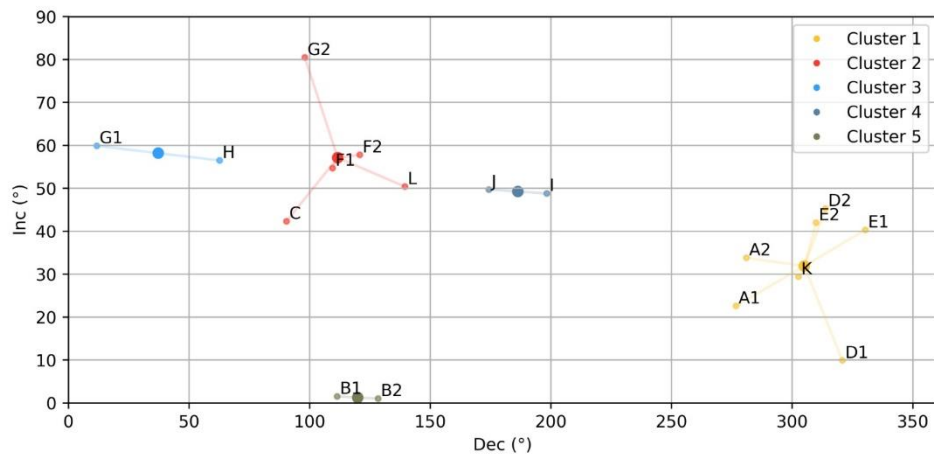


Figura 2: Clusterização dos dados do Sítio 34, com divisão em cinco principais clusters. Os círculos maiores representam os pontos médios calculados pelo algoritmo e os menores as amostras analisadas pertencentes ao sítio.

Com isso, foi possível separar os dados conforme as possíveis posições dentro da estrutura do extrudido (vulcão de areia ou “vent”), que é semelhante a estrutura de um vulcão com cone central mais elevado e com estruturas sub verticalizadas, e porções mais externas com estruturas que mostram uma gradativa diminuição do ângulo do acamamento sedimentar. Os resultados dos três sítios analisados foram projetados em estereogramas equi-área, evidenciando variações nas orientações da foliação magnética (Figura 3).

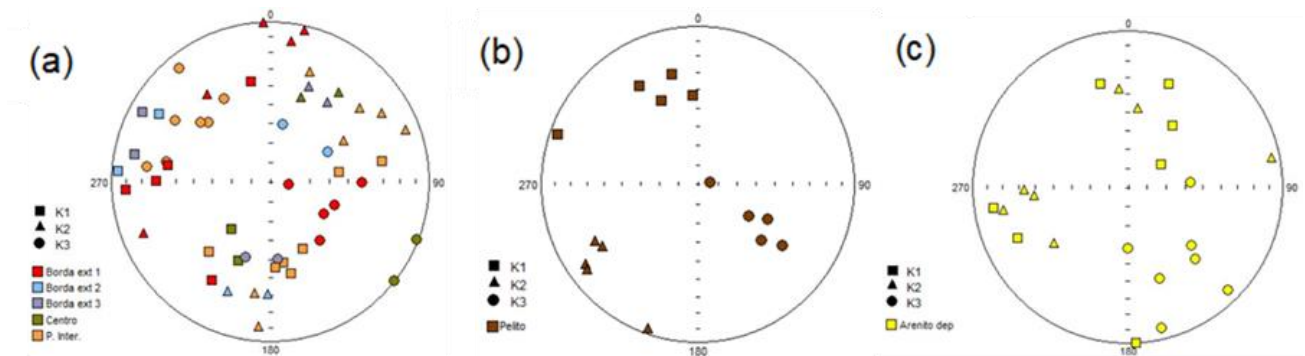


Figura 3: Estereogramas com projeções de dados de ASM para os Sítios 34 (a), 35 (b) e 37 (c).

A porção central do extrudito apresentou valores de foliação magnética mais verticalizadas que as demais áreas e com parâmetros de forma prolatos, com grãos mais alongados. Esse resultado materializa a estrutura central de um vulcão de areia onde estruturas verticalizadas como *flames* ou dobras convolutas são comuns. Ao se afastar do centro, os valores de mergulho se apresentam cada vez mais horizontalizados e seus parâmetros de forma são predominantemente oblatos, com foliação melhor definida. Essa horizontalização da trama mineral expressa as margens extrudito, onde nos flancos da estrutura ocorre a deposição do material extrudido formando laminações paralelas a cruzada tangencial de baixo ângulo.

Nos lamitos, nota-se que a foliação magnética se apresenta mais horizontalizada, enquanto os arenitos deposicionais possui inclinações medianas a sub horizontalizadas e o extrudito se apresenta mais verticalizados. Os dados do lamito (Sítio 35) se apresentam mais próximos uns aos outros ao serem comparados com os dados do extrudito (Sítio 34) e arenito deposicional (Sítio 37). Isso pode

ocorrer devido as diferenças quanto aos processos que fazem com que essas diferentes rochas adquiram magnetização remanente (BROWN & MCENROE, 2011). Grãos detríticos depositados em meio aquoso desenvolvem uma magnetização remanente deposicional, influenciada pelo campo magnético externo, e uma remanência pós-deposicional devido a efeitos na diagenese. O termo "magnetização remanente detrítica" abrange ambos os processos. A deposição ocorre quando grãos ferromagnéticos, erodidos e transportados, retêm momentos magnéticos e se alinham temporariamente com o campo externo. Diversos efeitos pós-deposicionais, como desidratação e compactação influenciam a magnetização remanente pós-deposicional, que só é considerada final na profundidade de bloqueio. O tamanho do grão é crucial, pois grãos menores são mais suscetíveis ao realinhamento, mas também produzem remanência mais forte e estável e, considerando isso, os sedimentos de granulometria fina, como argilitos e siltitos, retêm melhor uma remanência do que rochas de granulometria mais grossa, como arenitos ou conglomerados (BROWN & MCENROE, 2011).

As curvas termomagnéticas analisadas evidenciaram irreversibilidade (Figura 4a), revelando padrões distintos entre os ciclos de aquecimento e resfriamento devido a transformações mineralógicas. Essas mudanças resultam na formação de novos minerais com diferentes suscetibilidades magnéticas. Além disso, essas curvas revelaram características como o ponto isotrópico, onde a magnetita perde algumas de suas propriedades magnéticas, e a transição de Verwey, que pode ocorrer próximo a -160°C , modificando a estrutura cristalográfica da magnetita. Fenômenos como o pico de Hopkinson foram observados, evidenciando uma transição da magnetização remanescente estável para uma superparamagnética. A temperatura de Curie para as amostras analisadas, entre 560 e 570°C , sugere a presença predominante de titanomagnetitas, influenciadas por substituições químicas que afetam suas propriedades magnéticas. Tais resultados corroboram com os obtidos pelas curvas de histerese magnética (Figura 4b), que revelaram valores predominantes de coercividade entre $25,4$ e $5,78$ mT, sugerindo a presença de magnetitas multidomínio (MD) ou pseudo-domínio simples (PSD), assim como com os comportamentos observados nas curvas de magnetização remanente isothermal (Figura 4c), que indicam distribuições de grãos magnéticos com baixas coercividades.

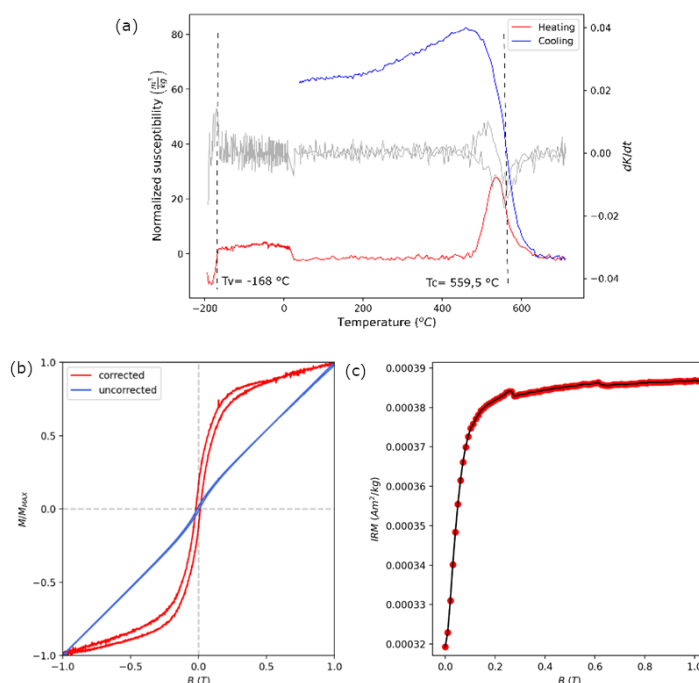


Figura 4: Resultado predominante encontrado nas análises da mineralogia magnética, sendo (a) curva

termomagnética, (b) curva de histerese e (c) curva de magnetização remanente isothermal.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na análise do extrudito revelaram padrões significativos que contribuem para uma compreensão mais profunda de sua estrutura e comportamento magnético. A análise de anisotropia de suscetibilidade magnética para o extrudito através de *clusters* possibilitou a compreensão da estrutura de um vulcão de areia, identificando o fluxo central de areia e sua distribuição lateral. A foliação magnética mais verticalizada na porção central do extrudito está em conformidade com as esperadas para regiões sujeitas a fluxo de injeção. À medida que as amostras se afastam do centro, observa-se uma transição para valores de mergulho mais horizontalizados, indicando parâmetros de forma predominantemente oblatos. Em contrapartida, os lamitos exibiram uma foliação magnética mais horizontalizada, com declinações semelhantes entre si. Para os arenitos depositados convencionalmente em ambiente plataformar, as variações foram mais expressivas, com os arenitos apresentando paleofluxo com inclinação mediana a sub-horizontalizada, embora com dados exibam declinações predominantemente no mesmo quadrante. Além disso, a investigação da mineralogia magnética por meio de curvas termomagnéticas, histereses e MRIs destacou a presença predominante de minerais de baixa coercividade, como magnetitas e titanomagnetitas, na trama magnética das rochas, principalmente PSDs.

Tais análises paleomagnéticas iniciais da pesquisa fornecem informações relevantes a respeito de tais formações geológicas, contribuindo assim para a avaliação de tais estruturas tão relevantes para o setor petrolífero.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e ao Programa de Recursos Humanos do curso de Geologia da UFRGS (PRH 14.1), ao *Sand Injectites Research Group* (SIRG) da Universidade de Aberdeen e ao Laboratório de Paleomagnetismo e Magnetismo de Rochas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP).

6. REFERÊNCIAS

BARTOW, J. A. The Cenozoic evolution of the San Joaquin Valley, California: United States, **Geological Survey Professional Paper**, ed. 1501, p. 40, 1991.

BROWN, L.; MCENROE, S. Remanent Magnetism. In: GUPTA, H.K. (Ed). **Encyclopedia of Solid Earth Geophysics**, 2011, p. 1024-1030.

HURST, A.; HUUSE, M.; DURANTI, D.; VIGORITO, M.; JAMESON, E.; SCHWAB, A. Application of Outcrop Analogues in Successful Exploration of a Sand Injection Complex, Volund Field, Norwegian North Sea. **Geological Society, London Special Publications**, ed. 436, 2016.

HURST, A.; CARTWRIGHT, J. Relevance of Sand Injectites to Hydrocarbon Exploration and Production. In: HURST, A.; CARTWRIGHT, J. (Ed.). **Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production**. AAPG Memoir, ed. 87, 2007, p. 1–19.

HUUSE, M.; MICKELSON, M. Eocene sandstone intrusions in the Tampen Spur area (Norwegian North Sea Quad 34) imaged by 3D seismic data. **Marine and Petroleum Geology**, ed. 21, p. 141–155, 2004.

KAUFMAN, L.; ROUSSEUW, P. J. Partitioning Around Medoids (Program PAM). In: KAUFMAN,

L. ROUSSEUW, P. J. (Ed.). **Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis**, 1990, p. 68-125.

JACKSON, M. Anisotropy of magnetic remanence: a brief review of mineralogical sources, physical origins, and geological applications, and comparison with susceptibility anisotropy. **Pure and Applied Geophysics**, ed. 136, vol. 1, p. 1-28, 1991.

JELEŃSKA, M.; KADZIAŁKO-HOFMOKL, M. Dependence of anisotropy of magnetic susceptibility of rocks on temperature. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, ed. 62, vol. 1, 19 – 31, 1990.

JENSEN, M.B.; ELMING, S. A correlation of ams and rock quality in crystalline and sedimentary rocks in the kiirunavaara hanging wall, sweden. **Journal of Applied Geophysics, Elsevier Science**, ed. 86, 2012.

ROCHETTE, P.; JACKSON, M.; AUBOURG, C. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. **Journal Geophysics**, ed. 30, p. 209, 1992.

TARLING, D. H.; HROUDA, F. **The Magnetic Anisotropy of Rocks**. Chapman & Hall, London, 1993, 217 p.