

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

CAROLINE AZZOLINI PONTEL

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS PALEOMAGNÉTICOS NO COMPLEXO DE INJEÇÃO
DE AREIA *PANOCHÉ* NA BACIA DE *SAN JOQUIN*, CALIFÓRNIA (EUA)**

PORTO ALEGRE

2024

CAROLINE AZZOLINI PONTEL

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS PALEOMAGNÉTICOS NO COMPLEXO DE INJEÇÃO
DE AREIA *PANOCHÉ* NA BACIA DE *SAN JOAQUIN*, CALIFÓRNIA (EUA)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Jairo Francisco Savian e Ruy Paulo Philipp

Coorientador: Gustavo Zvirtes

PORTO ALEGRE

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Pontel, Caroline Azzolini
Aplicação de Métodos Paleomagnéticos no Complexo de
Injeção de Areia Panoche na Bacia de San Joaquin,
Califórnia (EUA) / Caroline Azzolini Pontel. -- 2024.
98 f.
Orientadores: Jairo Francisco Savian, Ruy Paulo
Philipp.

Coorientador: Gustavo Zvirtes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2024.

1. Formação Moreno. 2. Bacia de San Joaquin. 3.
Magnetoestratigrafia. 4. Anisotropia de
Suscetibilidade Magnética (ASM). 5. Mineralogia
Magnética. I. Savian, Jairo Francisco, orient. II.
Philipp, Ruy Paulo, orient. III. Zvirtes, Gustavo,
coorient. IV. Título.

Caroline Azzolini Pontel

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS PALEOMAGNÉTICOS NO COMPLEXO DE
INJEÇÃO DE AREIA *PANOCHÉ* NA BACIA DE *SAN JOQUIN*, CALIFÓRNIA
(EUA)**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Porto Alegre, 19 de janeiro de 2024.

Banca Examinadora

Profa. Dra. Maria Luiza Rosa (UFRGS)

Profa. Dra. Silvana Riffel (UFRGS)

Dr. Guilherme Borsa

À memória do meu avô, que em todo verão compartilhava com todos os netos as histórias de cada mineral de sua querida coleção.

Agradecimentos

Este trabalho é fruto não apenas do meu esforço, mas também daqueles que me antecederam e fortaleceram. Sou grata aos meus avós, aos meus pais e aos meus irmãos, que desde a minha infância me estimularam a ser uma cientista. Este é o meu primeiro passo.

Agradeço ao Rafael por estar presente em cada momento, pela paciência, respeito e harmonia que me proporciona, mesmo nos momentos mais caóticos. Obrigada por explicar repetidamente sobre os códigos sempre que eu ia mexer. Principalmente nas ocasiões em que tentava mexer em algo, parava de compilar corretamente e você arrumava para mim – e foram muitas vezes. Agradeço pelas noites em que dormiu no sofá apenas para que eu não me sentisse sozinha enquanto estudava na sala. Sou grata por você me permitir conhecer um amor que transcende o tempo e o espaço.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, Professor Dr. Jairo Francisco Savian e Professor Dr. Ruy Paulo Philipp, pela orientação ao longo de todo o trabalho, fornecendo um suporte essencial para o meu desenvolvimento profissional. Também quero estender meus agradecimentos ao meu coorientador, Dr. Gustavo Zvirtes, pela dedicação demonstrada em cada reunião e pela atenção dada a todas as dúvidas que apresentei, contribuindo significativamente para a resolução delas e aprimorando este projeto.

Agradeço ao *Sand Injectites Research Group* (SIRG) da Universidade de Aberdeen por possibilitar o trabalho de campo e a coleta das amostras, além de toda a assistência ao longo do projeto. Um agradecimento especial ao Professor Andrew Hurst e ao Dr. Matthew Brettle pelo valioso suporte científico, revisões e auxílio na compreensão da geologia da área.

Expresso meu agradecimento à FINEP-ANP e ao Programa de Recursos Humanos do curso de Geologia da UFRGS (PRH 14.1) pela oportunidade de trabalhar neste projeto. Agradeço pelos incentivos que viabilizaram o desenvolvimento do trabalho, proporcionando uma experiência enriquecedora. E ao Laboratório de Paleomagnetismo e Magnetismo de Rochas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), pelo *grant* que isentou os custos das análises.

Agradeço a todos os colegas do Laboratório de Paleomagnetismo da UFRGS, Alana, Gabriel, Henrique, João Antônio e Raquel, por cada conhecimento compartilhado, mas em especial à Camila, com quem pude debater e aprender tanto. Agradeço também a todos os colegas do USPMag, especialmente Janine e Júlia, que sempre estiveram dispostas a me ajudar a solucionar problemas.

Obrigada aos amigos Douglas, Karoline e Mariana, por terem feito de Porto Alegre uma casa pra mim desde meus primeiros passos nesta cidade. Ter um lar aqui foi muito importante pra mim.

Quero registrar aqui, também, todo o conforto que sempre recebi da Amanda, a pessoa de fora da bolha. Quem dera todo mundo tivesse alguém como ela em qualquer fase de sua vida.

Não posso deixar de agradecer a quem me acolheu desde o primeiro ano da geologia, as malaquitas Isabelle, Laura e Priscila, que me proporcionaram o sentimento de pertencimento ao curso. Obrigada por aquela madrugada com conversas até às 5h da manhã, sempre vou levar um pouquinho de vocês comigo. E claro, não teria como deixar de agradecer àqueles que encontrei apenas no final do curso, mas que trouxeram o carinho que eu tanto precisava, tornando os campos mais divertidos e as aulas mais leves. Michelle, Lorenzo e lasmin, obrigada por cada cafezinho não planejado em dias aleatórios. Obrigada por gostarem tanto de trabalhos de campo quanto eu. Obrigada a todos os demais colegas por cada experiência.

A geologia é, de fato, gratificante.

“Não siga uma carreira científica por fama ou dinheiro (...) Sua recompensa é a ampliação do horizonte na medida em que você escala. E, se você conseguir essa recompensa, não vai querer nenhuma outra.”

Cecília Payne-Gaposchkin

Resumo

Os complexos de injeção de areia representam alvos cruciais na exploração de hidrocarbonetos, constituindo-se como fatores significativos no aumento da conectividade vertical e horizontal em campos petrolíferos, influenciando, assim, tanto o volume quanto as rotas de migração de fluidos. No entanto, o mapeamento em diferentes escalas e a compreensão dos afloramentos de grandes complexos expostos são muito limitados. Com o intuito de aprimorar a compreensão acerca dessas estruturas, este estudo tem como objetivo principal avaliar o emprego de métodos paleomagnéticos em amostras de rochas sedimentares da seção de topo da Formação *Moreno*, a qual integra o Complexo de Injeção Gigante de *Panoche*. Este complexo é uma das maiores exposições de injetitos de areia no mundo, localizado na Bacia de *San Joaquin*, no estado da Califórnia (EUA). Foram utilizados dados de anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM), desmagnetização por campos alternados, curvas termomagnéticas, ciclos histerese e magnetização remanente isotermal para obter uma caracterização mais precisa acerca das direções de trama magnética, inversões de polaridade e mineralogia magnética. Os resultados indicam uma complexidade nas propriedades magnéticas das rochas estudadas, ressaltando a importância de uma abordagem integrada para compreender a história geológica da região. As informações obtidas por meio da ASM revelaram diferentes padrões direcionais, com foliações magnéticas mais horizontalizadas para lamitos e arenitos depositados, podendo tornar-se mais verticalizadas ao analisar as estruturas sedimentares que envolvem a porção central de corpos interpretados como extruditos de areia. A magnetoestratigrafia identificou três magnetozonas de polaridade reversa, possivelmente correlacionadas com Crons danianos, embora, até o momento, haja limitações na interpretação devido à escassez de dados bioestratigráficos. Os minerais responsáveis pela magnetização apresentam predominantemente baixa coercividade, sendo magnetita e titanomagnetita, com domínio pseudo-simples.

Palavras Chave: Anisotropia de Suscetibilidade Magnética; Magnetoestratigrafia; Mineralogia magnética; Formação *Moreno*.

Abstract

Sand injection complexes represent crucial targets in hydrocarbon exploration, constituting significant factors in increasing vertical and horizontal connectivity in oil fields, thus influencing both the volume and routes of fluid migration. However, mapping at different scales and understanding the outcrops of large complexes exposed are still limited. To improve the understanding of these structures, the main objective of this study is to evaluate the use of paleomagnetic methods in sedimentary rock samples from a top section of the Moreno Formation, which is part of the Panoche Giant Injection Complex. This complex is one of the largest exposures of injected sand in the world, located in the San Joaquin Basin, in the state of California (USA). Data on anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), demagnetization by alternating fields, thermomagnetic curves, hysteresis cycles and isothermal remanent magnetization were used to obtain a more precise characterization of the magnetic plot directions, polarity inversions and magnetic mineralogy. The results indicate a complexity in the magnetic properties of the rocks studied, highlighting the importance of an integrated approach to understanding the geological history of the region. The information obtained through AMS revealed different directional patterns, with more horizontal magnetic foliations for deposited mudstones and sandstones, which can become more vertical when analyzing the sedimentary structures that surround the central portion of bodies interpreted as sand extrudites. Magnetostratigraphy has identified three magnetozones of reverse polarity, possibly correlated with Danian Chrons, although, to date, there are limitations in interpretation due to the scarcity of biostratigraphic data. The minerals responsible for magnetization predominantly have low coercivity, being magnetite and titanomagnetite, with a pseudo-single domain.

Keywords: Anisotropy of Magnetic Susceptibility; Magnetostratigraphy; Magnetic mineralogy; Moreno Formation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa geológico da área de estudo, na Califórnia (EUA). Modificado de Bartow <i>et al.</i> (1991).	21
Figura 2: Mapa geológico da porção centro-norte da Califórnia (EUA) mostrando as unidades tectonoestratigráficas e a localização do PGIC. Modificado de Zvirtes <i>et al.</i> (2019).	24
Figura 3: Ilustração esquemática da arquitetura do Complexo de Injeção Gigante <i>Panoche</i> . Os valores em metros dizem respeito à profundidade. Modificado de Vigorito <i>et al.</i> (2008).	27
Figura 4: Ilustração esquemática da aquisição de remanência sedimentar através de (a) magnetização remanente deposicional (DRM), (b) magnetização remanente pós-deposicional (pDRM) e (c) uma pDRM juntamente com uma magnetização remanente biogeoquímica (BRM). Modificado de Roberts <i>et al.</i> (2013).	31
Figura 5: Representação tridimensional do elipsoide magnético e seus respectivos eixos de suscetibilidade magnética plotados em estereograma. Modificado de Hrouda (2014).	33
Figura 6: Ciclo de histerese de um material ferromagnético. Modificado de Lowrie, 2007.	38
Figura 7: Imagem de satélite obtida através do Google Earth da área de estudo com os pontos de coleta dos cilindros e as divisões dos membros encontrados na região.	41
Figura 8: (a) Local de coleta dos cilindros no <i>Bob Cat Canyon</i> , com cilindros BCC039 e BCC041 destacados em vermelho, (b) Ponto de coleta do Sítio 35, com lamito e (c) Ponto de coleta do Sítio 33, com arenitos.	42
Figura 9: Correlação estratigráfica do local em que foram realizadas coletas de cilindros.	43
Figura 10: Local de coleta das amostras do grupo BCC040.	44
Figura 11: Serras utilizadas na preparação das amostras, sendo (a) serra de disco duplo Person Bouquet e (b) serra de corte.	45
Figura 12: Suscetibilímetro Kappabridge modelo MFK1-FA da AG/CO Ltd.	48
Figura 13: Magnetômetro SQUID Long Core 755 R da 2G Entrepises.	49
Figura 14: Suscetibilímetro KLY4 da AG/CO Ltd.	50

Figura 15: (a) Magnetômetro de rochas de amostra vibrante modelo 2900/3900-02 da <i>Princeton Measurement Corp</i> , (b) detalhe da haste com amostra encapsulada acoplada.	51
Figura 16: Clusterização dos dados do Sítio 34, com divisão em cinco principais <i>clusters</i> . Os círculos maiores representam os pontos médios calculados pelo algoritmo e os menores as amostras analisadas pertencentes ao sítio.	56
Figura 17: Estereograma com projeções de dados de ASM para Sítio 34.	57
Figura 18: Parâmetros magnéticos do Sítio 34, sendo (a) Grau de anisotropia por Suscetibilidade média e (b) Parâmetro de forma por grau de anisotropia.....	58
Figura 19: Estereograma com projeções de dados de ASM para Sítio 35.	59
Figura 20: Parâmetros magnéticos do Sítio 35, sendo (a) Grau de anisotropia por Suscetibilidade média e (b) Parâmetro de forma por grau de anisotropia.....	59
Figura 21: Estereograma com projeções de dados de ASM para Sítio 37.	60
Figura 22: Parâmetros magnéticos do Sítio 37, sendo (a) Grau de anisotropia por Suscetibilidade média e (b) Parâmetro de forma por grau de anisotropia.....	60
Figura 23: Exemplo de desmagnetizações a campos alternados em amostra de lamitos, com as projeções estereográficas, projeções de <i>Zijderveld</i> e curvas de intensidades normalizadas (M/M_{max}) em função do campo alternado.....	62
Figura 24: Exemplo de desmagnetização a campos alternados em amostra de arenitos, com as projeções estereográficas, projeções de <i>Zijderveld</i> e curvas de intensidades normalizadas (M/M_{max}) em função do campo alternado.....	62
Figura 25: Dados de magnetoestratigrafia do <i>Log 1</i> da seção estratigráfica. ..	65
Figura 26: Parte I dos dados de magnetoestratigrafia do <i>Log 2</i> da seção estratigráfica.	66
Figura 27: Parte II dos dados de magnetoestratigrafia do <i>Log 2</i> da seção estratigráfica.	67
Figura 28: Curvas termomagnéticas (Suscetibilidade (SI) contra Temperatura (°C)) representativas dos dados analisados da Bacia de <i>San Joaquin</i> , sendo (a) amostra de arenito e (b) amostra de lamito. A curva em vermelho representa aquecimento, a azul resfriamento e a cinza a primeira derivada dos dados. ...	68
Figura 29: Ciclos de histerese mais característicos das amostras de arenito analisadas, com comportamentos de (a) material superparamagnético e (b) cintura fina típica de magnetita.....	69

Figura 30: Ciclos de histerese mais característicos das amostras de lamito analisadas, com comportamentos de (a) “cintura de vespa” e (b) curva típica de hematita.....	69
Figura 31: Principais comportamentos observados nas curvas de MRI amostras analisadas, sendo em (a) MRI que satura em campos inferiores a 0,1 T e (b) MRI que não satura até campo de 1 T.	70
Figura 32: Imagem do extrudito e local de coleta do Sítio 34 com marcações dos pontos de coleta de cada um dos cilindros do grupo BCC040. A linha branca tracejada descreve a trajetória da estrutura física do extrudito, que acompanha aproximadamente a disposição espacial do acamamento sedimentar.....	72
Figura 33: Possível magnetoestratigrafia com correlações estratigráficas do campo, observadas no afloramento da Bacia de <i>San Joaquin</i>	75
Figura 34: Diagrama de Day (Day et al., 1977, modificado por Dunlop 2002a), indicando a estrutura de domínios magnéticos das amostras analisadas. Hcr - coercividade de remanência; Hc - coercividade; Mrs - magnetização remanente de saturação; Ms - magnetização de saturação; SD - <i>single-domain</i> , PSD - <i>pseudo-single domain</i> , MD – <i>multidomain</i>	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de amostras utilizadas no estudo e seus respectivos pesos.	46
Tabela 2: Resultados dos parâmetros por sítio de Suscetibilidade Média (Km), Grau de Anisotropia (P), Parâmetro de Forma (T) e resultado dos eixos principais de suscetibilidade (K1, K2 e K3) com seus respectivos erros associados (ϵ_{12} , ϵ_{23} e ϵ_{31} , calculados a partir da estatística de Jelinek).	61
Tabela 3: Dados paleomagnéticos obtidos com a desmagnetização por campos alternados.....	63
Tabela 4: Crons e idades para o Cretáceo Superior e Paleoceno.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF – *Alternating field*

ASM – Anisotropia de Suscetibilidade Magnética

BRM – *biochemical remanent magnetization*

ChRM – *Characteristic Remanent Magnetization*

Dec – Declinação

DRM – *Depositional Remanent Magnetization*

EUA – Estados Unidos da América

GPTS – *Geomagnetic Polarity Time Scale*

GVG – *Great Valley Group*

H – Campo Indutor Aplicado

Hc – Coercividade

Hcr – Coercividade de Remanência

Inc – Inclinação

K – Suscetibilidade magnética

K₁ – Eixo de Suscetibilidade Magnética Máximo

K₂ – Eixo de Suscetibilidade Magnética Intermediário

K₃ – Eixo de Suscetibilidade Magnética Mínimo

Km – Suscetibilidade média

MAD – *Maximum Angular Declination*

MD – *Multidomain*

MRI – Magnetização Remanente Isotermal

Mrs – Magnetização Remanente de Saturação

Ms – Magnetização de Saturação

mT - militesla

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

P – Grau de Anisotropia

PCA – *Principal Component Analysis*

pDRM – *Post-Depositional Remanence*

PGIC – *Panoche Giant Injection Complex*

PSD – *Pseudo-single Domain*

SD – *Single Domain*

SIRM – *Saturation Isothermal Remanent Magnetization*

T – Parâmetro de forma

VSM – *Vibrating Sample Magnetometer*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Caracterização do problema	19
1.2 Área de estudo	21
1.3 Objetivos	22
1.4 Justificativa.....	22
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	24
2.1 Contexto Geológico	24
2.1.1 <i>Bacia de San Joaquin</i>	24
2.1.2 <i>Contexto estratigráfico</i>	27
2.1.3 <i>Intrusões clásticas</i>	28
2.2 Registro magnético em rochas sedimentares	30
2.2.1 <i>A aquisição da magnetização em sedimentos</i>	30
2.2.2 <i>Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM)</i>	32
2.2.3 <i>Magnetoestratigrafia</i>	34
2.2.4 <i>Mineralogia Magnética</i>	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 Revisão bibliográfica	40
3.2 Coleta dos cilindros	40
3.3 Preparação de espécimes padrões	45
3.4 Métodos utilizados	47
3.4.1 <i>Análise de Anisotropia de Suscetibilidade Magnética</i>	47
3.4.2 <i>Desmagnetização de Campos Alternados (AF)</i>	48
3.4.3 <i>Mineralogia Magnética</i>	49
3.5 Processamento dos dados.....	52
3.5.1 <i>Correções dos dados de campo</i>	52
3.5.2 <i>Tratamento dos dados de ASM</i>	53
3.5.3 <i>Tratamento de Desmagnetizações por Campos Alternados (AF)</i> ..	54
3.5.4 <i>Tratamento dos dados de mineralogia magnética</i>	55
4 RESULTADOS	56
4.1 ASM	56
4.2 Magnetoestratigrafia	61
4.3. Mineralogia magnética.....	68

4.3.1 Curvas termomagnéticas	68
4.3.2 Curvas de histerese	68
4.3.3 Curvas de MRI	70
5 DISCUSSÃO	71
5.1 ASM	71
5.2 Magnetoestratigrafia	73
5.3 Mineralogia magnética.....	76
5.3.1 Curvas termomagnéticas	76
5.3.2 Curvas de histerese	77
5.3.3 Curvas de MRI	78
5.3.4 Diagrama de Day	78
6 CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS.....	81
APÊNDICE A	86
APÊNDICE B	89
APÊNDICE C	94
APÊNDICE D	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do problema

Os injetitos de areia são formações geológicas resultantes da remobilização de corpos arenosos em estratos rochosos. Essas intrusões clásticas, de composição siliciclástica, geralmente apresentam uma complexidade estrutural devido à redistribuição da areia no interior das rochas. Os complexos de injeção de areia constituem alvos para exploração de hidrocarbonetos, fornecendo excelentes unidades de fluxo intra-reservatório que criam comunicação vertical e lateral em todo o campo petrolífero dentro de unidades de baixa permeabilidade (Hurst & Cartwright, 2007). No entanto, a caracterização de complexos de injeção de areia em subsuperfície ainda é muito difícil devido à baixa resolução de detecção e imageamento sísmico de corpos intrusivos, limitada correlação espacial entre poços, e dificuldades de identificação, diferenciação e interpretação de fácies associadas a injetitos. Por isso a caracterização e o estudo de complexos de injeção em afloramento oferecem a melhor oportunidade de se entender a arquitetura e geometria de injetitos e aplicar diferentes técnicas geocientíficas para a compreensão de sua formação.

O Complexo de Injeção Gigante de *Panoche* (*Panoche Giant Injection Complex*, PGIC) é um complexo de injeção de areia desenvolvido regionalmente (300–400 km² de exposição) formado em resposta a evento de sobrepressão em escala de bacia. Desenvolvido na sucessão do Cretáceo ao Paleógeno, na Formação *Moreno* na Bacia de *San Joaquin*, o PGIC é um exemplo típico para caracterização de afloramentos de injetitos e demonstra que é fisicamente possível remobilizar areias, e transportá-las por mais de 1200 m de espessura de argilitos (não compactados) de baixa permeabilidade e extrudir em fundo marinho. Ao extrudir areia alimentadas pelo sistema de intrusões (diques e soleiras) subjacentes, sedimentos arenosos classificados como extruditos (*sensu* Hurst *et al.* 2005) são depositados os quais marcam a idade relativa do evento de injeção de areia.

As rochas sedimentares do Maastrichtiano ao Daniano da Formação *Moreno* registram a transição de um ambiente marinho profundo para um

ambiente plataformal (Payne, 1951; McGuire, 1988), são constituídas pelos membros *Dosados*, *Tierra Loma*, *Marca* e *Dos Palos*. Este último contém o Membro *Cima Sandstone Lentil* (CSL), constituído por níveis métricos a decamétricos ricos em arenitos e arenito siltsos intercalados com níveis centimétricos a métricos de pelitos lamosos. A origem do Membro CSL ainda é tema de discussão devido ao contexto geológico que está inserido, com deposição sedimentar em ambiente marinho raso e plataformal, com processos de extrusão de areia em fundo marinho durante a colocação do PGIC (e.g. Vigorito *et al.*, 2008; Vigorito & Hurst, 2010).

Devido a importância de se mapear e entender complexos de injeção e seus elementos para o entendimento da arquitetura e litoestratigrafia o qual estão associados, e delimitar o tempo no qual o complexo se formou, o foco deste estudo está na aplicação da magnetoestratigrafia no nível do complexo de extrusão do PGIC no sentido de delimitar a idade de deposição do extrudito e consequentemente do evento de intrusão do complexo. No entanto, estabelecer modelos geocronológicos precisos é desafiador devido à complexidade dos estratos e à composição litológica. A magnetoestratigrafia é uma técnica cronoestratigráfica que possibilita a datação de rochas sedimentares e que já foi aplicada com sucesso na área de óleo e gás (e.g. Hauger & Van Veen, 1995; Turner & Bryant, 1995; Hailwood *et al.*, 2010), facilitando a interpretação dos processos sedimentares que levaram à formação das sequências estudadas e complementando as informações obtidas pela bioestratigrafia.

Ademais, a pesquisa também emprega a anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) em estruturas associadas a "*vents*" ou "vulcões de areia" para a determinação e caracterização da fábrica mineral dos sedimentos. A ASM fornece informações suplementares acerca da magnetização adquirida pelos materiais magnéticos presentes nas sequências sedimentares. Além disso, realiza-se a análise de minerais magnéticos, proporcionando a compreensão da natureza desses minerais por intermédio de suas propriedades magnéticas.

1.2 Área de estudo

A região de estudo deste projeto está localizada na Bacia de *San Joaquin* (Figura 1), no estado da Califórnia, Estados Unidos. Nessa área, encontra-se o Complexo de Injeção Gigante de *Panoche*, uma das maiores exposições de injeções de areia do mundo. Trata-se de uma sucessão sedimentar exposta de maneira descontínua ao longo do flanco leste da cordilheira *Coast Range*. Esta sucessão de rochas sedimentares clásticas faz parte do *Great Valley Group* (GVG) (Ingersoll, 1982), sucessão depositada como uma bacia sin-orogênica de *forearc* associada a orogenia Nevadiana, com deposição entre o Jurássico Superior e o Oligoceno (Dickinson, 1981; Ingersoll, 2008). A Bacia de *San Joaquin* foi desenvolvida em uma margem convergente de estilo andino (Graham, 1987) com um sistema de trincheira de arco criado pela subducção da crosta oceânica do Oceano Farallon, sob a placa continental Norte-americana para o leste (e.g. Atwater, 1970; Atwater & Stock, 1998), gerando as suítes graníticas do Batólito de *Sierra Nevada* e as rochas metamórficas do Complexo Franciscano, representando as unidades do prisma acrecionário, desenvolvidos a leste e oeste da bacia, respectivamente.

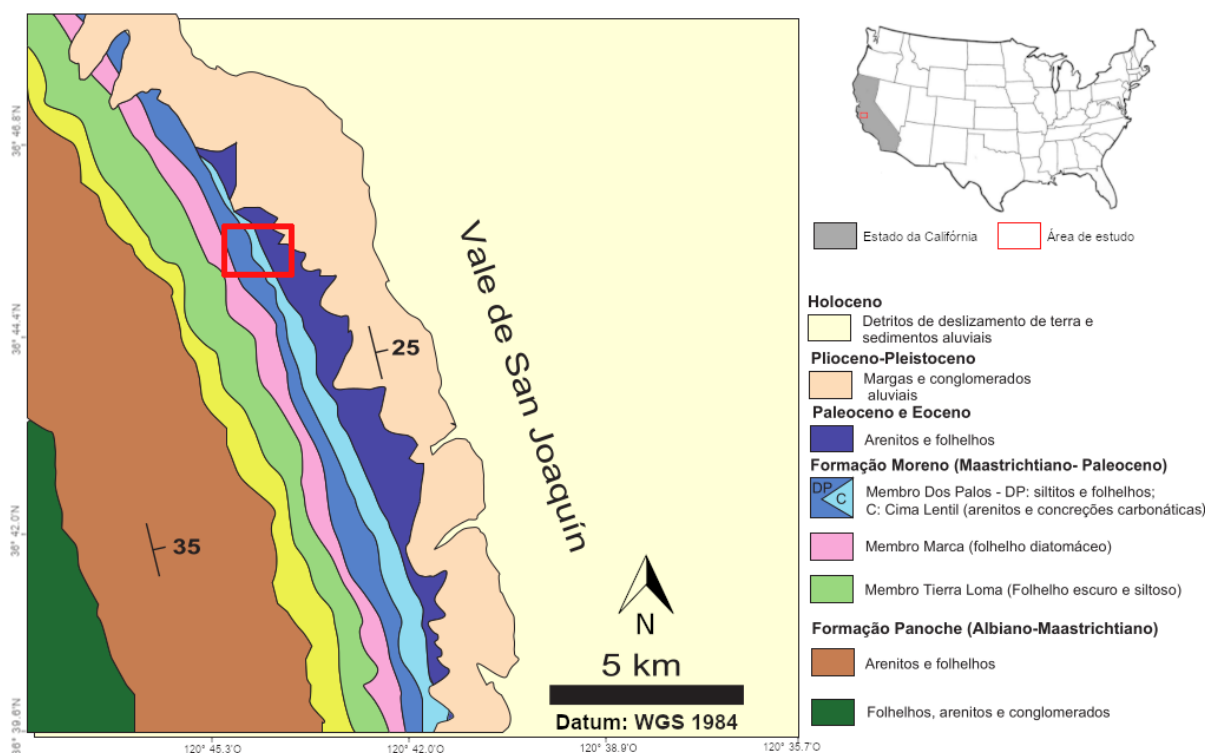


Figura 1: Mapa geológico da área de estudo, na Califórnia (EUA). Modificado de Bartow *et al.* (1991).

1.3 Objetivos

Este trabalho visa aprofundar a compreensão geológica e paleomagnética de uma seção da porção superior da Formação *Moreno*, na porção noroeste da Bacia de *San Joaquin*, de modo a:

1. Analisar tendências direcionais, através da ASM, investigando as características de paleofluxo das principais litologias e estruturas, especialmente associadas a depósitos relacionados a extruditos de areia contidos na porção superior da formação;
2. Estabelecer vínculos temporais por meio da magnetoestratigrafia, contribuindo assim para uma construção mais precisa do contexto temporal de formação do PGIC e das sucessões sedimentares que o contém;
3. Identificar minuciosamente os minerais portadores de magnetização das rochas que compõem depósitos sedimentares.

1.4 Justificativa

A detecção e análise de injetitos ganham uma dimensão crucial na exploração de bacias sedimentares, uma vez que sua presença pode substancialmente impactar no volume de reservatórios, nas rotas de migração de fluidos e na conectividade vertical e lateral de reservatórios. A ocorrência de injetitos têm sido uma característica cada vez mais estudada e vinculada a exploração de hidrocarbonetos, em particular sistemas clásticos de águas profundas, onde são conhecidos por influenciar a distribuição e recuperação de reservas formando expressivos reservatórios, como demonstrado em diversos campos de óleo no Mar do Norte (e.g. Huuse & Mickelson, 2004; Huuse *et al.*, 2007; Hurst & Cartwright, 2007; Hurst *et al.*, 2016; Satur *et al.*, 2020).

Embora os complexos de injeção de areia tenham se tornado cada vez mais importantes em sistemas de hidrocarbonetos dentro do cenário global, o mapeamento em diferentes escalas e a compreensão de afloramentos de grandes complexos ainda continuam limitados. Diante desse contexto, torna-se relevante empregar métodos de análise avançados que possibilitem a identificação dessas estruturas. Dentre as abordagens destacadas, ressalta-se

a aplicação de técnicas magnéticas, que se configuram como uma ferramenta essencial para compreender os padrões direcionais dos injetitos. A habilidade dessas técnicas em fornecer informações cruciais sobre a bacia é particularmente valiosa, proporcionando uma caracterização mais acurada das estruturas. A magnetoestratigrafia pode ser utilizada como uma ferramenta internacional de correlação temporal, desempenhando um papel crucial na construção de modelos de idade de alta resolução. Essa abordagem não só aprimora significativamente os modelos exploratórios utilizados pelas empresas petrolíferas, mas também contribui para o entendimento mais abrangente das características geológicas das bacias sedimentares.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Contexto Geológico

2.1.1 Bacia de San Joaquin

O *Great Valley* da Califórnia, localizado entre a *Sierra Nevada* e a Cordilheira Costeira, divide-se nos Vales do Sacramento, ao norte e de *San Joaquin*, ao sul (Figura 2). Este último apresenta uma calha estrutural assimétrica, preenchida por sedimentos do Mesozoico e Cenozoico superior (Bartow, 1991).

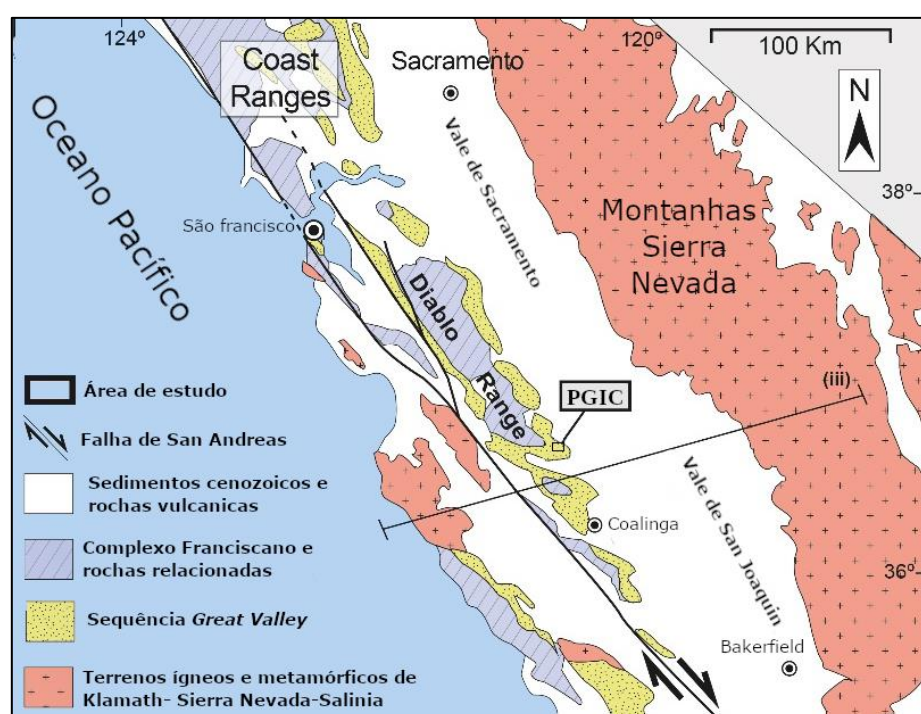


Figura 2: Mapa geológico da porção centro-norte da Califórnia (EUA) mostrando as unidades tectonoestratigráficas e a localização do PGIC. Modificado de Zvirtes *et al.* (2019).

A fronteira transformante entre as placas do Pacífico e da América do Norte, localizada no oeste da Califórnia, representa uma formação geológica de relativa recenticidade. Há aproximadamente 200 Ma teve início um processo crucial na evolução dessa região, marcado pela subducção da Placa Farallon sob a margem ocidental da América do Norte. Esse processo resultou na formação de uma extensa linha vulcânica. Cerca de 30 Ma atrás, a Placa Farallon foi majoritariamente subduzida, estabelecendo o limite transformante de *San Andreas*.

A Bacia de *San Joaquin* é uma bacia de *front arc* desenvolvida em uma margem convergente de estilo andino (Graham, 1987) com um sistema de trincheira de arco criado pela subducção da crosta oceânica (Oceano Farallon), sob a placa continental norte-americana para o leste (e.g. Atwater, 1970; Atwater & Stock, 1998), gerando as suítes graníticas do Batólito de *Sierra Nevada* e as rochas metamórficas do Complexo Franciscano, representando as unidades do prisma acrescionário, desenvolvidos a leste e oeste da bacia, respectivamente, sob os quais seus sedimentos se depositaram.

Vestígios da antiga cadeia de montanhas vulcânicas são visíveis, especialmente nas regiões central e sul da Califórnia, onde a erosão moldou vulcões e vastas áreas de granito das câmaras de magma resfriadas compõem as montanhas da *Sierra Nevada*.

A Bacia de *San Joaquin*, que no final do Mesozoico compunha a porção sul de uma extensa bacia anterior, passou por uma evolução ao longo do Cenozoico, culminando na configuração atual como uma bacia híbrida intermontana (Bartow, 1991).

A história sedimentar da bacia de *San Joaquin* apresenta uma transição notável entre o início e o final do Cenozoico. Segundo Bartow (1991), no início, a sedimentação era caracterizada por sequências deposicionais de longa duração em toda a bacia e posteriormente passaram a ter sequências mais curtas, refletindo a mudança de uma margem continental convergente para uma transformante.

No Paleógeno, os eventos tectônicos relacionados à subducção e à falha proto-*San Andreas*, juntamente com variações eustáticas no nível do mar, desempenharam papéis significativos na evolução da bacia. Durante o Neógeno, a migração para noroeste da junção tripla de *Mendocino* e o tectonismo associado ao sistema de falhas de *San Andreas* foram os principais controladores, com a compressão normal ao longo de *San Andreas* contribuindo para deformações no lado oeste do vale. Eventos eustáticos no Mioceno médio podem ter influenciado uma transgressão generalizada. No final do Cenozoico, as condições climáticas, incluindo glaciares alpinos na *Sierra Nevada* e um clima pluvial, desempenharam um papel significativo na sedimentação da bacia.

No lado oeste do Vale de *San Joaquin*, a sequência mesozoica e do início do Terciário, juntamente com o subjacente ofiolito, é justaposta ao Complexo

Franciscano ao longo de uma falha denominada impulso da Cordilheira Costeira (Bailey *et al.*, 1964). O Complexo Franciscano foi empurrado para leste como uma cunha entre o embasamento cristalino e a sequência do Grande Vale (Wentworth *et al.*, 1984). A espessura dos estratos cenozoicos no Vale de *San Joaquin* aumenta para sudeste, atingindo mais de 9 km na sub-bacia de Maricopa-Tejon, ao sul do arco de Bakersfield, enquanto a sequência do *Great Valley* afina-se em direção ao sudeste e aparentemente está ausente ao sul do arco de Bakersfield (Bartow, 1991).

As rochas sedimentares da bacia que recobrem o embasamento oferecem um registro praticamente contínuo de sedimentação ao longo dos últimos 100 Ma. Adicionalmente, as geometrias deposicionais e as estruturas de falhas documentam a evolução tectônica da região, desde um flanco até uma bacia transcorrente, culminando na configuração atual de uma margem transpressional. A complexidade da sua arquitetura sedimentar é acentuada pela interação dos regimes tectônicos, associada a alterações laterais no ambiente de deposição e a variações temporais no nível relativo do mar.

O Complexo de Injeção Gigante *Panoche* (*Panoche Giant Injection Complex*, PGIC), abrangendo 300–400 km², é uma das maiores exposições globais de injetitos de areia, gerados por um evento de sobrepressão regional. Encontra-se exposto ao longo do flanco leste da cordilheira *Coast Range* (Dickinson, 1981; Ingersoll, 2008). Essa exposição destaca a remobilização eficaz de areias através de 1.200 m de lamitos de baixa permeabilidade para emergir em um antigo ambiente marinho (Vigorito *et al.*, 2008). O PGIC, integrado ao GVG, representa uma sucessão sedimentar depositada entre o Jurássico Superior e o Oligoceno, associada à orogenia Nevadiana (Ingersoll, 1982).

A Formação *Panoche*, com depósitos de leques submarinos de 6,5 km de espessura (Ingersoll, 1979), é sobreposta pela Formação *Moreno*, que registra a transição de um ambiente marinho profundo para uma plataforma (Payne, 1951).

2.1.2 Contexto estratigráfico

Os lamitos e arenitos maastrichtianos à danianos do GVG correspondem à Formação *Moreno*, depositados em um talude continental em uma zona limite da plataforma (Payne, 1951; McGuire, 1988), sendo constituída pelos membros *Dosados*, *Tierra Loma*, *Marca* e *Dos Palos* (Figura 3). O topo da Formação *Moreno* foi erodido por uma inconformidade regional sobreposta pelos lamitos da Formação *Lodo* (Paleoceno tardio-Eoceno Inferior), que consiste em argilitos de cor cinza e siltitos, intercalados por arcóseos turbidíticos submarinos interpretados como depósitos de leque em uma bacia oceânica moderadamente profunda e relacionado a uma bacia de trincheira com paleocorrente predominantemente para NW (Nilsen *et al.*, 1974).

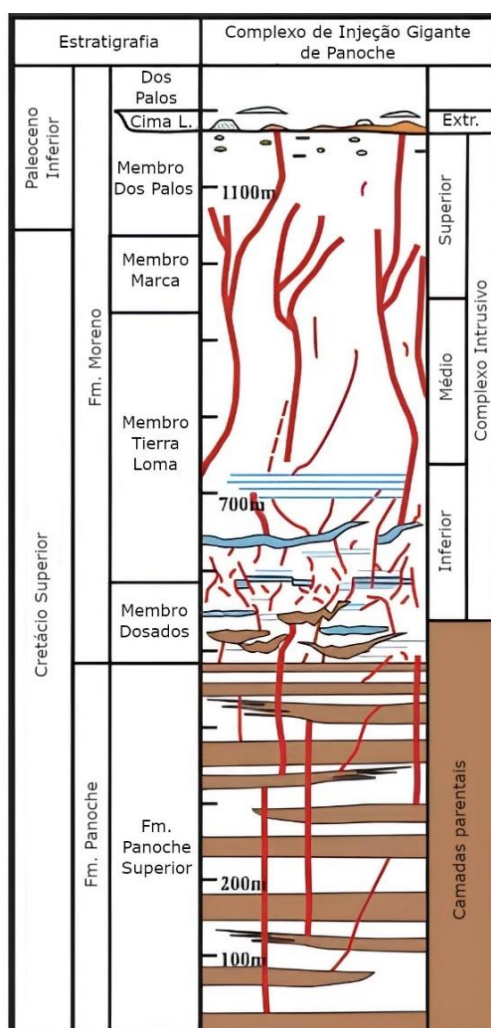


Figura 3: Ilustração esquemática da arquitetura do Complexo de Injeção Gigante *Panoche*. Os valores em metros dizem respeito à profundidade. Modificado de Vigorito *et al.* (2008).

Dentro do Membro *Dos Palos* há a camada *Cima Lentil* em sua estratigrafia, constituída por um arenito siltoso interpretado como produto de extrusão de areia de fundo marinho durante a colocação do PGIC (e.g. Vigorito *et al.*, 2008; Vigorito & Hurst, 2010), embora também se tenha evidências de entrada deposicional (Hurst *et al.*, 2017). Quando o paleofundo oceânico foi rompido por hidrofraturas, múltiplas fraturas ocorreram, sendo preenchidas por areia extrudida no fundo do mar. Posteriormente, as areias se agregaram em fácies de extruditos (Hurst *et al.*, 2006), resultando em bolsões de grande continuidade lateral (Vigorito *et al.*, 2022).

2.1.3 Intrusões clásticas

Intrusão clástica é um termo que engloba todas as intrusões siliciclásticas, independentemente de sua forma, composição, tamanho de grão e modo de formação (Zvirtes *et al.*, 2019). Incluem-se como "injetitos de areia" todos os produtos resultantes dos processos de remobilização de areia de corpos arenosos e sua injeção em estratos encaixantes fraturados, culminando na formação de extruditos (*extrudites, sensu* Hurst *et al.*, 2006).

O conjunto interligado de diques e soleiras de arenito, juntamente com brechas de injeção, é denominado "rede intrusiva". Diques de arenito são fraturas preenchidas por areia que cortam discordantemente as camadas de rochas encaixantes, representando componentes cruciais dos sistemas de complexos de injeção em bacias sedimentares (Hurst *et al.*, 2011). Extruditos, resultado da extrusão de areia alimentada por uma rede subjacente de diques, apresentam-se como vulcões de areia ou camadas mais espessas e grosseiras (Vigorito *et al.*, 2008). Extruditos raramente se preservam e normalmente são associados a geometrias cônicas ou em forma de lençol nos vulcões resultantes, apresentando dimensões típicas de 0,1 a 0,3 m de diâmetro em afloramentos, mas que podem exceder 3 m e se estender lateralmente por centenas de metros em casos em que há a geometria de lençóis de extruditos (e.g. Hurst *et al.*, 2006; Vigorito *et al.*, 2008).

Os complexos de injeção de areia podem constituir alvos para exploração de hidrocarbonetos, fornecendo excelentes unidades de fluxo intra-reservatório que criam comunicação vertical e lateral em todo o campo petrolífero dentro de

unidades de baixa permeabilidade (Hurst & Cartwright, 2007). A rápida migração de fluidos em depósitos de areia também pode causar aumento repentino da pressão dos poros, iniciando a fluidização e injeção da areia (Hurst *et al.*, 2011). A presença de tais estruturas podem indicar que os injetitos têm o potencial de aumentar a taxa de migração e escape de fluidos, melhorando a permeabilidade de intervalos previamente de permeabilidade baixa (Hurst & Cartwright, 2007).

Os complexos de injeção de areia são observados em diversas bacias sedimentares, principalmente em ambientes marinhos clásticos de águas profundas, como na Califórnia (*e.g.* Vigorito *et al.*, 2008; Palladino *et al.*, 2018; Zvirtes *et al.*, 2019) e Groenlândia (*e.g.* Surlyk *et al.*, 2007), e em subsuperfície, especialmente no Mar do Norte, afetando notavelmente sistemas petrolíferos Paleógenos (*e.g.* Hurst & Cartwright, 2007; Huuse *et al.*, 2010; Hurst & Vigorito, 2017). Formam-se durante o soterramento raso, desencadeando fraturamento hidráulico e fluidização, resultando na injeção de areia em sistemas de propagação de fraturas (Hurst *et al.*, 2011).

Em ambientes de águas profundas, onde a natureza isolada dos corpos de areia originais e as litologias selantes favorecem a retenção de fluidos, as intrusões de areia de grande escala, como na Bacia de *San Joaquin* e no Mar do Norte, impactam significativamente a indústria de hidrocarbonetos. Nesses ambientes, as intrusões resultam do fraturamento hidráulico induzido por pressão nos sedimentos, especialmente em canais turbidíticos isolados. A granulometria fina das litologias selantes, como o lamito, permite a retenção de fluidos, gerando aumento da pressão dos poros (Zvirtes *et al.*, 2019). Sob condições supra-litostáticas, ocorre o desequilíbrio de pressão, levando à migração de fluidos de sobrepressão. Esse processo fluidiza e remobiliza areia das unidades fontes, injetando-a em fraturas em expansão. Essas intrusões, formam sistemas interconectados, representando potenciais reservatórios e apresentando desafios durante a exploração de hidrocarbonetos.

2.2 Registro magnético em rochas sedimentares

2.2.1 A aquisição da magnetização em sedimentos

A magnetização remanente de uma rocha resulta da presença de minerais ferromagnéticos. Antes de procedimentos laboratoriais, a remanência na rocha é denominada magnetização remanente natural (*natural remanente magnetization* – NRM) (Lowrie, 2007). Condicionada ao campo geomagnético e à história geológica da rocha, a NRM, que combina diversas componentes magnéticas adquiridas por diferentes meios ao longo do tempo, permite investigar a trajetória, formação e alterações subsequentes da rocha, exigindo a segregação e análise minuciosa de suas distintas componentes (Tauxe, 2008).

A magnetização primária refere-se à remanência adquirida durante a formação da rocha, sendo a principal componente de interesse em estudos paleomagnéticos (Lowrie, 2007). A magnetização secundária é obtida após a formação da rocha, podendo modificar ou sobrepujar a NRM primária, contribuindo para a NRM total (Lowrie, 2007). Os principais mecanismos de aquisição da remanência natural primária incluem: (a) magnetização termorremanente, adquirida durante o processo de resfriamento de alta temperatura; (b) magnetização remanente detrítica ou deposicional, adquirida durante a deposição de um sedimento contendo minerais ferromagnéticos detríticos a temperatura constante (e.g. Butler, 1992; Lowrie, 2007), e; (c) magnetização remanente química, formada pelo crescimento de grãos ferromagnéticos abaixo da temperatura de Curie (Butler, 1992). Esta magnetização, entretanto, também representa uma magnetização secundária, visto que é formada quando os minerais magnéticos de uma rocha sofrem alteração química ou quando novos minerais se formam autigenicamente (Lowrie, 2007).

Em corpos ígneos, os minerais com propriedades magnéticas se originam concomitantemente ao processo de cristalização da rocha, ocorrendo em elevadas temperaturas que ultrapassam o ponto de Curie. Durante o processo de resfriamento do magma e alcançando a temperatura de bloqueio, esses minerais documentam a remanência magnética, alinhada ao campo magnético circundante, em cenários onde não há presença marcante de anisotropia

magnética. Porém, em rochas sedimentares o mecanismo para se adquirir magnetização é distinto.

Os grãos ferromagnéticos detríticos, provenientes da erosão de diversas rochas, já possuem magnetização antes do transporte e deposição nos sedimentos. Essas partículas podem se orientar livremente no campo magnético ambiente antes de serem depositadas. A magnetização total das partículas resulta na magnetização remanente deposicional (DRM - *Depositional Remanent Magnetization*). Modelos de aquisição de DRM abordam o comportamento das partículas durante a queda na coluna d'água, floculação mineral e rolamento no local de deposição (Roberts et al., 2013; Egli & Zhao, 2015) (Figura 4a). Contudo, após a deposição, fatores como bioturbação, compactação e diagênese podem influenciar a magnetização original, gerando uma magnetização remanente pós-deposição (pDRM - *Post-Depositional Remanence*) (Tauxe et al., 2006; Roberts et al., 2013; Egli & Zhao, 2015) (Figura 4b). Estudos recentes (e.g. Roberts et al., 2013), mostram que existe uma terceira componente, gerada pela sintetização de ferro do ambiente, formando magnetita e greigita pelas chamadas bacterias magnetotáticas – magnetização remanente biogeoquímica (*biochemical remanent magnetization* - BRM) (Figura 4c).

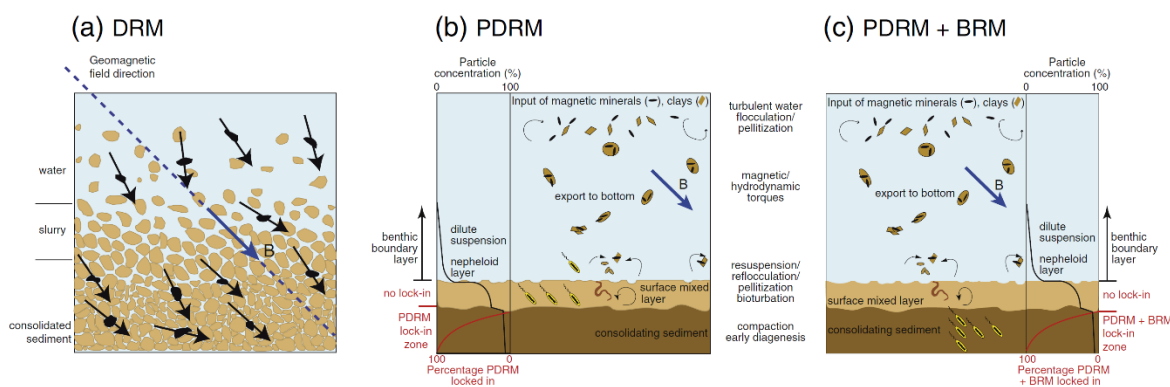


Figura 4: Ilustração esquemática da aquisição de remanência sedimentar através de (a) magnetização remanente deposicional (DRM), (b) magnetização remanente pós-deposicional (pDRM) e (c) uma pDRM juntamente com uma magnetização remanente biogeoquímica (BRM). Modificado de Roberts et al. (2013).

2.2.2 Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM)

A anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) é uma técnica geofísica indireta aplicável a diversas rochas, permitindo estudos de petrografia e geologia estrutural com eficiência (e.g. Jackson, 1991; Rochette *et al.*, 1992; Tarling & Hrouda, 1993). Essa propriedade física baseia-se na orientação preferencial dos minerais magnéticos anisotrópicos, refletindo a trama magnética da rocha. Controlada pelas direções e sistema cristalográfico dos minerais em escala granulométrica, a ASM utiliza os eixos cristalográficos, visto que estes geralmente ditam a configuração dos grãos (Tarling & Hrouda, 1993).

A ASM normalmente está relacionada à variação direcional da magnetização induzida (e.g. Franco, 2007; Jensen & Elming, 2012). Ela foi primeiramente descrita por Ising (1942), que observou um aumento na suscetibilidade em argilas várnicas quando as medições eram feitas ao longo da estratificação, em vez de perpendicularmente a ela (Hrouda, 1982). A ASM pode ser expressa matematicamente pela Equação 1:

$$M = KH \quad (1)$$

Onde, M= Magnetização Induzida, H= Campo Indutor Aplicado, K= Suscetibilidade Magnética do material, em unidades do Sistema Internacional (SI). O tensor magnético (K) representa a orientação das partículas magnéticas nas amostras e é definido, em orientação e em magnitude, pelos eixos $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ (Tarling & Hrouda, 1993). A magnetização induzida em uma rocha por um campo magnético fraco é uma função linear da intensidade do campo (Equação 2):

$$\begin{aligned} M_1 &= K_{11}H_1 + K_{12}H_2 + K_{13}H_3 \\ M_2 &= K_{21}H_1 + K_{22}H_2 + K_{23}H_3 \\ M_3 &= K_{31}H_1 + K_{32}H_2 + K_{33}H_3 \end{aligned} \quad (2)$$

Onde, M_i ($i= 1, 2, 3$)= componentes do vetor magnetização e H_j ($j= 1, 2, 3$)= componentes do vetor intensidade do campo magnético. O conjunto dos componentes do tensor simétrico de segunda ordem, conhecido como tensor de

suscetibilidade, é composto pelos valores localizados na diagonal principal dessa matriz (K_{ij} , onde $i = j$), conforme Equação 3:

$$\begin{aligned} M_1 &= K_{11}H_1 \\ M_2 &= K_{22}H_2 \\ M_3 &= K_{33}H_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Os eixos do elipsoide do tensor de ASM são representados por $K_{11}=K_{\max}$ (suscetibilidade máxima), $K_{22}=K_{\text{int}}$ (suscetibilidade intermediária) e $K_{33}=K_{\min}$ (suscetibilidade mínima) (Figura 5). A depender das amplitudes dos eixos, o elipsoide pode apresentar diferentes formas, podendo ser mais prolato ($K_{\max}>K_{\text{int}}$) ou oblato ($K_{\max}=K_{\text{int}}>K_{\min}$).

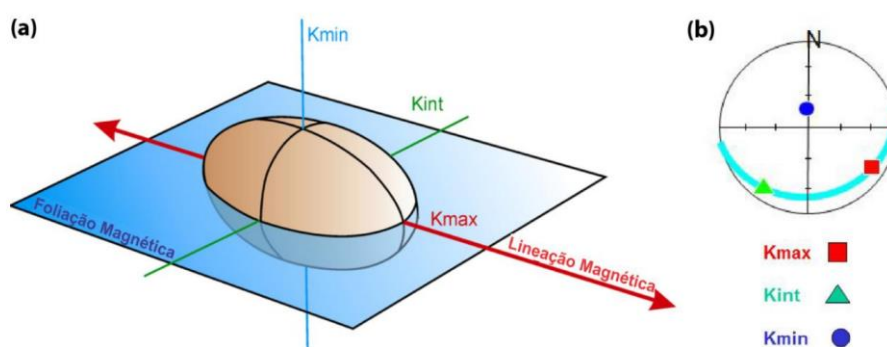


Figura 5: Representação tridimensional do elipsoide magnético e seus respectivos eixos de suscetibilidade magnética plotados em estereograma. Modificado de Hrouda (2014).

A ASM reflete, em alguns casos, a orientação preferencial dos minerais contidos nas rochas, podendo em rochas ígneas demonstrar a orientação do fluxo de magma, aferir a largura e o tipo de deformação plástica no caso da presença de dobramentos nas rochas que formam o local estudado (Tarling & Hrouda, 1993). Em rochas sedimentares, a AMS é capaz de indicar a direção no qual o corpo aquoso transportava os sedimentos e a inclinação do plano de estratificação (e.g. Jeleńska & Kadziako-Hofmokl, 1990; Jensen & Elming, 2012).

O formato do elipsoide em uma formação rochosa está associado ao processo de deposição, possibilitando a aplicação de modelos físicos para determinar o regime deposicional. Conforme descrito por Tarling & Hrouda (1993), em correntes com velocidade inferior a 1 cm/s, os grãos prolatos se

alinham paralelamente à direção de transporte. Em correntes rápidas (velocidade > 1 cm/s), há um aumento do ângulo de inclinação, resultando no posicionamento dos grãos oblatos a 5° a 20° em relação ao plano de deposição. Em áreas inclinadas, tanto os grãos prolatos quanto os oblatos se alinham em torno da direção do fluxo e da inclinação.

2.2.3 Magnetoestratigrafia

A magnetoestratigrafia é uma técnica cronoestratigráfica que permite analisar a variação dos parâmetros magnéticos em rochas de uma unidade estratigráfica, classificando os intervalos com comportamentos magnéticos semelhantes. Existem dois tipos principais: direcional (baseada em características como a direção da magnetização remanente característica, que é a direção do eixo máximo do tensor de anisotropia de suscetibilidade magnética) e não direcional (usando a suscetibilidade magnética). A magnetização remanente primária, que registra o campo geomagnético durante a formação da rocha, é frequentemente empregada. Essa propriedade permite estimar a polaridade do campo magnético em normal (quando a posição do norte magnético está no hemisfério setentrional) ou reversa (posição do norte magnético está no hemisfério austral).

O campo geomagnético passou por múltiplas inversões não periódicas ao longo da história da Terra, gerando uma zonação magnética que pode ser observada em rochas sedimentares. As zonações magnetoestratigráficas permitem localizar temporalmente os registros estratigráficos, devido a identificação de magnetozonas, fornecendo *crons* geomagnéticos equivalentes à idade. Esta ferramenta já foi aplicada na área de óleo e gás com sucesso (e.g. Hauger & Van Veen, 1995; Turner & Bryant, 1995; Hailwood *et al.*, 2010), auxiliando na compreensão dos processos sedimentares que levam à deposição das sequências sedimentares, complementando informações obtidas pela bioestratigrafia, por exemplo. A correlação de um intervalo magnético com a escala temporal de polaridade geomagnética (GPTS) define a estrutura cronoestratigráfica da unidade estudada.

As inversões de polaridade, em contraste com as divisões litoestratigráficas e bioestratigráficas, são registradas simultaneamente e

globalmente nas rochas. Esse padrão magnetoestratigráfico, inicialmente proposto por Khramov (1958), fornece um código de barras global exclusivo para correlacionar essas inversões em estratos rochosos. Dessa maneira, a magnetoestratigrafia possibilita a correlação de estratos entre diversos contextos deposicionais, permitindo a atribuição de idades geológicas a anomalias de intensidades magnéticas.

A comissão da União Internacional de Ciências Geológicas IUGS formalizou termos para a estratigrafia da polaridade magnética, englobando a magnetoestratigrafia e sua classificação. Unidades magnetoestratigráficas constituem-se em conjuntos de corpos sedimentares com características magnéticas similares. A classificação de polaridade magnetoestratigráfica fundamenta-se na alteração da orientação da remanência magnética. Horizontes de reversão de polaridade magnética representam regiões onde o campo geomagnético foi registrado durante mudanças na polaridade. Unidades de polaridade magnetoestratigráfica são estratos rochosos distintos pela característica de polaridade magnética original. Magnetozonas, fundamentais na magnetoestratigrafia, ao interagirem com horizontes de reversão ou zonas de transição, têm sua hierarquia determinada por características específicas associadas à sua duração (Opdyke & Channell, 1996).

Apesar da intensidade magnética geralmente ser menor em rochas sedimentares, seu registro magnético é vantajoso devido sua continuidade, contrastando com rochas ígneas e metamórficas que registram momentos instantâneos. Sequências sedimentares, embora nem sempre uniformes, são mais facilmente encontradas cobrindo determinados intervalos de tempo do que sequências ígneas. A resolução temporal em sequências depende da taxa de sedimentação e efeitos pós-deposicionais, permitindo alta precisão. De tal modo, sedimentos e rochas sedimentares são cruciais para estudar variações do campo geomagnético e paleoambientais, mas a confiabilidade depende da fidelidade dos sedimentos como gravadores magnéticos e do impacto dos processos pós-deposicionais.

Dinarès-Turell *et al.* (2014) construiu uma escala de tempo astronômica para o Paleoceno, utilizando registros de águas profundas, identificando correlações robustas entre eventos biológicos e isotópicos que fornecem uma base para interpretações paleoclimáticas. Tais informações são relevantes para

a elaboração de um modelo de idade mais confiável, visto que o ideal é que sejam integradas informações de magnetoestratigrafia, bioestratigrafia e de análises geoquímicas, possibilitando de tal modo realizar uma relação precisa com a escala de tempo de polaridade geomagnética (GPTS). Ogg (2020) calibrou a GPTS para os últimos 160 Ma, correspondente ao período do estudo, ajustando os modelos de idade no CTS2020.

2.2.4 Mineralogia Magnética

A identificação de minerais magnéticos fundamenta-se em fatores como a análise dos distintos valores de coercividade, a temperatura de bloqueio dos minerais, a suscetibilidade magnética, que costumam estar vinculados ao ambiente deposicional e à área fonte. A mineralogia magnética, de importância nos estudos de ASM, determina a suscetibilidade magnética e as anisotropias derivadas da orientação média da forma dos grãos ou da estrutura cristalina (Tarling & Hrouda, 1993).

Em minerais ferromagnéticos, como a magnetita, a anisotropia de forma pode prevalecer; nos paramagnéticos, como biotita e anfibólio, a anisotropia depende da distribuição dos íons de Fe, sendo determinada pela rede cristalina. Minerais como quartzo e feldspatos (diamagnéticos) exibem suscetibilidades reduzidas; filossilicatos e anfibólios (paramagnéticos), moderadamente positivas. Minerais ferromagnéticos traços, como magnetita, hematita e pirrotita, apresentam suscetibilidade magnética elevada, retendo magnetização durante a formação. A suscetibilidade total representa o somatório ponderado das contribuições de todas as espécies minerais, considerando abundâncias relativas e suscetibilidades.

O estudo da mineralogia magnética engloba a caracterização das fases minerais magnéticas por meio de técnicas como e curvas termomagnéticas, curvas de histerese e magnetização remanente isotermal (MRI).

As curvas termomagnéticas, que envolvem a leitura da suscetibilidade (K) da amostra em relação às mudanças de temperatura, fornece informações valiosas sobre os minerais magnéticos presentes em dado material (Thompson & Oldfield, 1986). Curvas de alta temperatura destacam as transições essenciais, como as temperaturas de Curie e Néel, respectivamente, da

magnetita e hematita. Em temperaturas mais baixas, observa-se transições de fase, como a transição de Morin e de Verwey, em alguns minerais.

Cada mineral magnético possui uma temperatura específica em que os momentos magnéticos se desorientam, resultando em uma queda abrupta da suscetibilidade. Por exemplo, na magnetita, essa transição ocorre em torno de 580°C, denominada temperatura de Curie, enquanto na hematita ocorre a cerca de 680°C. Em rochas ricas em minerais paramagnéticos, variações significativas na suscetibilidade são geralmente ausentes, a menos que haja cristalização de um mineral ferromagnético durante o aquecimento, como a neoformação de magnetita a partir da biotita, conforme observado por Trindade *et al.* (2001). Esses padrões únicos permitem a identificação do principal mineral portador do magnetismo na rocha.

Quando um campo indutor superior à energia anisotrópica total é aplicado na direção oposta à magnetização do material ferromagnético, os momentos magnéticos superam a barreira energética, permanecendo alinhados mesmo após a remoção do campo (Tauxe, 2005). Esse campo é denominado *flipping field*, comum em materiais ferromagnéticos e essencial para compreender seu comportamento. O ciclo de histerese magnética implica submeter a amostra a um campo magnético cíclico (B) e registrar simultaneamente seu momento magnético total (Tauxe, 2005). Iniciando com determinado campo ($B = 0$) e uma assembleia de grãos aleatórios, à medida que o campo aumenta, as energias das paredes de domínio são superadas, promovendo o crescimento de novos domínios. Conforme o campo indutor aumenta, os domínios rotacionam na direção do campo, resultando em um aumento inicial da magnetização. Quando poucos ou nenhum domínio oposto a (B) está presente, a curva de magnetização torna-se mais retilínea, indicando a magnetização de saturação (M_s) (Lanza & Meloni, 2006). Esse é o início do ciclo de histerese magnética, seguido pela redução do campo (B) e registro simultâneo do momento magnético.

Materiais ferromagnéticos, após atingirem a magnetização de saturação (M_s) e reduzirem o campo ($B = 0$), mantêm a magnetização remanente de saturação (M_{rs}) (Figura 6). Ao aplicar um campo oposto, alcança-se a força coerciva (B_c) (Lowrie, 2007), anulando a magnetização remanente. A força coerciva indica a magnitude necessária para zerar a magnetização remanente (Bertotti, 1998). Se o campo oposto for mais intenso, ocorre a magnetização de

saturação, formando o ciclo de histerese. Uma coercividade de remanência específica (B_{cr}) cancela a magnetização remanente de saturação para um determinado valor do campo contrário (B).

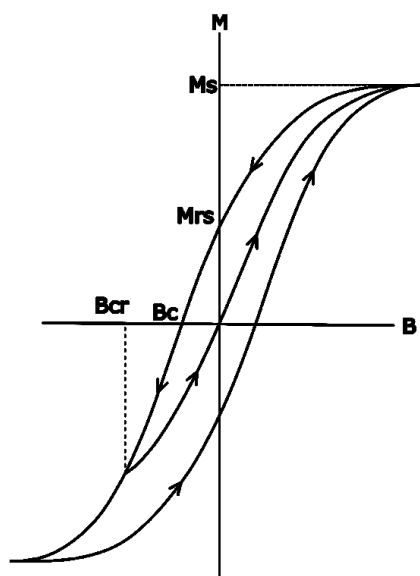


Figura 6: Ciclo de histerese de um material ferromagnético. Modificado de Lowrie, 2007.

Os padrões e parâmetros derivados das curvas possibilitam a identificação dos minerais magnéticos responsáveis pela suscetibilidade magnética do material. Em casos em que as amostras contêm magnetitas e/ou titanomagnetitas, a interpretação dos dados pode ser realizada por meio do diagrama de Day (Day *et al.*, 1977). Esse diagrama caracteriza as estruturas de domínio (em Domínio Simples (*Single Domain* - SD), Pseudo-Domínio Simples (*Pseudo-single Domain* - PSD) e Multi-Domínio (*Multidomain* - MD) do material com base nos parâmetros M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c . Esse tipo de diagrama permite compreender as estruturas de domínio dos minerais. Os grãos com comportamento de magnetização estável (SD) são muito diminutos e possuem uma magnetização resistente à alteração, exigindo uma grande quantidade de energia para mudar sua orientação magnética. Os grãos com comportamento de transição (PSD), que ocorrem entre os pequenos grãos SD e os maiores MD contêm um número reduzido de domínios magnéticos, porém podem apresentar um momento magnético significativo. Os grãos de maior tamanho (MD) possuem dois ou mais domínios magnéticos e se subdividem internamente em domínios para minimizar a energia magnetoestática.

A aquisição das curvas de magnetização remanente isotermal (MRI) ocorre semelhantemente às curvas de histerese. Ela é obtida ao aplicar um campo direto sobre a amostra, removendo-o imediatamente, normalmente com a temperatura ambiente constante (Özdemir & Dunlop, 1997). O campo magnético induzido nas amostras é progressivamente maior, até a saturação. A intensidade da MRI varia conforme o campo aplicado, indicando o alinhamento dos momentos magnéticos dos grãos e dependendo da coercividade dos minerais. A SIRM (*Saturation Isothermal Remanent Magnetization*) representa a magnetização remanente isotermal de saturação, oferecendo informações sobre a assembleia mineral e o estado de domínios.

As curvas de MRI refletem a capacidade de aquisição da magnetização remanescente dos minerais. Minerais ferromagnéticos tendem a se alinhar até a saturação, enquanto minerais paramagnéticos não registram saturação com o aumento dos campos indutores. A técnica permite caracterizar a coercividade (H_c) do material, relacionando minerais com alta H_c a magnetização de saturação próxima a 800 nT (Hematita) e minerais com baixa H_c a M_s próxima a 300 nT, como a magnetita (Özdemir & Dunlop, 1997).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, encontram-se os métodos utilizados durante a execução do projeto, que fez uso de medições paleomagnéticas em rochas sedimentares da Bacia de *San Joaquin*, na Califórnia (EUA). Foram empregados procedimentos e equipamentos especializados para garantir a precisão e a confiabilidade das medições, através de uma abordagem sistemática desde a coleta das amostras, suas devidas preparações e análises e posterior processamento dos dados em ambiente digital.

3.1 Revisão bibliográfica

A etapa inicial do projeto consistiu em uma revisão bibliográfica que progrediu de assuntos que serviram de embasamento para a pesquisa, como a geologia regional da área estudada e a compreensão física e matemática por trás das técnicas analíticas utilizadas, até temas mais aplicados relacionados ao trabalho, como pesquisas que aplicaram as mesmas análises em locais semelhantes.

A compilação de informações existentes a respeito da área de estudo foi muito relevante para compreender a formação das rochas e quais técnicas paleomagnéticas poderiam ser de fato aplicadas. De tal modo, com base na literatura, foram estabelecidas as bases teóricas para o desenvolvimento, permitindo a familiarização com as pesquisas atualmente realizadas dentro da área do paleomagnetismo aplicado a rochas sedimentares.

3.2 Coleta dos cilindros

O trabalho de campo foi realizado pelos orientadores Jairo Francisco Savian, Ruy Paulo Phillipp e pelo supervisor Gustavo Zvirtes, no intervalo de 11 a 20 de outubro de 2022 na Califórnia (EUA). A coleta das amostras foi feita através do uso de uma perfuratriz portátil da marca *MAKITA*, que funciona com bateria e movimentada brocas cilíndricas ocas não magnéticas de ponteira diamantada, que apresentam 1” de diâmetro e 20 centímetros de comprimento.

Seu uso é feito junto de bombas manuais contendo água e óleo solúvel biodegradável, que diminuem a temperatura e o atrito com a rocha, permitindo assim que 59 cilindros fossem coletados, que foram separados em 37 sítios.

As amostras coletadas correspondem à porção superior da Formação *Moreno*, como indicado na Figura 7. O afloramento se encontra nas coordenadas geográficas de latitude $36^{\circ}43'19,02''$ N e longitude $120^{\circ}43'21,06''$ O. Ao serem coletadas, era realizado o procedimento de identificação e orientação das amostras, realizado por um orientador com uma bússola magnética do modelo *Brunton* acoplada ao topo do mesmo. As marcações foram feitas com uso de canetas permanentes azuis e pretas, que não possuem partículas magnéticas e o número correspondente ao cilindro foi anotado diretamente na amostra.

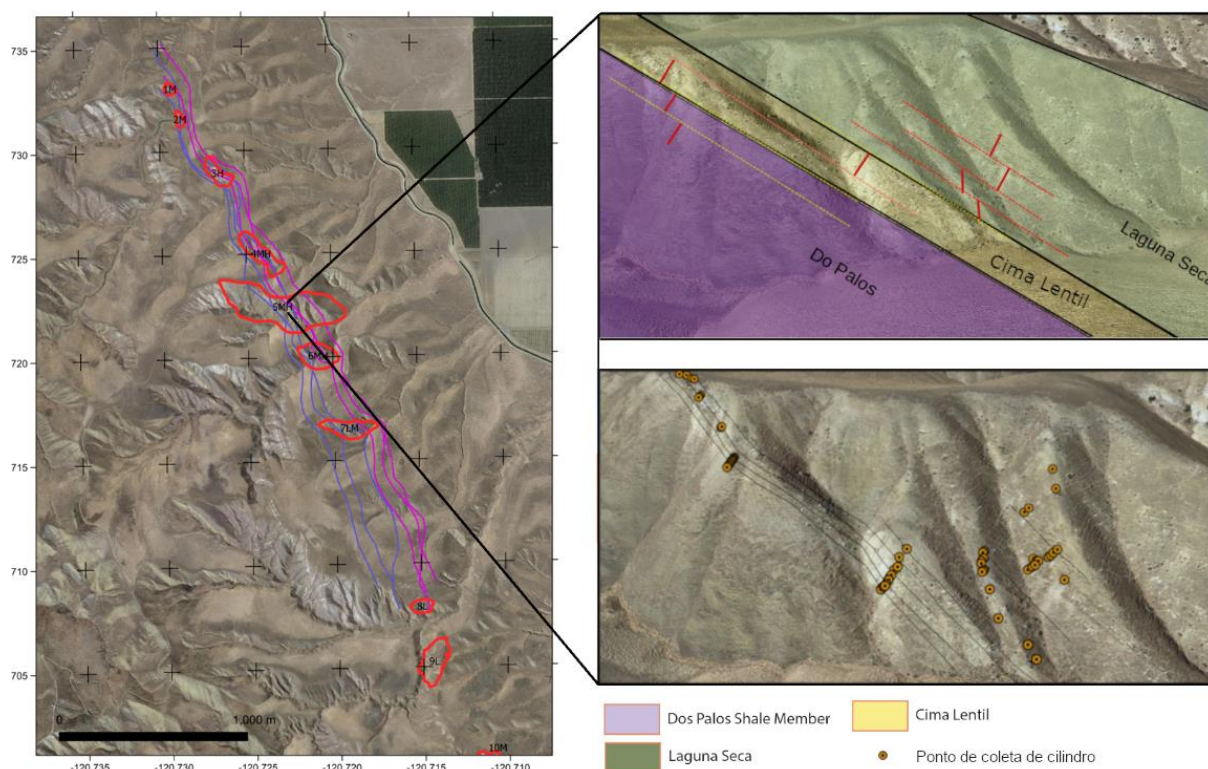


Figura 7: Imagem de satélite obtida através do Google Earth da área de estudo com os pontos de coleta dos cilindros e as divisões dos membros encontrados na região.

Medições de ângulo de inclinação de cada cilindro foram anotadas durante a coleta, bem como medidas de basculamento de cada camada em que houve a coleta de cilindro. Essas medidas são relevantes para que posteriormente possam ser realizadas as correções necessárias nos dados

obtidos em laboratório. Os dados coletados estão disponíveis no Apêndice A. O local de estudo é conhecido popularmente como “*Bob Cat Canyon*”, nas colinas de *Panoche* e suas camadas se apresentam basculadas com atitude média de 30/040. Na Figura 8, pode-se observar uma visão mais abrangente do local e exemplos de pontos de coleta com as principais litologias observadas.

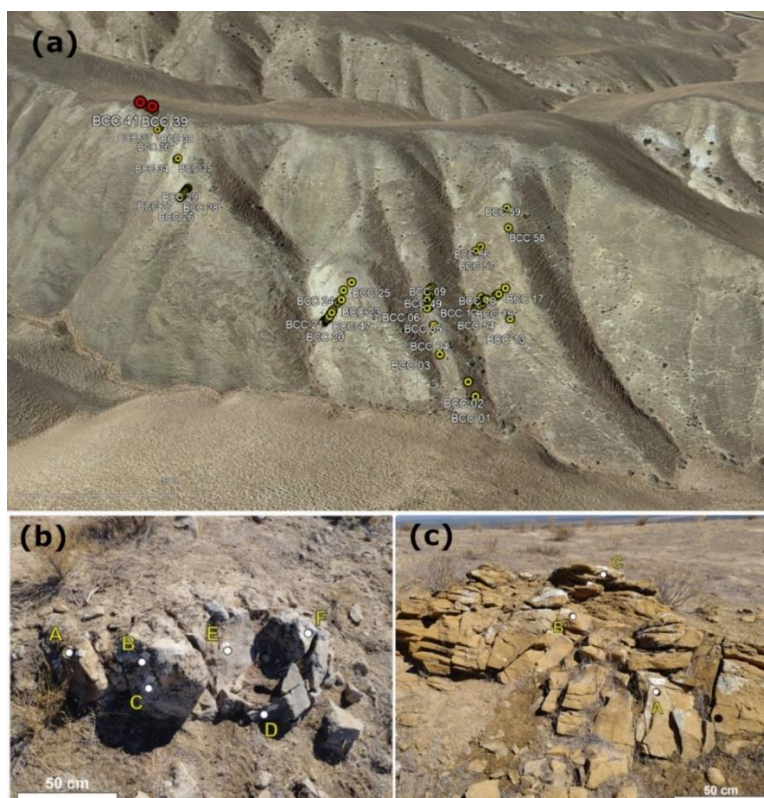


Figura 8: (a) Local de coleta dos cilindros no *Bob Cat Canyon*, com cilindros BCC039 e BCC041 destacados em vermelho, (b) Ponto de coleta do Sítio 35, com lamito e (c) Ponto de coleta do Sítio 33, com arenitos.

A correlação estratigráfica do afloramento em que os cilindros foram coletados se apresenta conforme apresentado na Figura 9, com intercalações sucessivas de lamitos (grãos em tamanho argila, marrom acinzentados, com laminações plano paralelas) e arenitos (grãos de tamanho areia fina a média, cinza amarelados, com estratificações cruzadas de baixo ângulo), que nem sempre ocorrem com grande continuidade lateral. A seção foi separada em dois *logs* (registros) principais e subdividida em folhas conforme foram realizadas as coletas dos cilindros, que estão marcados com círculos laranjas. O levantamento foi realizado em escala 1:50. Imagens em maior detalhe de cada folha podem ser observadas no Apêndice B.

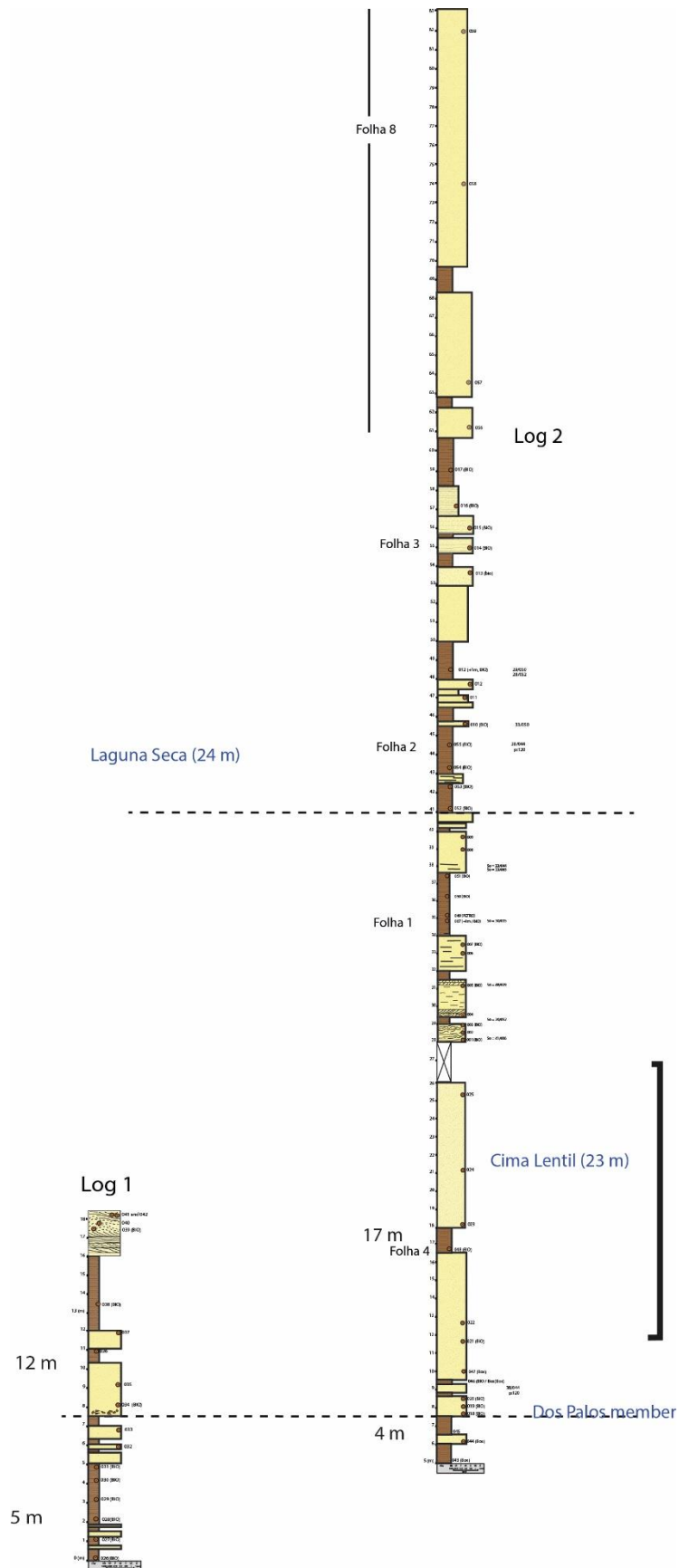


Figura 9: Correlação estratigráfica do local em que foram realizadas coletas de cilindros.

No local em que foram coletados os cilindros correspondentes ao Sítio 34 (Figura 10), cujas amostras de arenitos foram nomeadas de BCC040, encontram-se em um afloramento com estrutura correspondente a um extrudido de areia, conforme avaliação realizada em campo (Vigoritto *et al.* 2022). Os cilindros foram coletados em diferentes pontos, visando um possível paleofluxo do vulcão de areia refletido nos dados de ASM. Um dos cilindros, o BCC040L, foi coletado próximo ao afloramento, a cerca de 1,5 m de distância, para que assim fosse possível compará-lo com os demais.

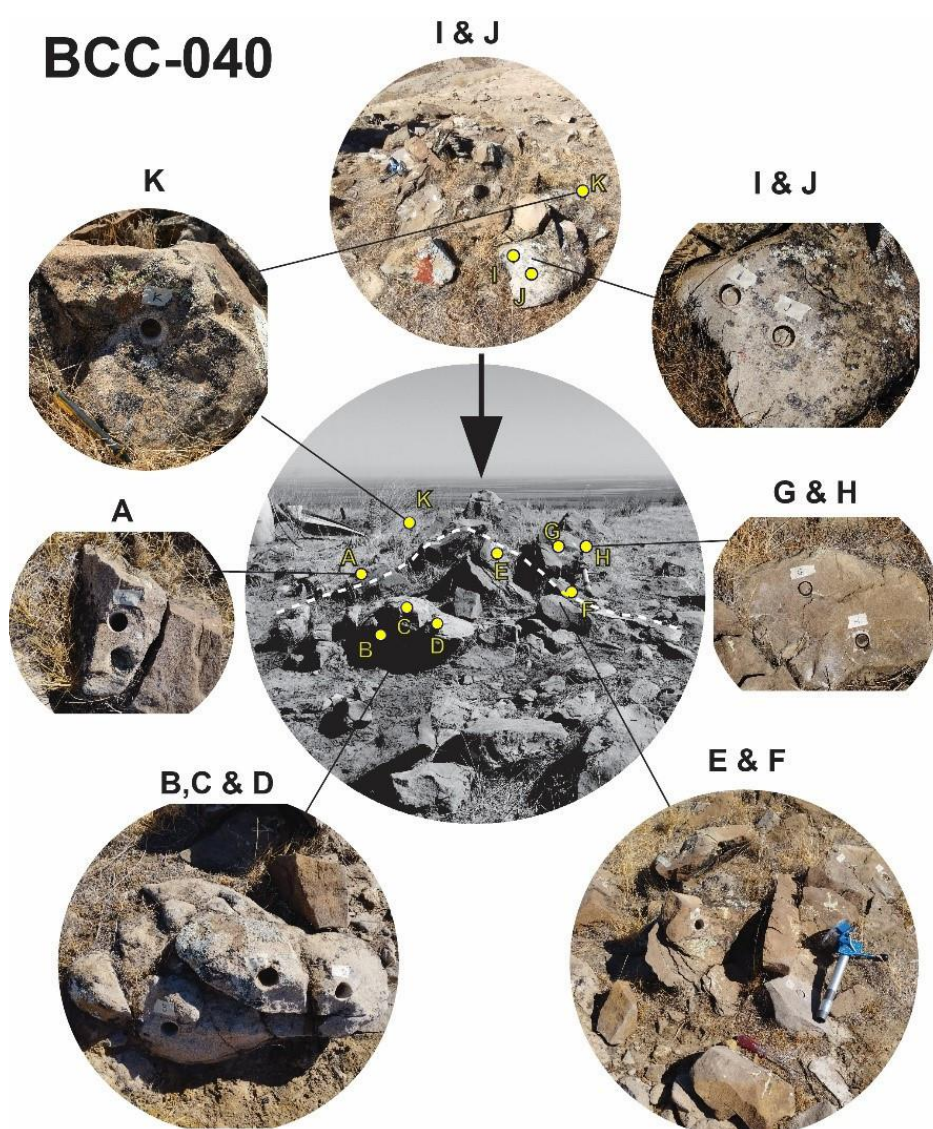


Figura 10: Local de coleta das amostras do grupo BCC040.

3.3 Preparação de espécimes padrões

Os cilindros coletados precisaram ser preparados para que as análises pudessem ser realizadas e, para isso, utilizou-se o Núcleo de Preparação de Amostras (CPGq) do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no qual há uma serra de disco duplo da marca Person Bouquet, modelo OF. 046280 (Figura 11a). Essa serra possui um ajuste específico para o corte que é necessário para este tipo de análise, possibilitando que se obtenha espécimes padrões com 2,2 centímetros de diâmetro e 2,1 centímetros de altura. Devido à algumas irregularidades na base ou no topo de determinados espécimes, tornava-se necessário realizar também um desgaste feito em uma serra de disco simples, construída pelo Instituto de Física da UFRGS, também pertencente ao CPGq (Figura 11b).



Figura 11: Serras utilizadas na preparação das amostras, sendo (a) serra de disco duplo Person Bouquet e (b) serra de corte.

Quando necessário, foi utilizado cola *bonder* para evitar que fraturas ocasionassem a quebra das amostras, visto que a estrutura precisa ser mantida como a presente *in situ* e marcações com caneta permanente azul foram feitas em cada uma, registrando sua orientação e identificação. As amostras foram renomeadas com o número do cilindro original e uma letra correspondente à sua

posição, sendo “A” uma posição mais próxima à base, seguindo o alfabeto conforme se aproximar mais à porção do topo. Em alguns casos, tornou-se necessário acrescentar, ainda, um número seguido da letra, em ordem crescente da base para o topo.

Cada uma das amostras foi embalada com filme de PVC, que protege a amostra de contaminações externas e evita a perda de pequenos grãos dos sedimentos que podem vir a se soltar. De tal modo, os 59 cilindros originaram 198 espécimes padrões, que foram pesados individualmente em uma balança de precisão conforme detalhado na Tabela 1. A separação das amostras em espécimes cilíndricos e cúbicos é de extrema importância, uma vez que possibilita a realização das análises paleomagnéticas nos equipamentos com alta precisão, garantindo a confiabilidade e a consistência dos resultados do estudo.

Tabela 1: Relação de amostras utilizadas no estudo e seus respectivos pesos.

Espécimes e pesos (g)											
001 A	17,398	013 A	22,142	024 C	11,214	037 A	11,688	041 C2	17,956	052 A	11,017
001 B	12,341	013 B1	12,459	025 A	15,867	037 B	13,582	042 A1	25,681	052 B	16,438
001 C	18,338	013 B2	18,964	025 B	13,788	038 A	11,513	042 A2	24,15	052 C	16,3
002 A	10,556	013 C	15,563	025 C	15,265	038 B	11,482	042 A3	22,95	053 A	16,48
002 B	10,352	014 A	19,003	026 A	9,052	038 C	11,672	042 B1	24,533	053 B	17,542
002 C	10,7	014 B	14,17	026 B	11,371	039 A	19,534	042 B2	22,423	053 C	14,525
003 A	13,525	014 C	18,53	027 A	12,274	039 B	18,211	042 B3	24,866	054 A	13,028
003 B	13,338	015 A	10,82	027 B	10,929	039 C	22,841	042 C1	21,06	054 B1	15,866
003 C	10,701	015 B	12,54	028 A	12,438	039 D	25,811	042 C2	22,489	054 B2	12,682
004 A	18,35	015 C	11,615	028 B	11,585	039 E	25,13	042 C3	20,926	055 A	13,872
004 B	18,648	016 A	14,084	029 A	8,68	039 F	20,425	043 A	13,768	055 B	11,697
004 C	23,624	016 B	17,679	029 A	8,048	039 G	16,152	043 A	12,466	056 A	13,851
005 A	14,828	017 A	17,445	029 B	9,155	040 A1	24,214	043 B	12,171	056 A	12,758
005 B	14,735	017 B	18,366	030 A	10,279	040 A2	20,751	044 A	13,173	056 B	14,071
005 C	17,908	017 C	18,517	030 A	10,766	040 B1	22,88	044 A	12,479	057 A	13,425
006 A	12,048	018 A	22,824	030 B	12,616	040 B2	22,211	044 B	12,055	057 A	12,614
006 B	24,75	018 B	23,988	031 A	11,816	040 C	19,932	045 A	12,923	057 B	15,239
006 C	22,292	018 C	16,568	031 A	11,229	040 D1	23,268	045 B	16,326	058 A	22,277
007 A	20,38	019 A	20,48	031 B	12,052	040 D2	21,156	046 A	11,861	058 B	21,35
007 B	20,811	019 B	17,072	032 A	11,203	040 E1	19,14	046 A	10,85	058 C	23,614
007 C	20,245	019 C	16,775	032 B	12,313	040 E2	24,345	046 B	12,105	059 A	15,474
008 A	15,878	020 A	14,126	033 A	12,674	040 F1	23,307	047 A	13,751	059 B	22,154
008 B	10,776	020 B	14,345	033 B	14,136	040 F2	25,096	047 A	12,38	059 C	20,207
009 A	18,747	021 A	9,822	034 A1	15,935	040 G1	23,54	047 B	12,961		
009 B	18,395	021 B	9,835	034 A2	21,966	040 G2	16,998	048 A	15,822		
009 C	24,338	021 C	12,666	034 B1	19,052	040 H	25,185	048 B	15,764		
010 A	15,636	022 A	22,304	034 B2	19,243	040 I	21,974	049 A	15,26		
010 B	14,774	022 B	22,215	034 C	19,311	040 J	23,672	049 B	17,079		
010 C	22,922	022 C	23,202	035 A1	18,832	040 K	22,008	049 C	16,792		
011 A	21,555	023 A1	18,229	035 A2	14,324	040 L	17,027	050 A	14,907		
011 B	17,193	023 A2	20,342	035 B	20,477	041 A1	14,528	050 B	15,516		
011 C	21,22	023 B	22,16	035 C1	20,741	041 A2	16,389	050 C	16,448		
012 A	15,942	023 C	20,701	035 C2	13,795	041 B1	19,816	051 A	16,156		
012 B	14,697	024 A	20,551	036 A	12,045	041 B2	20,123	051 B	16,831		
012 C	12,305	024 B	15,488	036 B	13,212	041 C1	18,988	051 C	16,024		

3.4 Métodos utilizados

As técnicas paleomagnéticas aplicadas neste trabalho foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo e Magnetismo de Rochas (USPMag) do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), no período entre 24 de maio a 07 de junho de 2023, onde foi possível realizar treinamento adequado para utilizar os equipamentos.

3.4.1 Análise de Anisotropia de Suscetibilidade Magnética

A Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM) compreende a variabilidade direcional em magnetização, estimando a capacidade de determinado material em reagir a um campo magnético. Em rochas, este parâmetro está relacionado ao tamanho de cristais ou grãos, às características estruturais (que possam modificar a estrutura das redes cristalinas) e, principalmente, à sua mineralogia, pois as propriedades magnéticas estão atreladas à distribuição dos átomos de elementos com momentos magnéticos permanentes.

A aquisição dos dados foi feita através do Suscetibilímetro *Kappabridge* da marca *AG/CO Ltd.*, de modelo MFK1-FA (Figura 12), no qual o processo se baseia na leitura dos vetores (nos eixos x, y e z) e na anisotropia total de cada espécime, para que assim seja possível determinar sua trama magnética. As configurações utilizadas no equipamento durante as medições foram de campo magnético de 200 A/m, com frequência de 976 Hz e temperatura ambiente. A operação é feita em cada um dos espécimes de maneira individual, realizando ajustes de posição da amostra no *holder* conforme o eixo a ser analisado. Durante a obtenção do dado, o sistema rotaciona o espécime analisando-o para cada eixo e, por fim, fornece a leitura da anisotropia total.

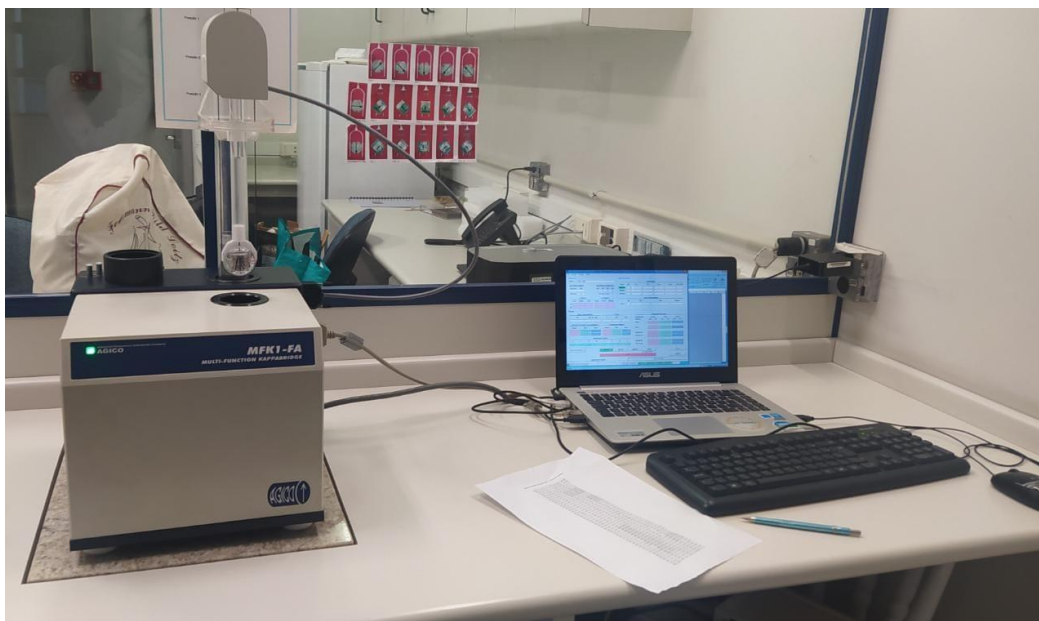


Figura 12: Suscetibilímetro Kappabridge modelo MFK1-FA da AGICO Ltd.

A compreensão dos dados obtidos através da ASM é semelhante à análise estrutural. O tensor magnético obtido na análise auxilia na determinação da foliação (cujo polo é marcado pelo eixo K_3) e da lineação (marcada pelo eixo K_1) magnéticas, características que podem contribuir para a identificação da paleocorrente, das fontes emissoras e dos regimes de fluxo. Ainda, pode-se obter informações relevantes por meio do parâmetro de forma (T), que classifica as amostras em oblatas, prolatas e triaxiais, e analisar o grau de anisotropia (P), que indica a diferença de proporção entre os eixos principais.

3.4.2 Desmagnetização de Campos Alternados (AF)

As medições paleomagnéticas de Desmagnetização de Campos Alternados (*Alternating Field* - AF) foram realizadas no Magnetômetro de rochas *SQUID Long Core* da marca *2G Enterprises*, no modelo 755R (Figura 13), que se encontra na sala magneticamente blindada do USPMag.



Figura 13: Magnetômetro SQUID Long Core 755 R da 2G Enterprises.

A técnica de desmagnetização AF considera que grãos com baixo tempo de relaxação tendem a perder a magnetização primária e preservar a secundária, além de possuírem baixa coercividade. As ondas ocasionadas por esse tipo de campo são senóides que apresentam decaimento linear ao longo do tempo.

O criogênico de esteira *Long Core* 2G apresenta elevada sensibilidade, podendo ser utilizado para efetuar processos de medidas para até oito espécimes por vez com sensibilidade de até 10^{-11} A/m. Para realizar a análise, foi organizado um protocolo visando a exposição dos espécimes a campos magnéticos alternados sucessivamente crescentes ao longo dos três eixos ortogonais de cada amostra, orientando os grãos ao campo aplicado até decrescer à zero, com o qual foram seguidos os seguintes passos: 0 mT, 5 mT, 10 mT, 15 mT, 20 mT, 25 mT, 30 mT, 35 mT, 40 mT, 45 mT, 50 mT, 55 mT, 60 mT, 70 mT, 80 mT, 90 mT, 100 mT. A NRM é medida no primeiro passo, quando o campo aplicado é de 0 mT.

3.4.3 Mineralogia Magnética

A caracterização dos minerais portadores das magnetizações em diamagnéticos, paramagnéticos ou ferromagnéticos é muito importante para se compreender suas propriedades magnéticas e a estabilidade das componentes

da magnetização remanente, bem como o comportamento das direções dos eixos magnéticos dos elipsoides magnéticos.

Apenas alguns espécimes foram selecionados para a realização das análises mineralógicas. Foram selecionadas 70 amostras, sendo 59 representantes de cada um dos cilindros e 11 de amostras com baixo sinal magnético, buscando otimizar os dados. Para a realização das análises uma preparação foi necessária, na qual material foi retirado da porção basal de cada espécime, moído com uso de almofariz de quartzo. Acondicionou-se os sedimentos em cápsulas de gel e sua massa foi medida em uma balança de precisão.

Para a aquisição de curvas termomagnéticas, foram selecionados nove exemplares representativos de diferentes posições na seção estratigráfica. As amostras foram preparadas utilizando porções dos espécimes (cerca de 3 gramas), que são cominuídas até uma fração fina em um almofariz de quartzo. As curvas foram medidas através do equipamento Kappabridge KLY-4 da empresa *AGICO* Ltd. (Figura 14), que fica associado a um sistema de aquecimento CS4 e de resfriamento CSL.

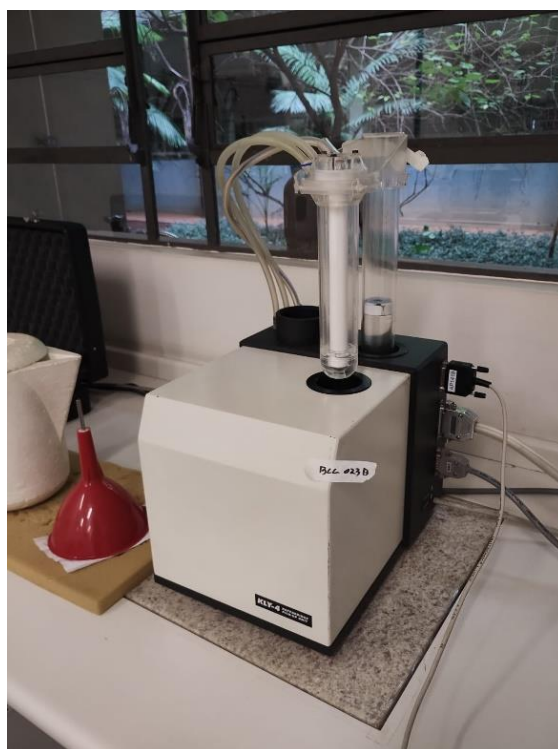


Figura 14: Suscetibilímetro KLY4 da *AGICO* Ltd.

A aquisição dos dados ocorre com uma fase inicial de baixa temperatura, em que uma parcela da amostra preparada é colocada em um porta-amostras, que é resfriado dentro de um criostato de nitrogênio até 192°C e posteriormente é aquecido até a temperatura ambiente. Em outra fase, de alta temperatura, uma outra parcela da amostra é então utilizada no porta-amostras, sendo aquecidos por meio de um fio de platina até atingir 700°C, utilizando uma atmosfera de argônio (que evita a oxidação da amostra).

Os métodos escolhidos para avaliar a mineralogia magnética foram utilizados por apresentarem muita sensibilidade, possibilitando a compreensão dos materiais mesmo quando se encontram em baixas concentrações e em pequenas dimensões, menores a 1 µm. As curvas de histerese e MRI foram obtidas no magnetômetro de rochas de amostra vibrante (*Vibrating Sample Magnetometer – VSM*) da *Princeton Measurement Corp* no modelo 2900/3900-02 AGM/VSM (Figura 15(a) e (b)), do USPMag. A sensibilidade do VSM permite que amostras fracamente magnetizadas, como os sedimentos, possam ser medidas (Dunlop & Özdemir, 1997). Com este equipamento é possível identificar os minerais portadores de magnetização das amostras.

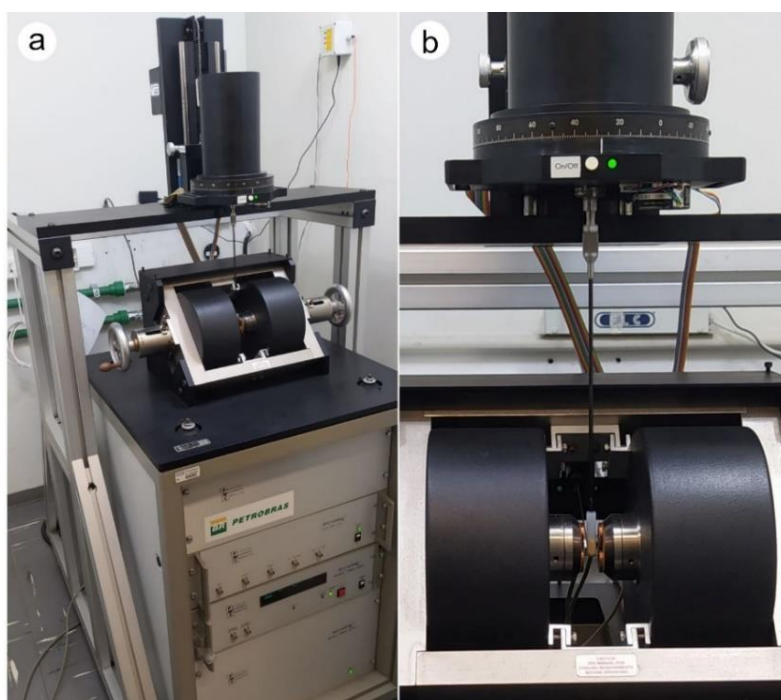


Figura 15: (a) Magnetômetro de rochas de amostra vibrante modelo 2900/3900-02 da *Princeton Measurement Corp*, (b) detalhe da haste com amostra encapsulada acoplada.

Com isso, pode-se fazer curvas de histerese, que consistem na medição da magnetização em função de um campo magnético indutor, podendo ser utilizadas para a determinação de propriedades de minerais ferromagnéticos, como a magnetização de saturação, a magnetização remanente de saturação, a coercividade e a coercividade de remanência. O ciclo de histerese representa graficamente o procedimento que inclui a utilização de um campo magnético variável para cada mineral, o que resulta em alcançar a magnetização de saturação (M_s). Posteriormente, ao remover o campo, os minerais ferromagnéticos retêm a magnetização remanente (M_r). A determinação da coercividade (H_c) ocorre através da aplicação de um campo oposto para aniquilar a magnetização remanente. O ponto em que a M_r é anulada é denominado coercividade remanente (H_{cr}). A curva de histerese representa a soma das contribuições de todas as partículas magnéticas presentes na amostra (Dunlop & Özdemir, 1997; Tauxe, 2008).

Curvas de aquisição de Magnetização Remanente Isotérmica (MRI) também foram obtidas. O método sujeita a amostra a um campo magnético intenso e constante para determinar sua resistência e ímã permanente devido às partículas ferromagnéticas presentes. O campo magnético é progressivamente aumentado até a saturação do ímã ou o limite do aparelho, que é 1 T. A curva MRI possibilita identificar fases ferromagnéticas: minerais de fraca resistência saturam em campos baixos (menores de 300 mT) e minerais de elevada resistência saturam em campos mais elevados. É benéfico para deduzir a composição mineralógica da amostra com base nas respostas magnéticas observadas.

3.5 Processamento dos dados

3.5.1 Correções dos dados de campo

Para a devida interpretação das medidas conduzidas no laboratório de ASM e das desmagnetizações AF, torna-se necessário implementar algumas correções. Dentre essas correções, a inicial é relacionada à declinação do azimute magnético, cuja variação é influenciada pelas coordenadas geográficas do local e pela data de coleta das amostras. Para realizar esse ajuste, utiliza-se

o valor estimado da declinação magnética, o qual é obtido por meio do Sítio do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Posteriormente, procedeu-se uma segunda correção que viabiliza a análise da amostra considerando sua posição original em relação ao norte geográfico. Essa etapa envolve a elaboração de um arquivo no formato “*GED*”, contendo informações de campo acerca das orientações de cada cilindro, conforme os azimutes e inclinações indicados pelo equipamento utilizado na coleta. Esse arquivo possibilita a análise das informações levando em consideração a posição do espécime em relação ao norte geográfico. Adicionalmente, nesse mesmo arquivo, podem ser inseridos dados relativos à correção tectônica, que faz o uso das atitudes das camadas onde os cilindros foram coletados visando horizontalizar o afloramento, visto que ele se encontra basculado. O arquivo gerado é compatível com os *softwares* Anisoft 6.0 e Remasoft 3.0, ambos pertencentes à empresa *AGICO Ltd.*, e deste modo é possível utilizá-lo com os dados de ASM e de desmagnetização AF.

3.5.2 Tratamento dos dados de ASM

O processamento dos dados de ASM foi realizado por meio do *software* Anisoft 6.0, desenvolvido pela *AGICO Ltd.* Este *software* proporciona valores escalares e direcionais para os eixos de suscetibilidade magnética medidos, permitindo, assim, a avaliação da trama magnética de todos os minerais presentes na rocha analisada (para-, dia- e ferromagnéticos). A partir dos dados escalares, é possível derivar o grau de anisotropia e o parâmetro de forma. Por outro lado, os dados direcionais fornecem a representação da lineação (L) e foliação magnética (F) em estereogramas. O *software* também realiza o cálculo dos erros estatísticos de Jelinek (1977) e emprega a técnica de reamostragem estatística de Bootstrap nos tensores de ASM, conforme proposto por Constable & Tauxe (1990), para obter elipsoides melhores definidos.

No que concerne aos dados provenientes das amostras do extrudito (grupo de cilindros BCC040), utilizou-se um código em *Python* baseado na técnica clássica de particionamento K-Medoids (Kaufman & Rousseeuw, 1990). Este algoritmo realiza a divisão de um conjunto de dados em *clusters*, visando minimizar a distância entre pontos rotulados como pertencentes a um mesmo

cluster e o seu medoide. O medoide de um *cluster* é definido como o dado cuja dissimilaridade média para todos os demais dados no *cluster* é mínima, ou seja, é um ponto localizado centralmente.

3.5.3 Tratamento de Desmagnetizações por Campos Alternados (AF)

Os dados obtidos com a técnica de desmagnetização por campos alternados foram processados por meio do *software* Remasoft 3.0, desenvolvido pela empresa *AGICO* Ltd. Após a correção de todos os dados de campo, procedeu-se o cálculo das direções médias de cada espécime. A escolha entre a análise das componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) (Kirschvink, 1980), e o método do *great circle* (Halls, 1976) dependeu da obtenção dos resultados mais confiáveis.

A representação gráfica das PCAs ocorre no diagrama *Zijderveld* em dois planos, vertical e horizontal. Para realizar essa representação, é essencial inserir os limites superior e inferior do intervalo de desmagnetização de cada espécime, conforme os passos executados durante a análise. Com o objetivo de otimizar a precisão dos dados, minimizando o Desvio Angular Máximo (*Maximum Angular Declination* - MAD), há a possibilidade de posicionar a origem do gráfico em um segmento linear e, opcionalmente, ancorar um segmento linear no último ponto selecionado. O *software* realiza os cálculos necessários e fornece os valores de Declinação (Dec), Inclinação (Inc) e MAD.

O método do *great circle* se apresenta como uma alternativa viável ao PCA quando os valores de MAD excedem 15°. Este método é concebido para exibir as direções vetoriais em uma projeção esférica, ajustando círculos máximos com base no intervalo de passos de desmagnetização selecionados. O *software* realiza os cálculos pertinentes, resultando nos valores de Dec, Inc e MAD com base nessa abordagem.

Além de determinar a magnetização remanente característica (*Characteristic Remanent Magnetization* - ChRM) de amostras por meio de desmagnetizações utilizando campos alternados, pode-se calcular também as direções médias por sítio, juntamente com seus respectivos VGPs (*Virtual Geomagnetic Poles*). Lanza & Meloni (2006) propõem dois possíveis procedimentos para o cálculo do polo paleomagnético, sendo possível calculá-lo

a partir da média das médias direcionais para cada sítio, com o posterior cálculo do polo paleomagnético equivalente. No segundo, calcula-se o VGP para cada sítio através de sua direção média e depois é calculado a média dos VGPs, resultando no polo paleomagnético desejado. Os dois procedimentos são fundamentados na estatística Fisheriana (Fischer, 1953), com a ressalva de que, embora os resultados para o polo paleomagnético sejam geralmente similares, pequenas discrepâncias podem ocorrer na distribuição dos dados.

3.5.4 Tratamento dos dados de mineralogia magnética

As curvas de histerese e MRI foram plotadas utilizando códigos desenvolvidos com a linguagem *Python*, visando a automatização e otimização do processamento. Inicialmente, os arquivos foram reorganizados e padronizados, facilitando o uso do código para acessar as informações neles contidas. O primeiro programa feito visa plotar as curvas de histerese e MRI de cada um dos espécimes analisados, usando dados dispostos nas colunas dos arquivos obtidos em laboratório e as suas respectivas curvas corrigidas. A correção para este caso isola a interferência de materiais dia e paramagnéticos, permitindo a avaliação de minerais ferromagnéticos. O padrão comportamental e as medidas adquiridas por meio das curvas permitem identificar os minerais magnéticos que influenciam a suscetibilidade magnética do material, já que a histerese reflete o somatório da contribuição de todas as partículas magnéticas existentes na amostra.

Outro código em *Python* foi desenvolvido visando plotar dados dispostos no cabeçalho dos arquivos de histerese e MRI, calculando razões de M_r/M_s e H_{cr}/H_c e plotando em um diagrama de Day. Por meio desse diagrama, foi possível caracterizar os minerais magnéticos quanto à sua estrutura de domínio, que pode ser SD, PSD e MD.

Para a visualização do comportamento das curvas termomagnéticas, utilizou-se o *software* Cureval 8 (AGICO Ltd.), com o qual foi realizada a correção dos dados com a medição feita no equipamento sem amostras (medida do vazio), para minimizar possíveis interferências. Para melhorar a definição das transições magnéticas principais, foi utilizado um código em *Python* que aplicou a primeira derivada nas curvas de suscetibilidade em função da temperatura.

4 RESULTADOS

4.1 ASM

Foram selecionados três sítios representativos das estruturas e litologias encontradas em campo. O Sítio 34, que se refere a um arenito que foi extrudido, ou seja, um vulcão de areia, o Sítio 35, que possui espécimes de lamito e o Sítio 37, cujas amostras são compostas por um arenito.

Para os dados do Sítio 34, referente à porção do afloramento relacionado a um nível de extrudito, realizou-se uma clusterização dos dados de ASM, utilizando um código em *Python* que implementa o algoritmo *k-medoids*, separando os dados em cinco *clusters* (grupos) principais. O resultado pode ser observado na Figura 16, na qual se nota um agrupamento de dados do polo do plano de foliação magnética (K_3). Considerando que as informações de tais espécimes são relativas à um extrudito, os *clusters* foram classificados conforme suas possíveis posições dentro dessa estrutura, sendo elas: centro (*cluster 5*), porção intermediária (*cluster 1*) e bordas externas I (*cluster 2*), II (*cluster 3*) e III (*cluster 4*).

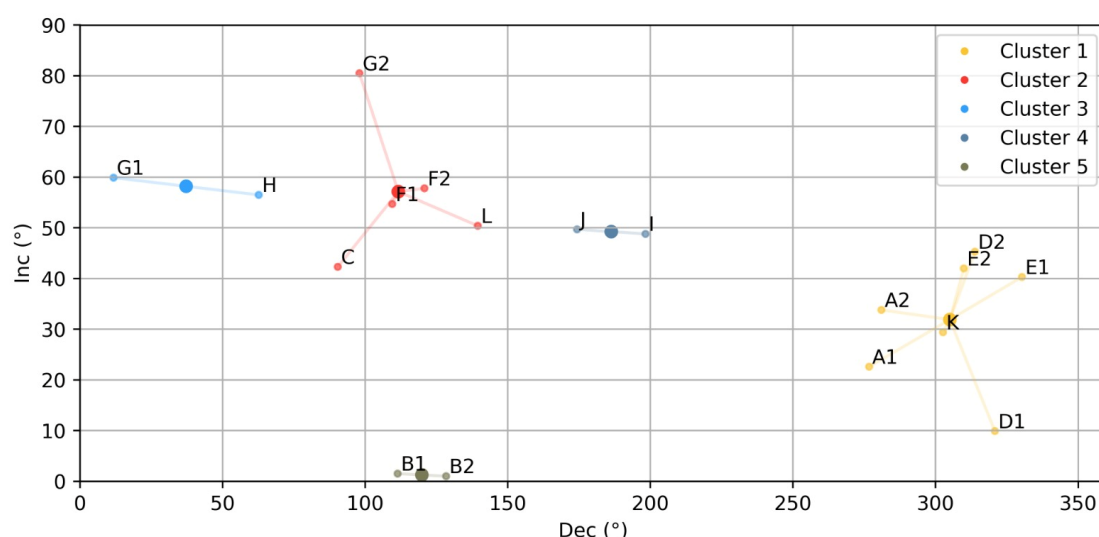


Figura 16: Clusterização dos dados do Sítio 34, com divisão em cinco principais *clusters*. Os círculos maiores representam os pontos médios calculados pelo algoritmo e os menores as amostras analisadas pertencentes ao sítio.

Os resultados obtidos para o Sítio 34, cujos cilindros foram nomeados de BCC040 foram projetados em estereogramas equi-área, com o eixo K_1

representado por quadrados, K_2 por triângulos e K_3 por círculos (Figura 17). Suas cores representam a área em que se encontram no extrudito. O cilindro BCC040B apresenta o plano de foliação magnética (plano K_1 - K_2) mais inclinada dentre todos os demais, com atitude média de 209/87, concordante com as estruturas verticalizadas esperadas para as porções centrais de extruditos. Os cilindros A, D, K e E do BCC040 apresentam valores também elevados de inclinação, tendo sua trama magnética marcada por uma foliação magnética subvertical, de atitude média 58/035. Os cilindros que foram classificados como pertencentes às bordas externas, mas que se posicionam em diferentes locais do afloramento, apresentam sua foliação magnética mais horizontalizada em relação aos outros dois grupos. Na borda externa I a foliação magnética média é 32/202, na borda exterior II é 22/146 e na borda exterior III é 40/275.

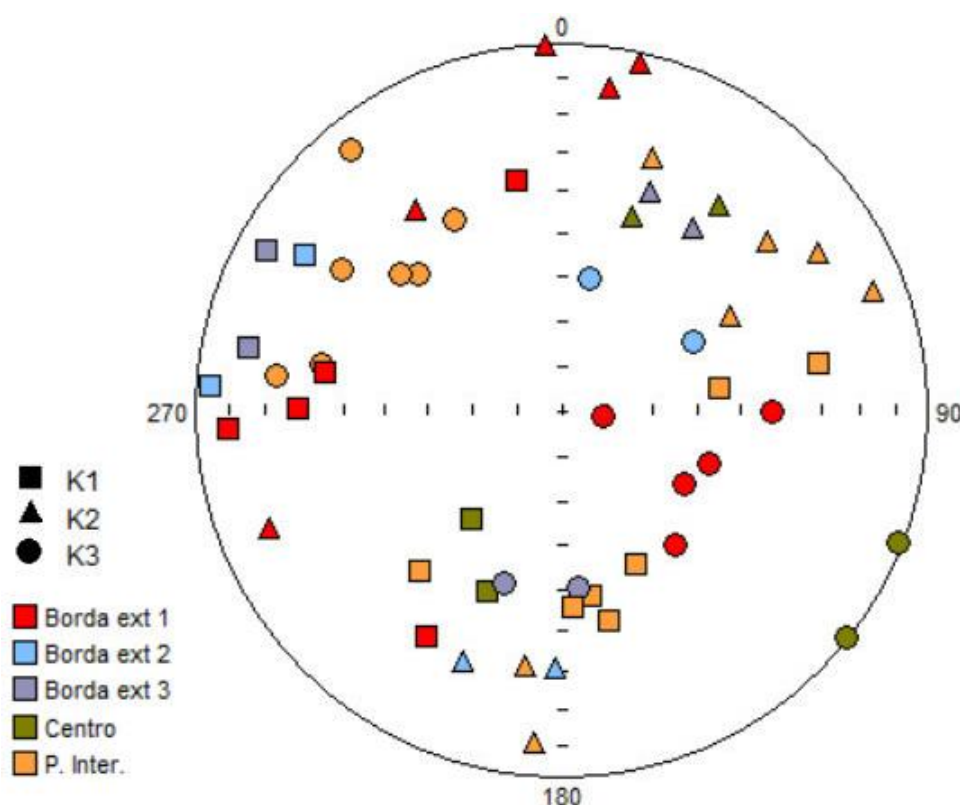


Figura 17: Estereograma com projeções de dados de ASM para Sítio 34.

A K_m revela valores baixos em praticamente todas as amostras, com exceção das amostras da borda externa II do Sítio 34, que apresentam valores ligeiramente mais elevados, de $1,26 \times 10^{-4}$ SI (Tabela 2). Em relação ao grau de anisotropia, todas as regiões analisadas do extrudito exibem valores

semelhantes entre si (Figura 18a). A forma dos elipsoides varia significativamente no Sítio 34 (Figura 18b), com valores de T entre -0,182 e 0,294. Na área central, predomina a trama prolata, assim como no grupo de amostras classificadas como pertencentes às áreas da borda externa II. As amostras na porção intermediária apresentam parâmetros de forma variáveis dentro do mesmo grupo, com valores de T que variam de oblata a prolata (0,525 a 0,680). As bordas externas I e III exibem predominantemente uma trama com forma oblata (T médio 0,294 e 0,111, respectivamente), sendo essa característica mais acentuada nos espécimes pertencentes ao cilindro BCC040F (Figura 10).

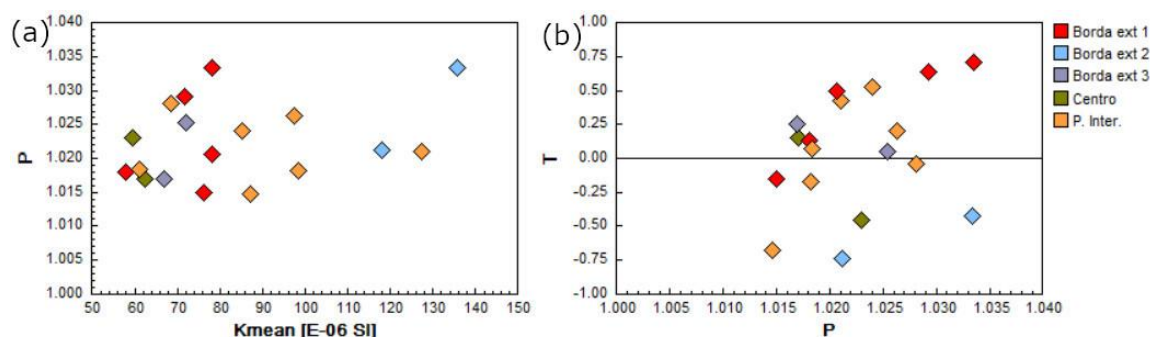


Figura 18: Parâmetros magnéticos do Sítio 34, sendo (a) Grau de anisotropia por Suscetibilidade média e (b) Parâmetro de forma por grau de anisotropia.

Os dados direcionais do Sítio 35, projetado no estereograma (Figura 19), apresentam dados mais semelhantes entre si quando comparado ao extrudido, que possui maior dispersão. A foliação magnética média é de 31/179, representando um plano mais horizontalizado em relação ao Sítio 34.

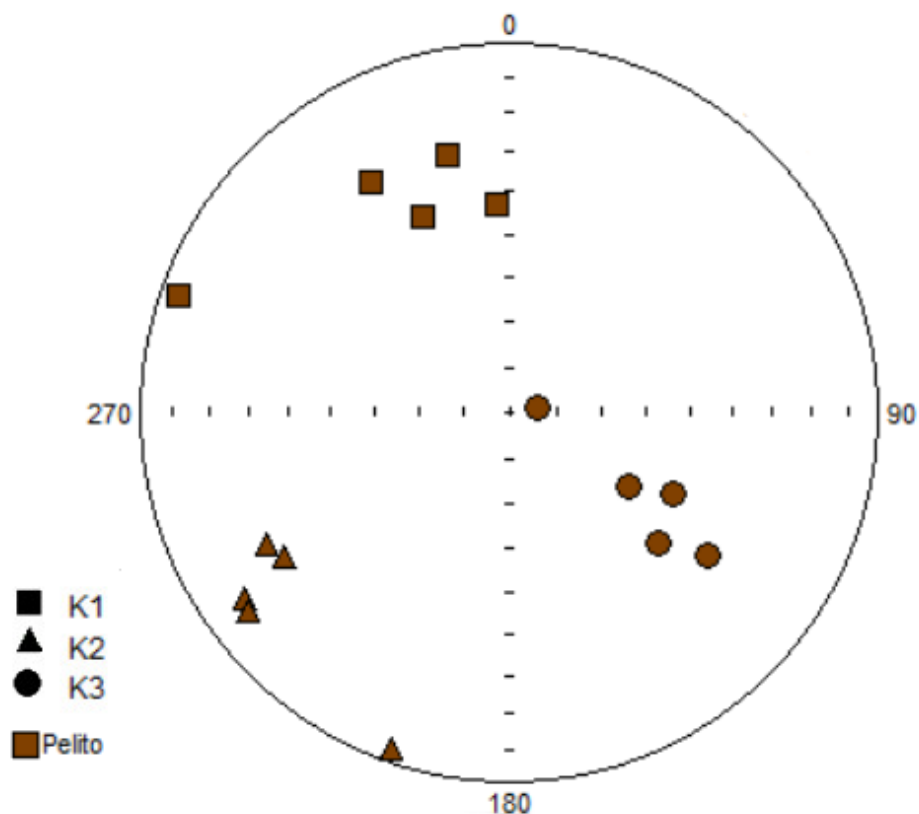


Figura 19: Estereograma com projeções de dados de ASM para Sítio 35.

O valor médio de K_m para o Sítio 35 é de $8,02 \times 10^{-5}$ SI, com apenas um espécime apresentando valor inferior, sendo este referente ao espécime com foliação magnética mais horizontalizada. O grau de anisotropia dos espécimes deste sítio aumenta conforme o aumento da suscetibilidade (Figura 20a) e o parâmetro de forma é predominantemente oblato (Figura 20b).

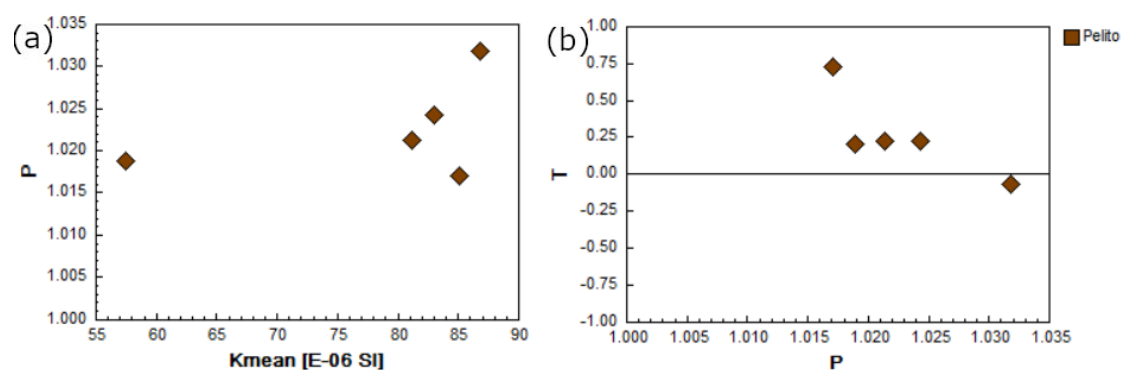


Figura 20: Parâmetros magnéticos do Sítio 35, sendo (a) Grau de anisotropia por Suscetibilidade média e (b) Parâmetro de forma por grau de anisotropia.

Os dados direcionais do Sítio 37 (Figura 21), apresentam uma certa dispersão em comparação com os observados no Sítio 35. A foliação magnética média é 46/222.

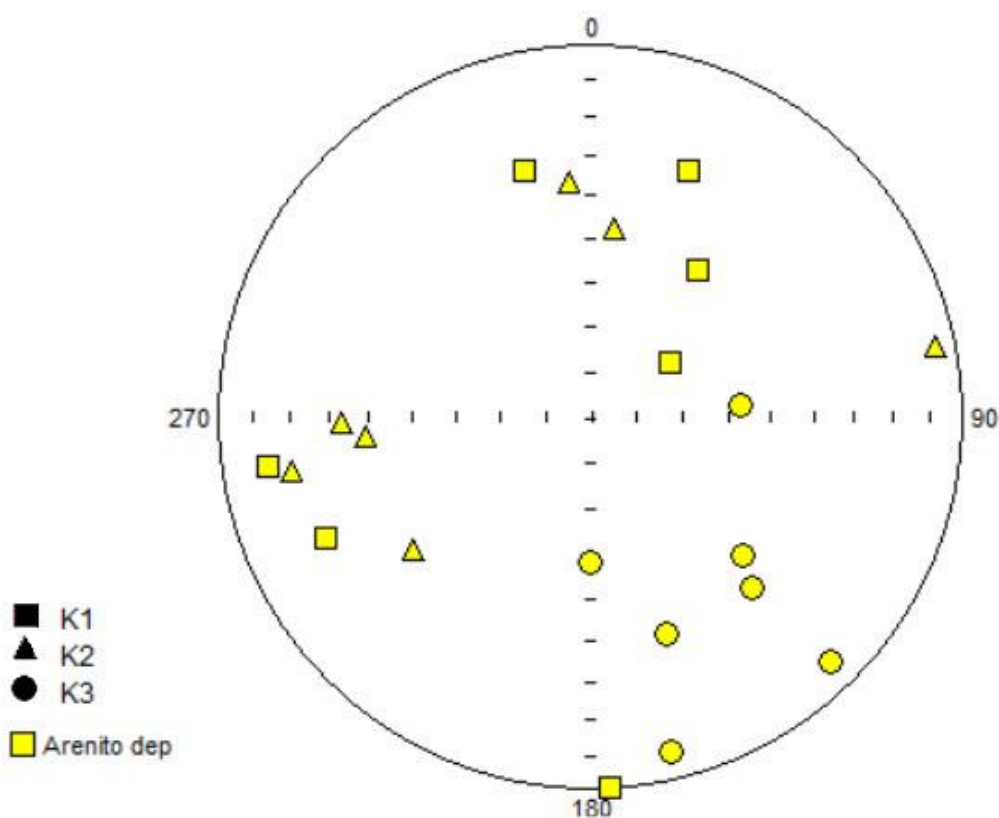


Figura 21: Estereograma com projeções de dados de ASM para Sítio 37.

O valor médio de K_m para o Sítio 37 é de $8,70 \times 10^{-5}$ SI (Figura 22a). Um espécime apresentou um valor menor, apresentando também menor grau de anisotropia com relação à média. O parâmetro de forma (Figura 22b) é predominantemente oblato ($T > 0$), com apenas dois espécimes apresentando comportamento prolato ($T < 0$).

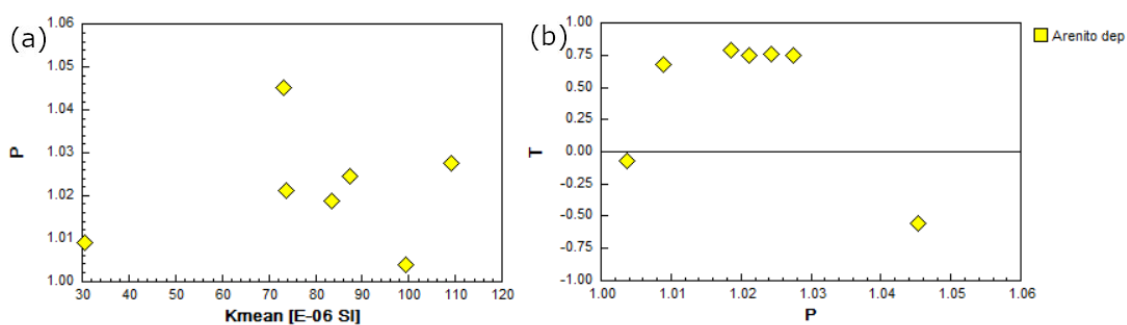


Figura 22: Parâmetros magnéticos do Sítio 37, sendo (a) Grau de anisotropia por Suscetibilidade média e (b) Parâmetro de forma por grau de anisotropia.

Os resultados de ASM obtidos para os sítios representativos selecionados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos parâmetros por sítio de Suscetibilidade Média (Km), Grau de Anisotropia (P), Parâmetro de Forma (T) e resultado dos eixos principais de suscetibilidade (K1, K2 e K3) com seus respectivos erros associados (ϵ_{12} , ϵ_{23} e ϵ_{31} , calculados a partir da estatística de Jelinek).

Sítio	Região	Espécimes	Parâmetros magnéticos			Principais direções dos eixos					
			Km SI (média)	P	T	K1 (dec/inc)	ϵ_{12} (K1)	K2 (dec/inc)	ϵ_{23} (K2)	K3 (dec/inc)	ϵ_{31} (K3)
34	Centro	BCC040B	6.09E-05	1.018	-0.182	212.4/55.5	ND	26.3/34.3	ND	118.2/2.9	ND
	Porção intermediária	BCC040A, BCC040D, BCC040E, BCC040K	8.66E-05	1.020	0.061	165.7/50.6	29.9/8.1	49.2/20.2	30.5/15.4	305.8/32.2	22.6/12.8
	Borda Externa I	BCC040C, BCC040F, BCC040G2, BCC040L	7.12E-05	1.023	0.294	268/29.4	57.3/12.6	4.2/10.9	57.5/3.7	112.3/58.2	12.6/9.9
	Borda Externa II	BCC040G1, BCC040H	1.26E-04	1.027	-0.557	289.6/14.2	ND	194.9/18	ND	55.7/66.8	ND
	Borda Externa III	BCC040I, BCC040J	6.91E-05	1.021	0.111	288.3/11.9	ND	27.6/37.4	ND	183.7/50.1	ND
35	Pelito	BCC041A1, BCC041A2, BCC041B1, BCC041B2, BCC041C1, BCC041C2	8.02E-05	1.039	0.314	271.5/31.7	52.2/14.6	180.5/1.6	60.4/12	87.9/58.2	51.4/12.2
37	Arenito depositado	BCC056A, BCC057A, BCC058A, BCC058B, BCC059A, BCC059B, BCC059C	8.70E-05	1.027	0.548	352.5/37.6	29.7/13.6	244.3/22	23.8/11.8	131.2/44.2	24.9/14.9

4.2 Magnetoestratigrafia

Os dados de desmagnetizações AF foram processados no Remasoft 3.0, para todas as 198 amostras obtidas, calculando as principais componentes angulares e seu MAD da tangente de desmagnetização (Figuras 23 e 24). A seleção dos limites superiores e inferiores foram inferidos levando em consideração o menor MAD possível, considerando as projeções estereográficas, de *Zijderveld* e as curvas de intensidades normalizadas em função do campo alternado.

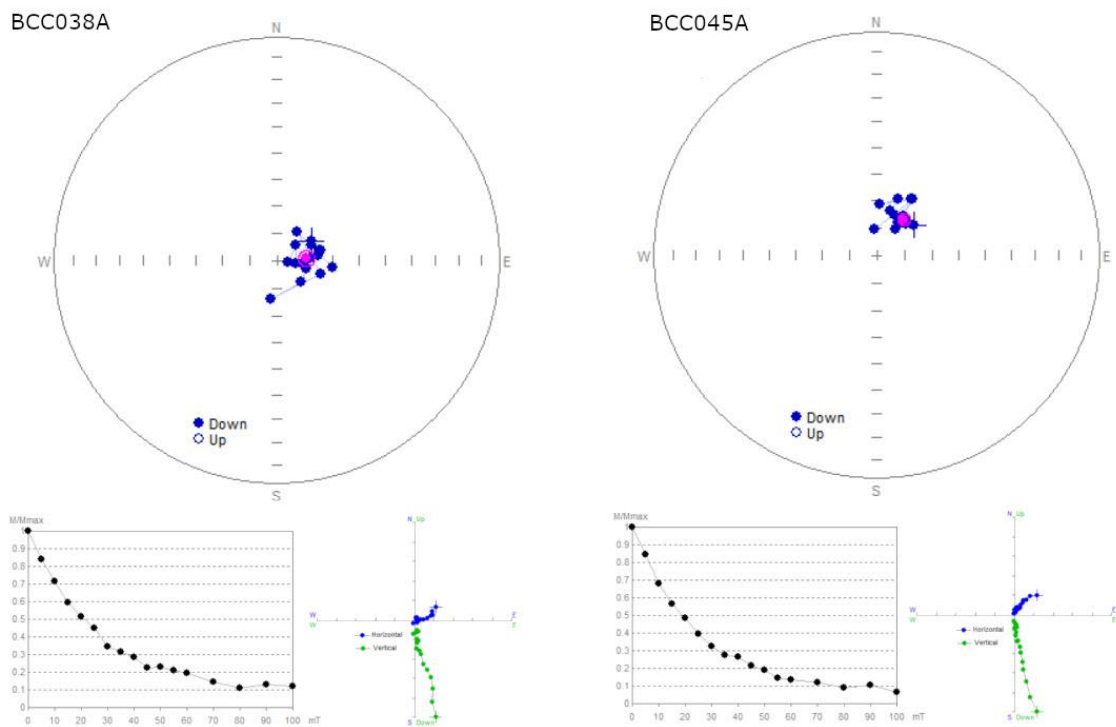


Figura 23: Exemplo de desmagnetizações a campos alternados em amostra de lamitos, com as projeções estereográficas, projeções de *Zijderveld* e curvas de intensidades normalizadas (M/M_{max}) em função do campo alternado.

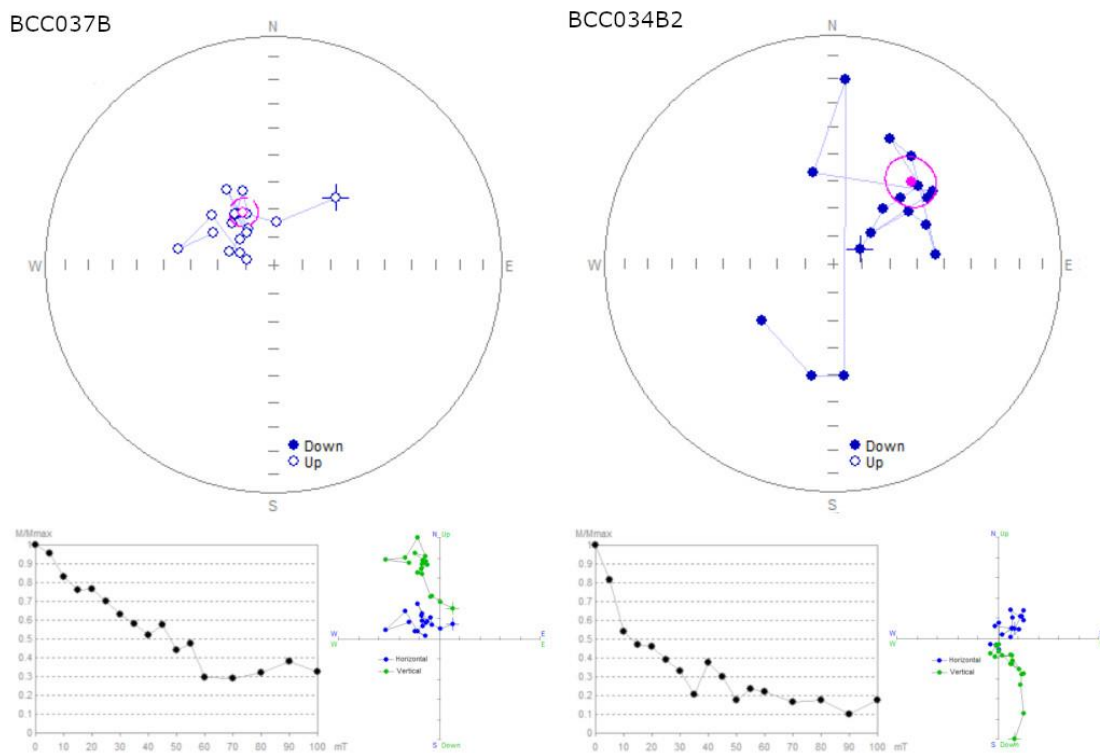


Figura 24: Exemplo de desmagnetização a campos alternados em amostra de arenitos, com as projeções estereográficas, projeções de *Zijderveld* e curvas de intensidades normalizadas (M/M_{max}) em função do campo alternado.

Os dados de declinação e inclinação das amostras foram calculados (estão disponíveis no Apêndice C), sendo estes correspondentes às respectivas polaridades do campo magnético terrestre aos quais foram submetidos durante sua deposição. O valor de intensidade da NRM das amostras apresenta grande variação, de 1.0×10^{-2} e 1.16×10^4 Am²/kg, com valores médios de $6,68 \times 10^2$ Am²/kg. O MAD utilizado para refinar os dados de inclinação e declinação foi de 15°, fazendo com que parte dos dados dos espécimes analisados precisasse ser descartado. De tal modo, dos 198 espécimes iniciais, foram de fato utilizados 140. Nestes, o valor médio do MAD ficou em cerca de 6,5°. Realizando a estatística de grupo, que utiliza a estatística Fisheriana, obteve-se os dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados paleomagnéticos obtidos com a desmagnetização por campos alternados.

Sítio	Direções médias					VGP		
	N	Dec (°)	Inc (°)	k	α_{95} (°)	Pole Lat (°)	Pole Lon (°)	Paleo Lat (°)
1	8	30.1	62.7	5.96	24.8	68.8	108.4	44.1
2	5	104.4	65.3	8.24	28.3	27.1	61.5	47.3
3	6	85.6	46.2	9.21	23.3	23.5	88.5	27.6
4	9	28.6	65	95.55	5.3	70.9	102.1	47
5	3	44.9	30.5	1.63	0	40.8	130.6	16.4
6	7	23.8	72.9	86.14	6.5	73.8	63.4	58.4
7	5	91.6	74.2	163.71	6	41.1	54.8	60.5
8	3	317.9	72.3	1.86	160.4	64.5	-42.7	57.5
9	3	19.6	67.2	3.27	83.7	77.4	96.9	49.9
10	3	225.4	83	41.96	19.3	39.5	1.3	76.2
11	3	123.3	57.7	8.2	46.1	11.4	56	38.3
12	3	38.2	6.4	5.17	60.9	65.4	54.3	64.2
13	3	13.2	60.2	212.9	8.5	77.2	143	41.1
14	2	31.7	73.4	35.31	43.4	69.7	64.8	59.2
15	3	292.6	71.9	13.37	35.1	50.9	-39.2	56.8
16	2	82.3	70.6	29.57	47.7	42.5	64.8	54.8
17	1	335.5	63.4	0	0	72.8	-83.6	45
18	2	27.9	68.9	109.32	24.1	72.5	85.6	52.3
19	7	57.6	65.7	7.41	23.8	53.1	84.4	47.9
20	2	16.5	74.1	35.5	43.2	76.1	49.8	60.3
21	8	354.3	67.8	1.68	65.1	86.2	-61.1	50.8
22	2	16.9	68.8	84.81	27.5	79.2	85.4	52.3
23	10	68.7	34.1	2.41	40.1	27.8	107.7	18.7
24	2	7	51.5	7.62	109.5	71.4	175	32.2
25	2	29	60.3	81.88	28	68.1	116.4	41.2
26	8	36.2	61.2	21.57	12.2	64	107.3	42.3
27	2	14	55.5	35.41	43.3	72.8	152.6	36.1
28	2	65.7	57.5	2.93	0	42.9	92.3	38.1
29	10	51.9	46.9	2.8	35.6	45.3	113.3	28.1
30	2	77	66.4	10.24	88.6	42.2	74	48.8
31	2	321.1	-8.1	0.99	0	26.4	-121.6	-4.1
32	3	94.7	80.1	44.99	18.6	44.9	41.6	70.8
33	7	64.6	62	5.97	26.9	46.5	87	43.3

Para facilitar a observação dos dados, as colunas estratigráficas foram agrupadas em *Log 1* e *Log 2* Parte I e Parte II, sendo associadas aos dados processados, possibilitando a compreensão das magnetozonas, que foram classificadas como positivas e negativas. As magnetozonas reversas, em que os dados de inclinação são negativos no hemisfério norte, encontram-se nas profundidades de 32,8, 13 e 7,7 m na Figura 25 (que apresenta dados da seção estratigráfica do *Log 1*) e em 12,9 e 9,2 m na Figura 26 (que apresenta dados da primeira parte da seção estratigráfica do *Log 2*). A Figura 27 apresenta a segunda parte do *Log 2*, que não apresentou reversões. As demais magnetozonas, de inclinação positiva, correspondem à polaridade normal no hemisfério norte.

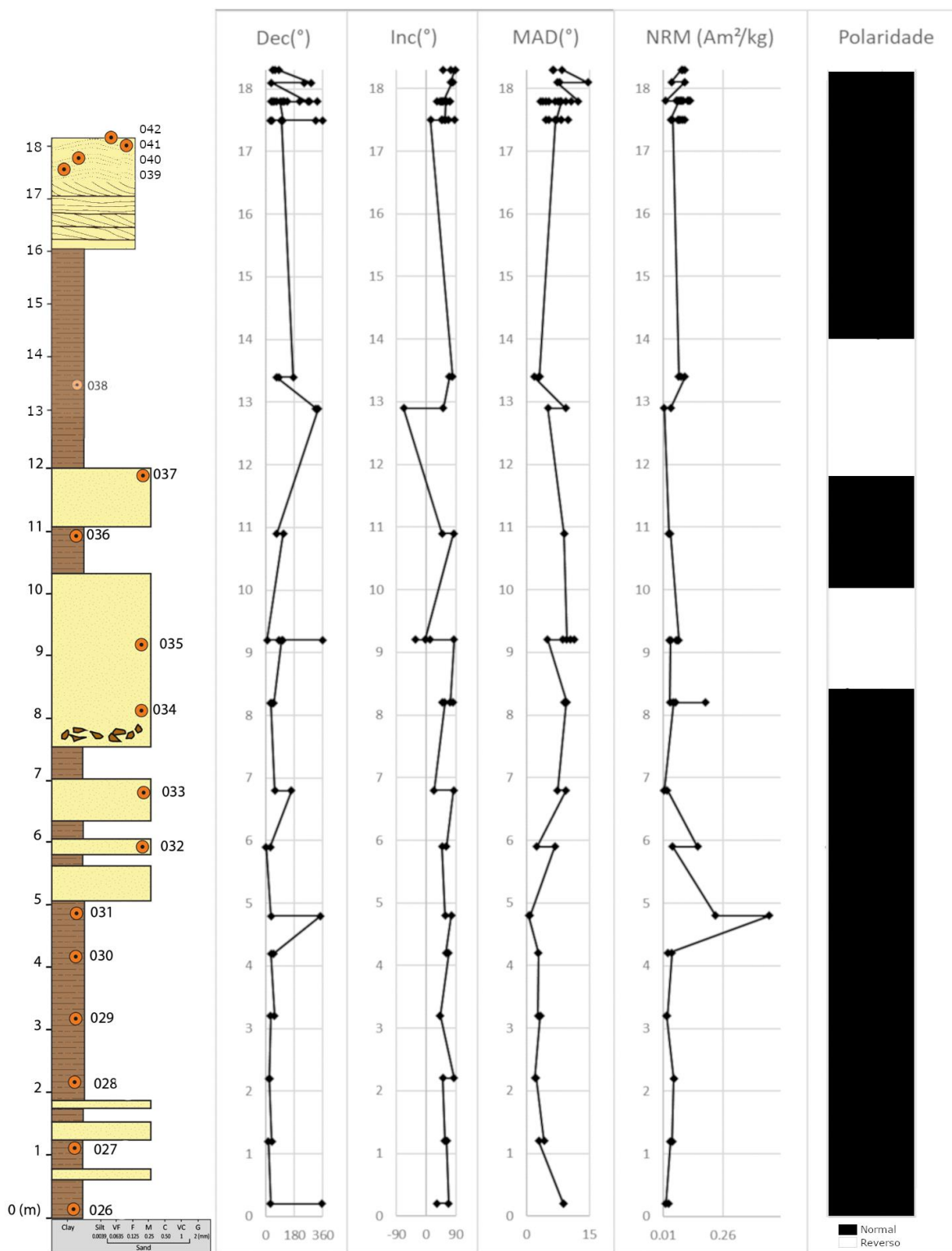


Figura 25: Dados de magnetoestratigrafia do Log 1 da seção estratigráfica.

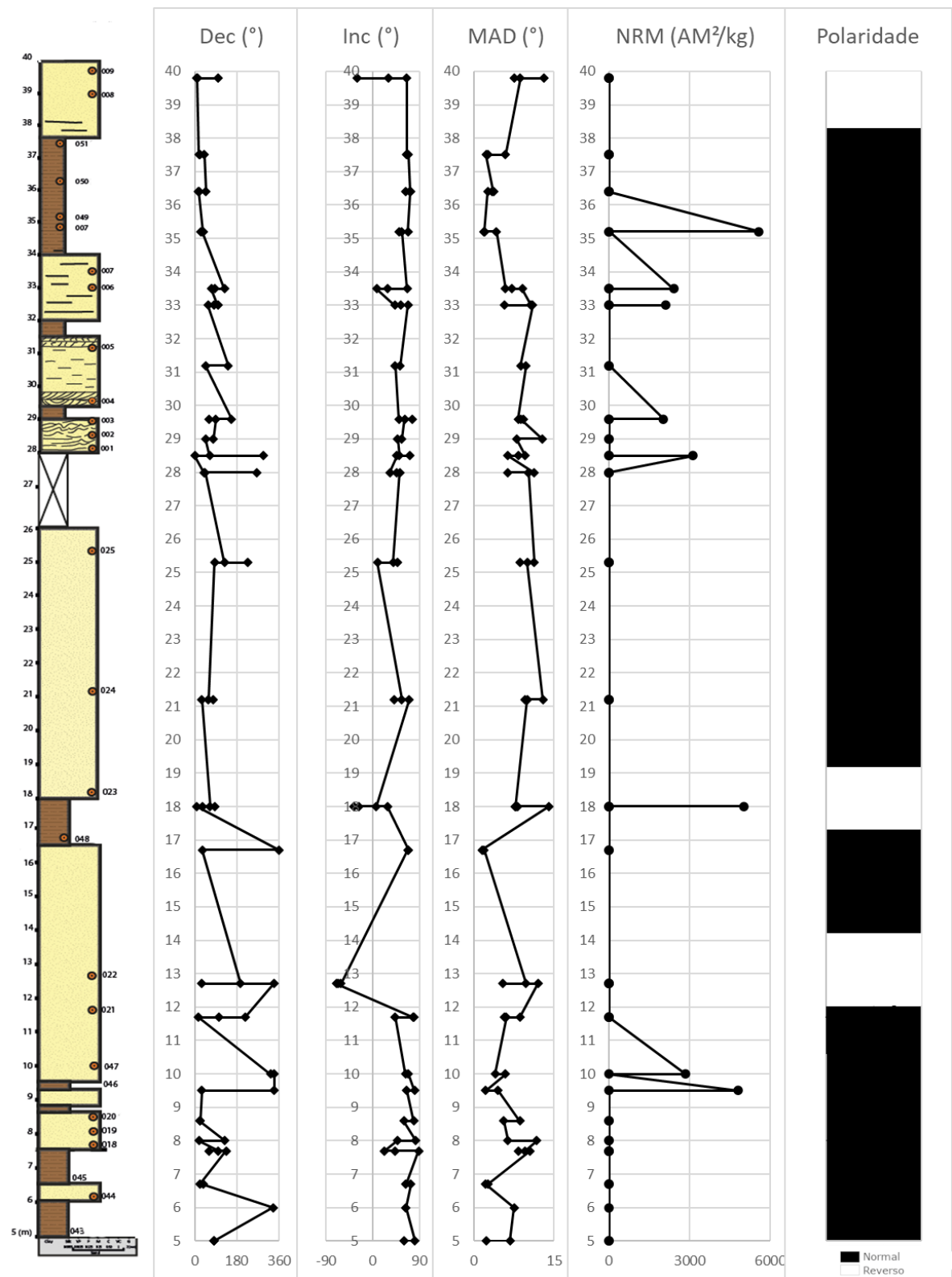


Figura 26: Parte I dos dados de magnetoestratigrafia do Log 2 da seção estratigráfica.

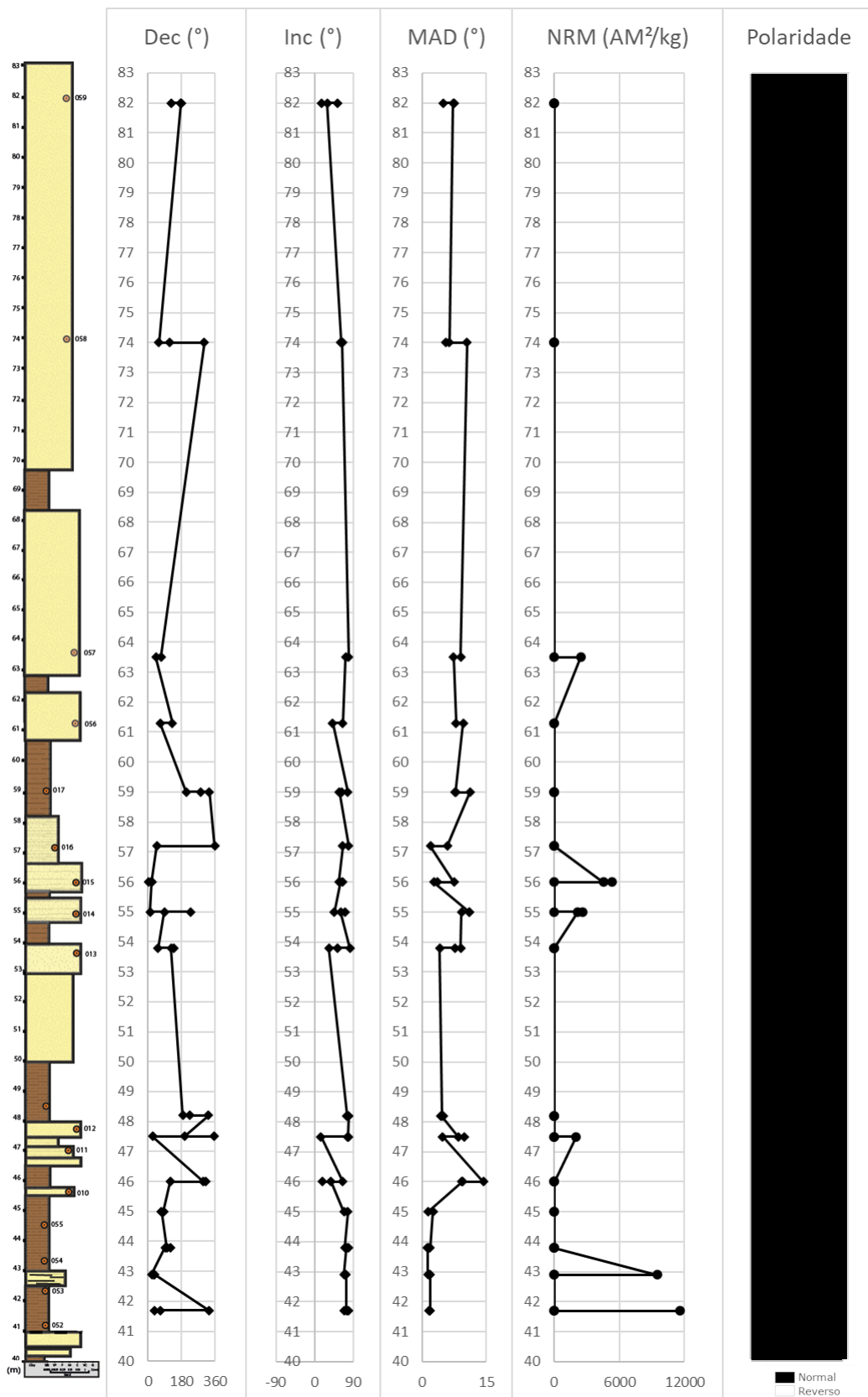


Figura 27: Parte II dos dados de magnetoestratigrafia do Log 2 da seção estratigráfica.

4.3. Mineralogia magnética

4.3.1 Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas das nove amostras selecionadas apresentam o mesmo comportamento (Figura 28a e b), com transição de Verwey (T_v) em torno de $-160\text{ }^\circ\text{C}$, pico de Hopkinson bastante acentuado e temperatura de Curie (T_c) variando de 560 a $570\text{ }^\circ\text{C}$, indicando a presença de magnetita ou titanomagnetita. Tais valores foram obtidos através da aplicação da primeira derivada nos dados, cujos valores máximos e mínimos, informaram, respectivamente, as T_v e T_c .

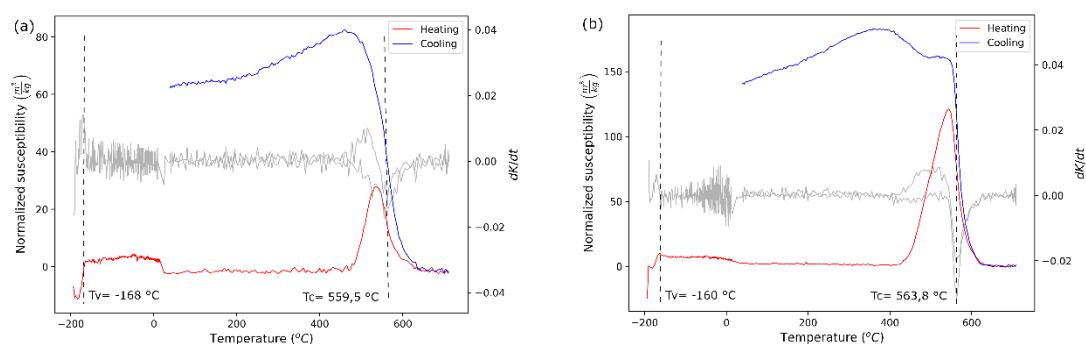


Figura 28: Curvas termomagnéticas (Suscetibilidade (SI) contra Temperatura ($^\circ\text{C}$)) representativas dos dados analisados da Bacia de *San Joaquin*, sendo (a) amostra de arenito e (b) amostra de lamito. A curva em vermelho representa aquecimento, a azul resfriamento e a cinza a primeira derivada dos dados.

4.3.2 Curvas de histerese

Os ciclos de histerese das 70 amostras analisadas revelam uma influência significativa de minerais paramagnéticos, o que ocasionalmente compromete a identificação de minerais ferromagnéticos em baixas concentrações. Esse fenômeno é notável nas curvas em azul (Figura 29 e 30), não corrigidas, onde se observa uma relação linear entre a magnetização induzida e a intensidade do campo magnético. Tal padrão é comumente observado em amostras com baixa presença de material ferromagnético, mas ricas em fases contendo ferro, como, por exemplo, biotita ou argilominerais.

A resposta dos materiais ferromagnéticos para as amostras analisadas é mascarada pela presença de material paramagnético, levando à necessidade de

correção em todas as curvas. Essa correção visa subtrair a influência paramagnética, e as curvas também são normalizadas pela massa das amostras utilizadas em cada análise. Essa abordagem busca proporcionar uma representação mais precisa e comparável das propriedades magnéticas, considerando as características específicas das amostras analisadas.

O comportamento predominante nas amostras de arenitos se manifesta como superparamagnético (Figura 29a) e características típicas de grãos de magnetita multi-domínio e pseudo-domínio simples (Figura 29b), em que se observa curvas de cintura fina (Roberts *et al.* 1995).

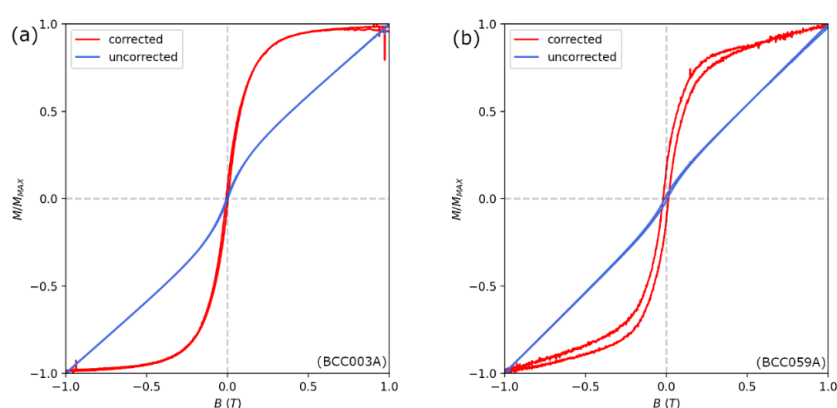


Figura 29: Ciclos de histerese mais característicos das amostras de arenito analisadas, com comportamentos de (a) material superparamagnético e (b) cintura fina típica de magnetita.

Em determinadas amostras de lamitos, é possível identificar um padrão assemelhado a uma "cintura de vespa" (Figura 30a). Além disso, observa-se em alguns lamitos a possível presença de hematita (Figura 30b), com curvas de cintura mais larga.

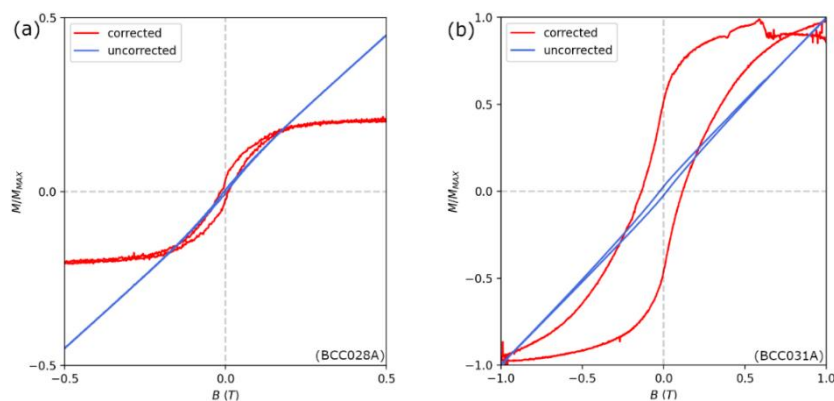


Figura 30: Ciclos de histerese mais característicos das amostras de lamito analisadas, com comportamentos de (a) "cintura de vespa" e (b) curva típica de hematita.

4.3.3 Curvas de MRI

Os experimentos de MRI efetuados com as amostras da Bacia de *San Joaquin* resultaram em dois principais comportamentos. Em arenitos (Figura 31a), observa-se uma curva que fica saturada após 0,2 T, enquanto que a curva mais observada para lamitos (Figuras 31b), não se satura em campos de até 1 T.

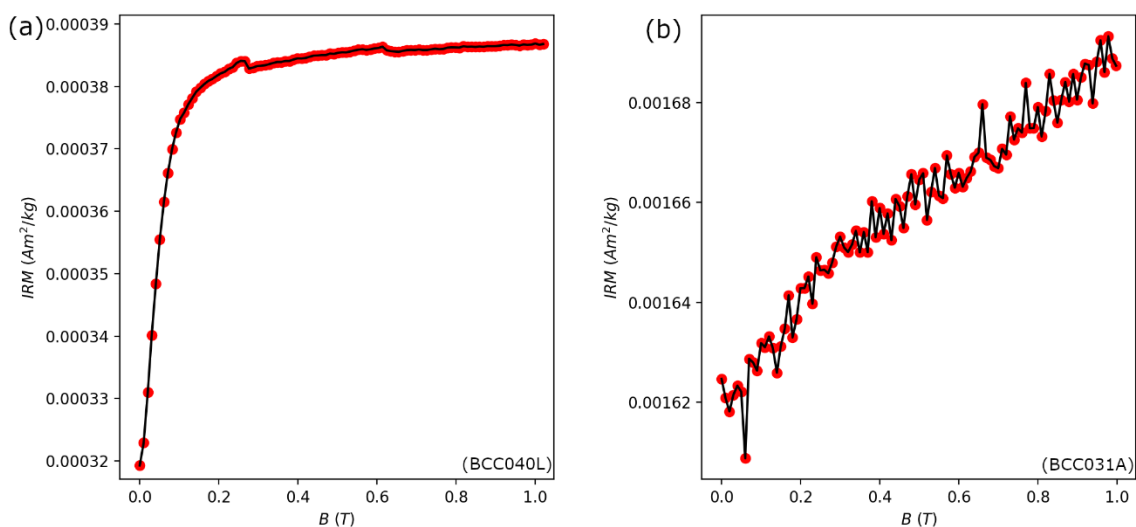


Figura 31: Principais comportamentos observados nas curvas de MRI amostras analisadas, sendo em (a) MRI que satura em campos inferiores a 0,1 T e (b) MRI que não satura até campo de 1 T.

5 DISCUSSÃO

5.1 ASM

O agrupamento dos dados em cinco principais grupos utilizando *k-medoids* se mostrou eficiente para separar os dados conforme seus valores de eixo K3. Com isso, foi possível separar os dados conforme as possíveis posições dentro da estrutura do extrusido (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, como projetado pelas linhas brancas tracejadas na Figura 32.

A porção central do extrudido 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 extrudido, onde nos flancos da estrutura ocorre a deposição do material extrudido formando laminações paralelas a cruzada tangencial de baixo ângulo.



Figura 32: Imagem do extrudito e local de coleta do Sítio 34 com marcações dos pontos de coleta de cada um dos cilindros do grupo BCC040. A linha branca tracejada descreve a trajetória da estrutura física do extrudito, que acompanha aproximadamente a disposição espacial do acamamento sedimentar.

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 pDRM, 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).

5.2 Magnetoestratigrafia

O tratamento a campos alternados nas desmagnetizações de lamitos (Figura 23) é quase linear, capaz de eliminar até 80% da intensidade da NRM com até 50 mT e, posteriormente, decaindo até 90% até atingir 100 mT. Este tipo de tratamento não foi capaz de retirar completamente a NRM, deixando 10% da magnetização inicial ao finalizar todos os passos, com 100 mT de campo aplicado. Os *Zijderveld* nos exemplos apresentados se mostram como um único vetor na projeção ortogonal, que é eliminado durante os passos de desmagnetização. Isso decorre quando a magnetização muda de intensidade sem mudar sua direção durante o procedimento. A aquisição de magnetização em lamitos ocorre com maior estabilidade, por eles apresentarem menores grãos e sua deposição ocorrer. Nos arenitos (Figura 24), os comportamentos são mais variáveis, mas normalmente tem até 50% da NRM eliminada até o passo de 50 mT, não sendo completamente eliminada até campos de 100 mT. Os *Zijderveld* apresentam, por vezes, mais de uma componente ao longo de todo o tratamento de campos alternados.

As reversões de polaridade magnética são capazes de serem registradas simultaneamente em diversas rochas ao redor do mundo, conferindo a essa técnica uma não-transgressão temporal. Isso estabelece um padrão de inversões de polaridade que fornece uma resposta global em forma de "códigos de barras", permitindo a correlação das inversões de polaridade em estratos rochosos (Khramov, 1958).

Ao analisar a magnetoestratigrafia, observa-se que algumas amostras apresentam momento magnético baixo, dificultando sua desmagnetização. Essas características podem estar relacionadas à litologia presente nas amostras, constituída principalmente por minerais paramagnéticos.

Utilizando a correlação dos *logs* estratigráficos para uma compreensão mais aprofundada da disposição das camadas no campo (Figura 33), foram estimadas sete magnetozonas, sendo quatro de polaridade normal e três de polaridade reversa. Isso decorre do fato de as camadas em que foram observadas reversões estarem lateralmente relacionadas. Com a interpretação magnética, pode-se inferir que se tratam dos *Crons* C30n, pertencente ao Cretáceo Superior (Maastrichtiano), e C29r, C29n, C28r, C28n, C27r e C27n, pertencentes ao início do Paleógeno (Daniano). Suas idades estão apresentadas na Tabela 4, tendo como base o GPTS de Ogg (2020). De tal modo, a seção estudada possivelmente foi depositada ao longo de 4,648 Ma, entre 68,178 e 63,530 Ma.

Tabela 4: *Crons* e idades para o Cretáceo Superior e Paleoceno.

Época	Idade	Cron	Idade (Ma)	Duração (Ma)
Paleoceno	Daniano	C27n	63.530	0.252
		C27r	63.537	1.007
		C28n	64.645	1.108
		C28r	64.862	0.217
		C29n	65.700	0.838
		C29r	66.380	0.680
Cretáceo Superior	Maastrichtiano	C30n	68.178	1.798

Para uma classificação mais precisa das possíveis magnetozonas, torna-se necessário restringir certas porções da estratigrafia por meio de outras técnicas, como a bioestratigrafia, a fim de evitar correlações ambíguas com a polaridade geomagnética de referência na escala de tempo em estudo. Os dados foram comparados com as correlações presentes na *Geomagnetic Polarity Time Scale* (GPTS) de Ogg (2020). No entanto, os dados de bioestratigrafia não foram concluídos até a entrega deste projeto, o que impossibilita a avaliação da confiabilidade das magnetozonas correlatas aos pontos de amarração (*tie-points*). A integração desses pontos na magnetoestratigrafia permite o cálculo das taxas de sedimentação para cada porção estudada, proporcionando uma compreensão mais profunda das condições ambientais no ambiente de deposição.

5.3 Mineralogia magnética

5.3.1 Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas analisadas se mostraram irreversíveis, pois as curvas de aquecimento e resfriamento se apresentam de modo distinto. Isso é ocasionado por transformações mineralógicas que ocorrem durante a análise, formando novos minerais com suscetibilidades magnéticas diferentes.

As curvas termomagnéticas permitem observar, em baixa temperatura, características como o ponto isotrópico, que ocorre quando a constante de anisotropia magnetocristalina da magnetita passa pelo zero e deste modo perde algumas de suas propriedades magnéticas, como a coercividade e remanência. Outra característica que pode ser observada nesses casos é que a estrutura da magnetita neste tipo de análise acaba tendo seu sistema cristalográfico modificado, indo de cúbico para monoclinico. Isso ocorre no ponto chamado de transição de Verwey, que pode ocorrer no intervalo de -163,15 a -148,15 °C (Özdemir & Dunlop, 1997). No caso das amostras analisadas, elas apresentaram valores próximos a -160 °C.

A magnetita teoricamente apresenta uma temperatura de Curie de 580 °C (Özdemir & Dunlop, 1997), contudo, ela pode apresentar fenômenos magnéticos que podem alterar o comportamento de sua suscetibilidade magnética ao ser

resfriada ou aquecida. O pico de Hopkinson (e.g. Sláma *et al.*, 2017), que ocorre um pouco antes da T_c , é um desses efeitos, onde a suscetibilidade aumenta até atingir um máximo abrupto. Este fenômeno resulta da transição da magnetização remanescente estável para uma relaxação superparamagnética (Sláma *et al.*, 2017), ocasionada pela maior densidade de temperatura de desbloqueio dos minerais magnéticos (Williams & Dunlop, 1995).

A T_c para as amostras analisadas é de 560 a 570 °C, um pouco mais baixas que a teórica para uma magnetita. Tal comportamento pode ser devido a uma não estequiometria ou substituições químicas nas estruturas cristalinas dos materiais. A substituição de ferro por titânio nas titanomagnetitas altera suas propriedades magnéticas, com o Ti^{4+} aumentando a cela cristalina e enfraquecendo a interação magnética. Com isso, a temperatura de Curie diminui linearmente com o aumento do parâmetro "x" na estrutura cristalina e pode vir a ocasionar o desaparecimento da T_v , quando a proporção $x > 0,1$. A substituição de ferro por titânio nas titanomagnetitas altera suas propriedades magnéticas, com o Ti^{4+} aumentando a cela cristalina e enfraquecendo a interação magnética. Com isso, a temperatura de Curie diminui linearmente com o aumento do parâmetro "x" na estrutura cristalina e pode vir a ocasionar o desaparecimento da T_v , quando a proporção $x > 0,1$. Dada essas informações, pode-se dizer que a trama magnética das rochas estudadas é predominantemente dominada por titanomagnetitas.

5.3.2 Curvas de histerese

O comportamento superparamagnético observado em amostras de arenitos é um fenômeno que ocorre quando o tamanho dos grãos é diminuto (< 10 nm). Já as curvas de arenito com cinturas finas são atribuídas como uma resposta a uma razão M_r/M_s menor que a de domínio simples (Tauxe, 2008). As amostras demonstram ser pouco reversivas, característica evidenciada por valores reduzidos de H_c para os portadores magnéticos presentes nesse litotipo.

As "cinturas de vespa" observadas em algumas amostras de lamito se devem a uma possível presença de uma mistura de minerais magnéticos contrastantes (Roberts *et al.*, 1995), que pode ser atribuída à presença de diferentes minerais ou ao mesmo mineral com distintas estruturas de domínio.

Já em casos cuja curva se apresenta com uma cintura larga, indicativa de hematita, exibem anisotropia magnetocristalina na origem. Esse tipo de curva possui um comportamento distinto, com características de cintura mais larga, tratando-se de um mineral de maior coercividade.

5.3.3 Curvas de MRI

As MRI observadas em arenitos revelaram um rápido aumento em campos inferiores a 0,2 T, seguido por curvas que atingem posteriormente a magnetização remanente de saturação. Essa característica indica uma distribuição de grãos com baixas coercividades (Figura 30a), possivelmente associada a minerais como magnetita ou titanomagnetita. A notável linearidade entre a magnetização de saturação e a coercividade, conforme observado por Özdemir e Dunlop (1997), confirma que é raro encontrar uma assembleia de magnetitas MD com valores de H_c acima de 0,1 T. Em contrapartida, há casos distintos, como a curva representativa dos lamitos (Figura 30b), onde a saturação não é alcançada mesmo em campos magnéticos de até 1 T. Esta particularidade, aliada à elevada coercividade (H_c), sugere a possível presença de hematita nas amostras, concordante com os resultados observados nas histereses.

5.3.4 Diagrama de Day

Mediante às análises de histerese, foram organizados os dados de H_c , H_{cr} , M_s e M_{rs} em tabela disposta em dados de mineralogia magnética disponível no Apêndice D. Com isso, calcularam-se as razões H_{cr}/H_c e M_{rs}/M_s , utilizadas para construir o diagrama de Day (Day *et al.*, 1977), com as modificações de Dunlop (2002a, 2002b). As amostras analisadas são evidenciadas pelos círculos na representação gráfica (Figura 34), a qual exhibe as curvas teóricas propostas por Dunlop (2002a). As curvas SD-MD sinalizam combinações de grãos de domínio simples com diferentes percentagens de grãos multi-domínios e de curvas SP-SD, que são misturas de grãos de domínio simples com diferentes proporções de grãos superparamagnéticos de dimensões 10 nm. A maioria das amostras analisadas ficam situadas dentro das curvas traçadas com

classificação de PSD e de mistura SD-MD, com concentração de grãos SD menores que 60-80% (Dunlop, 2002a, b).

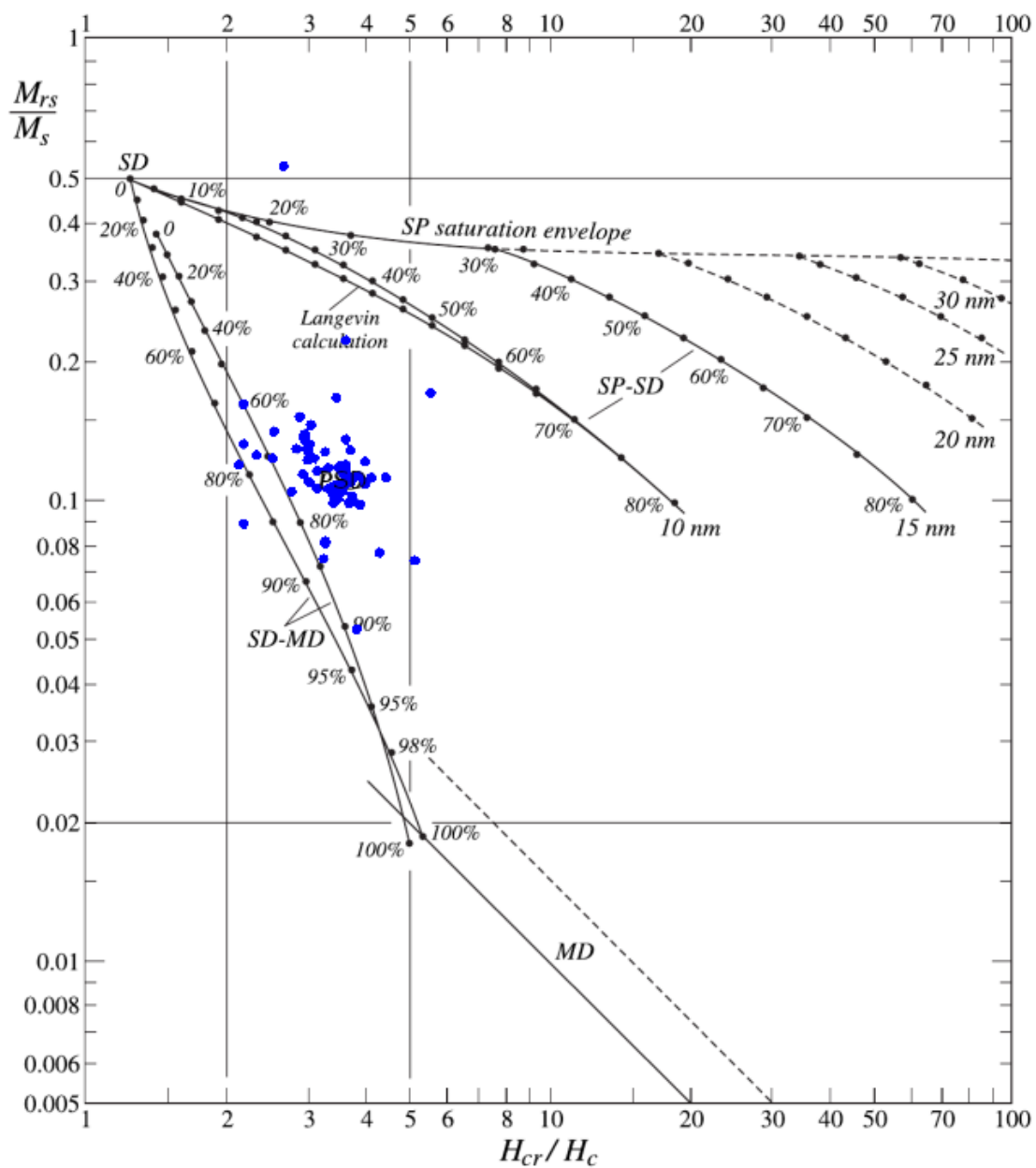


Figura 34: Diagrama de Day (Day et al., 1977, modificado por Dunlop 2002a), indicando a estrutura de domínios magnéticos das amostras analisadas. H_{cr} - coercividade de remanência; H_c - coercividade; M_{rs} - magnetização remanente de saturação; M_s - magnetização de saturação; SD - *single-domain*, PSD - *pseudo-single domain*, MD - *multidomain*.

6 CONCLUSÕES

O extrudito revelou uma foliação magnética mais verticalizada em sua porção central, conforme esperado para regiões sujeitas a fluxo de injeção. À medida que as amostras se afastam do centro, os valores de mergulho tornam-se mais horizontalizados, evidenciando parâmetros de forma predominantemente oblatos. Em contrapartida, os dados direcionais dos lamitos exibiram uma foliação magnética mais horizontalizada, com declinações semelhantes entre si. Arenitos depositados e extruditos apresentaram variações mais expressivas. Os arenitos depositados, em média, demonstraram paleofluxo com inclinação mediana a sub horizontalizada, mas com dados exibindo declinações predominantemente no mesmo quadrante. A análise de anisotropia de suscetibilidade magnética para o extrudito permitiu a formação de *clusters*, contribuindo para a compreensão da estrutura observada em campo, especialmente nas estruturas conhecidas como "vulcões de areia".

A análise magnetoestratigráfica, empregando tratamento a campos alternados, proporcionou insights valiosos sobre a polaridade magnética e possibilitou correlações globais. A presença de três reversões magnéticas está possivelmente associada ao final do Maastrichtiano (68,178 Ma) e ao período do Daniano (66,380 a 63,530 Ma). Entretanto, uma classificação precisa das magnetozonas requer restrições estratigráficas e as análises bioestratigráficas ainda estão pendentes para as amostras coletadas nesta seção. Isso faz com que a confiança dos dados não possa ser avaliada.

A mineralogia magnética, analisada por meio de curvas termomagnéticas, histereses e MRIs, destaca a presença predominante de minerais de baixa coercividade, que são magnetitas e titanomagnetitas, na trama magnética das rochas, especialmente PSDs. Além disso, em algumas amostras de lamitos foi identificada a presença de hematita nas histereses. Em suma, esta pesquisa proporcionou uma visão abrangente dos dados paleomagnéticos na Bacia de *San Joaquin*, contribuindo significativamente para o entendimento dos processos deposicionais.

REFERÊNCIAS

- Atwater, T. 1970. Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America. *GSA Bulletin*, 81: 3513–3536.
- Atwater, T., Stock, J. 1998. Pacific-north america plate tectonics of the neogene southwestern united states: An update. *International Geology Review*, 40: 375–402.
- Bailey, E. H., Irwin, W. P., Jones, D. L. 1964. Franciscan and related rocks, and their significance in the geology of western California. *California Division of Mines and Geology Bulletin*, 183: 177.
- Bartow, J. A. 1991. The Cenozoic evolution of the San Joaquin Valley, California: United States *Geological Survey Professional Paper*, 1501: 40.
- Bertotti, G. 1998. Magnetic Hysteresis. In: Bertotti, G. (Ed.). *Hysteresis in magnetism for physicists, materials scientists, and engineers*. Elsevier Academic Press, p. 3-30.
- Brown, L., McEnroe, S. 2011. Remanent Magnetism. In: Gupta, H.K. (Ed). *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, p. 1024-1030.
- Constable, C., Tauxe, L., 1990. The bootstrap for magnetic susceptibility tensor. *Journal Geophysics*, 764(95): 8383–8395.
- Day, R., Fuller, M., Schmidt. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13: 260–267.
- Dickinson, W. R. 1981. Plate tectonics and the continental margin of California. In: Ernst, W. G. (Ed.) *The geotectonic development of California*. Englewood Cliffs. Prentice-Hall, p. 1–28.
- Dinarès-Turell, J., Westerhold, T., Pujalte, V., Röhl, U., Kroon, D. 2014. Astronomical calibration of the Danian stage (Early Paleocene) revisited: Settling chronologies of sedimentary records across the Atlantic and Pacific Oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 119-131.
- Dunlop, D.J. 2002a. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3).
- Dunlop, D.J. 2002b. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3).

Egli, R., Zhao, X. 2015. Natural remanent magnetization acquisition in bioturbated sediment: general theory and implications for relative paleointensity reconstructions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(4): 995-1016.

Fisher, R. 1953. Dispersion on a Sphere. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 217(1130): 295–305.

Franco, D.R. 2007. Magnetoestratigrafia e análise espectral de ritmitos permocarboníferos da bacia do paran: influncias dos ciclos orbitais no regime deposicional. *Revista Brasileira de Geofsica*, 26: 240.

Graham, S.A. 1987. Tectonic controls on petroleum occurrence in central California. In: Ingersoll, R.V., Ernst, W.G. (Ed.). *Cenozoic Basin Development of Coastal California*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, vol. 6, p. 47-63.

Hailwood, E., Montgomery, P., Szurlies, M., Karloukovski, V., Urbat, M. 2010. Magnetostratigraphy and source dispersal directions in the Late Triassic Mungaroo Formation, Gorgon Field, Offshore NW Australia. Determined by magnetic methods. *APPEA Journal 50th Anniversary Issue*, 37: 388.

Hauger, E., Van Veen, P. 1995. Application of magnetostratigraphy to Brent Group reservoir zonation in the Visund Field. *Geological Society - Special Publications*, 98: 187-204.

Hrouda, F. 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical surveys*, 5(1): 37–82.

Hurst, A., Cartwright, J.A., Huuse, M., Duranti, D. 2006. Extrusive sandstones (extrudites): a new class of stratigraphic trap? In: Allen, M.R., Goffey, G.P., Morgan, R.K., Walker, I.M. (Ed), *The Deliberate Search for the Stratigraphic Trap*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 254, p. 289–300.

Hurst, A., Huuse, M., Duranti, D., Vigorito, M., Jameson, E. & Schwab, A. 2016. Application of Outcrop Analogues in Successful Exploration of a Sand Injection Complex, Volund Field, Norwegian North Sea. *Geological Society, London Special Publications*, 436.

Hurst, A., Morton, A., Scott, A., Vigorito, M. 2017. Heavy-mineral assemblages in sandstone intrusions: Panoche Giant Injection Complex, California, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 87: 388–405.

Hurst, A., Scott, A., Vigorito, M. 2011. Physical characteristics of sand injectites. *Earth-Science Reviews*, 106: 215–246.

Hurst, A.; cartwright, J. 2007. 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, 87, p. 1–19.

Huuse, M., Jackson, C.A.L., Van Rensbergen, P., Davies, R.J., Flemings, P.B., Dixon, R.J. 2010. Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 22: 342–360.

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

Ingersoll, R. V. 1979. Evolution of the Late Cretaceous forearc basin, northern and central California. *Geological Society of America Bulletin*, 90(9): 813–826.

Ingersoll, R. V. 1982. Initiation and evolution of the Great Valley forearc basin of northern and central California. In: Leggett, J. K. (Ed.). *Trench-forearc geology: sedimentation and tectonics on modern and ancient active plate margins*. Geological Society of London - Special Publications, vol. 10, p. 459–467.

Ingersoll, R. V. 2008. Subduction-Related Sedimentary Basins of the USA Cordillera. *Sedimentary Basins of the World*, 5: 395-428.

Ising, G. 1942. Den varviga lerans magnetiska egenskaper. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 64(2):126–142.

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

Jeleńska, M.; Kadziątko-Hofmokl, M. 1990. Dependence of anisotropy of magnetic susceptibility of rocks on temperature. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 62(1): 19 – 31.

Jelinek, V., 1977. *The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and its application*. Geofyzika, Brno, 88 p.

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

Kaufman, L. Rousseeuw, P. J. 1990. Partitioning Around Medoids (Program PAM). In: Kaufman, L. Rousseeuw, P. J. (Ed.). *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, p. 68-125.

Khramov A.N.1958. Paleomagnetism and Stratigraphic Correlation. *Gostoptechizdat, Leningrad*, 218 p.

Lanza, R., Meloni, A. 2006. Paleomagnetism. In: Lanza, R., Meloni, A. (Ed.). *The Earth's Magnetism: an introduction for geologists*, p. 127-176.

Lowrie, W. 2007. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, 390 p.

- McGuire, D.J. 1988. Depositional framework of the Upper Cretaceous-lower Tertiary Moreno Formation, central San Joaquin basin, California. *In: Graham, S.A. (Ed.). Studies of the geology of the San Joaquin basin*. Los Angeles, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, p. 173-188.
- Nilsen, T.H., Dibblee, T.W.J., Simoni, T.R. 1974. Stratigraphy and sedimentology of the Cantua Sandstone Member of the Lodo Formation, Vallecitos Area, California. U.S. *Geological Survey, SEPM Pacific Section*, 38–68.
- Ogg, J. 2020. Geomagnetic Polarity Time Scale. *Elsevier Academic press*, 1: 159-192.
- Opdyke, M. D., Channell, J. E. 1996. *Magnetic stratigraphy [S.I.]*. Elsevier Academic press, 64 p.
- Özdemir, Ö., Dunlop D.J. 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge, 573 p.
- Palladino, G., Alsop, G.I., Grippa, A., Zvirtes, G., Phillip, R.P., Hurst, A. 2018. Sandstone-filled normal faults: a case study from central California. *Journal of Structural Geology*, 110: 86–101.
- Payne, M.B. 1951. Type Moreno Formation and overlying Eocene strata on the west side of the San Joaquin Valley, Fresno and Merced Counties. *California Division of Mines, Geological Special Report*, 9: 29.
- Roberts, A.P., Cui Y., Verosub K.L. 1995. Wasp-waisted hysteresis loops: mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal Geophysics* 100: 17909-17924.
- Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C. 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Rev. Geophysics*, 30: 209.
- Sláma, J., Ušáková, M., Šoka, M., Dosoudil, R., & Jancárik, V. 2017. Hopkinson effect in soft and hard magnetic ferrites. *Acta Physica Polonica A*, 131(4): 762–764.
- Tarling, D. H., Hrouda, F. 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall, London, 217 p.
- Tauxe, L. 2005. *Lectures in Paleomagnetism*. Scripps Institution of Oceanography, 341 p.
- Tauxe, L., 2008. *Essential of Paleomagnetism*. University of California Press. 509 p.
- Thompson, R., Oldfield, F. 1986. *Environmental magnetism*. London: British Library Cataloguing in Publication Data, 202 p.

Trindade, R.I.F., Bouchez, J. L., Bolle, O., Nédélec, A., Peschler, A., Poitrasson, F. 2001. Secondary fabrics revealed by remanence anisotropy: Methodological study and examples from plutonic rocks. *Geophysical Journal International*, 147(2): 310–318.

Turner, G.M., Bryant, I.D. 1995. Application of a palaeomagnetic reversal stratigraphy to constrain well correlation and sequence stratigraphic interpretation of the Eocene C1 Sands, Maui Field, New Zealand. *Geological Society - Special Publications*, 98: 205-221.

Vigorito, M., Hurst, A. 2010. Regional sand injectite architecture as a record of pore-pressure evolution and sand redistribution in the shallow crust: insights from the Panoche Giant Injection Complex, California. *Journal of the Geological Society*, 167: 889–904.

Vigorito, M., Hurst, A., Cartwright, J.A., Scott, A. 2008. Regional-scale subsurface sand remobilization: geometry and architecture. *Journal of the Geological Society*, 165: 609–612.

Vigorito, M., Hurst, A., Scott, A., Stanzione, O., Grippa, A. 2022. A giant sand injection complex: Processes and implications for basin evolution and subsurface fluid flow. *American Journal of Science*, 322: 729-794.

Wentworth, C. M., Blake, M. C. Jr., Jones, D. L., Walter, A. W., Zoback, M. D. 1984. Tectonic wedging associated with emplacement of the Franciscan Assemblage, California Coast Ranges. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 43: 163–173.

Williams, W., Dunlop, D. J. 1995. Simulation of magnetic hysteresis in pseudo-single-domain grains of magnetite. *Journal of Geophysical Research*, 100(B3): 3859–3871.

Zvirtes, G., Hurst, A., Philipp, R.P., Palladino, G., Grippa, A. 2019. The Tumey Giant Injection Complex, California, USA. *Geological Society - Special Publication*, 493: 181 – 214.

APÊNDICE A - Dados de campo referentes a cada cilindro.

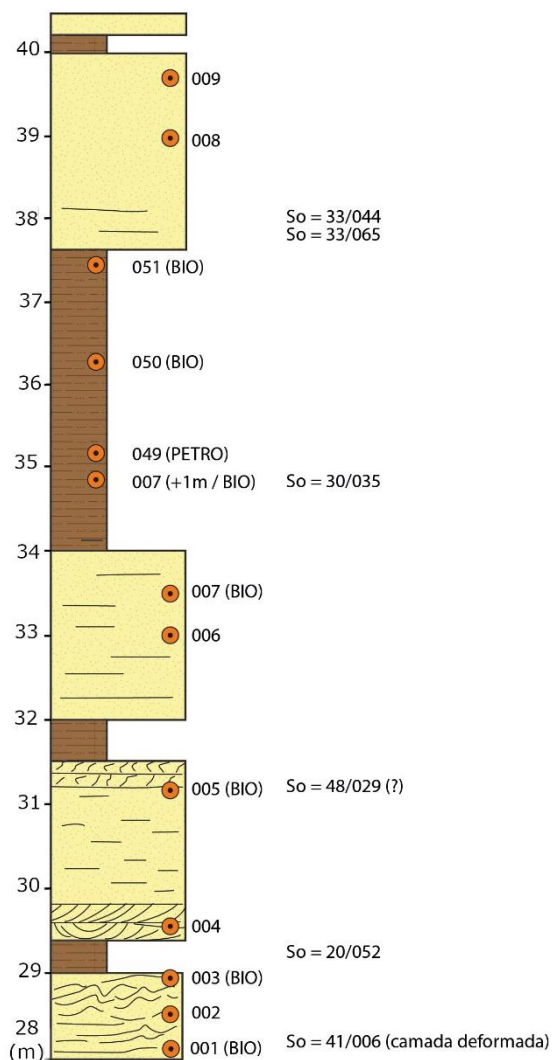
Sítio	Amostra	Azimute	Inclinação	Litologia	Atitude da camada
1	BCC_001A	20	59	Arenito	41/006
	BCC_001B	346	59		
	BCC_001C	333	69		
	BCC_002A	1	56		
	BCC_002B	347	47		
	BCC_002C	333	45		
	BCC_003A	307	71		
	BCC_003B	300	75		
BCC_003C	308	73			
2	BCC_004A	16	61	Arenito	48/029
	BCC_004B	4	60		
	BCC_004C	355	54		
	BCC_005A	338	72		
	BCC_005B	346	72		
BCC_005C	346	66			
3	BCC_006A	332	68	Arenito	48/029
	BCC_006B	7	75		
	BCC_006C	8	79		
	BCC_007A	38	61		
	BCC_007B	11	68		
BCC_007C	44	62			
4	BCC_049A	356	54	Lamito	30/035
	BCC_049B	4	49		
	BCC_049C	7	45		
	BCC_050A	347	60		
	BCC_050B	358	56		
	BCC_050C	7	47		
	BCC_051A	343	51		
	BCC_051B	17	44		
BCC_051C	357	55			
5	BCC_008A	354	72	Arenito	33/044
	BCC_008B	7	71		
	BCC_009A	62	577		
	BCC_009B	25	53		
	BCC_009C	32	51		
6	BCC_052A	3	47	Lamito	33/044
	BCC_052B	13	57		
	BCC_052C	13	57		
	BCC_053A	25	58		
	BCC_053B	37	85		
BCC_053C	25	69			
7	BCC_054A	33	45	Lamito	38/044
	BCC_054B1	17	65		
	BCC_054B2	17	65		
	BCC_055A	345	55		
	BCC_055B	358	52		
8	BCC_010A	37	45	Arenito	33/050
	BCC_010B	38	41		
	BCC_010C	29	41		
9	BCC_011A	27	52	Arenito	33/050
	BCC_011B	26	57		
	BCC_011C	20	55		
10	BCC_012A	31	63	Arenito	33/050
	BCC_012B	10	60		
	BCC_012C	19	68		

11	BCC_013A	2	46	Arenito	33/050
	BCC_013B1	358	49		
	BCC_013B2	358	49		
	BCC_013C	358	49		
12	BCC_014A	3	75	Arenito	29/041
	BCC_014B	8	73		
	BCC_014C	12	74		
13	BCC_015A	11	75	Arenito	22/043
	BCC_015B	11	61		
	BCC_015C	349	62		
14	BCC_016A	22	39	Arenito	22/043
	BCC_016B	24	49		
15	BCC_017A	4	61	Lamito	37/043
	BCC_017B	3	62		
	BCC_017C	355	62		
16	BCC_043A	28	90	Lamito	37/043
	BCC_043B	28	90		
17	BCC_044A	48	90	Arenito	37/043
	BCC_044B	48	90		
18	BCC_045A	350	79	Lamito	37/043
	BCC_045B	351	83		
19	BCC_018A	40	62	Arenito	31/040
	BCC_018B	35	58		
	BCC_018C	36	49		
	BCC_019A	301	72		
	BCC_019B	302	85		
	BCC_019C	295	73		
	BCC_020A	6	65		
BCC_020B	342	66			
20	BCC_046A	322	90	Lamito	31/040
	BCC_046B	322	90		
21	BCC_021A	120	76	Arenito	31/040
	BCC_021B	126	73		
	BCC_021C	58	70		
	BCC_022A	95	66		
	BCC_022B	91	77		
	BCC_022C	87	84		
	BCC_047A	60	90		
BCC_047B	60	90			
22	BCC_048A	20	65	Lamito	33/042
	BCC_048B	19	63		
23	BCC_023A1	17	77	Arenito	30/037
	BCC_023A2	17	77		
	BCC_023B	20	76		
	BCC_023C	15	73		
	BCC_024A	34	49		
	BCC_024B	18	60		
	BCC_024C	349	72		
	BCC_025A	353	24		
	BCC_025B	6	35		
BCC_025C	8	37			
24	BCC_026A	355	90	Lamito	33/033
	BCC_026B	355	90		
25	BCC_027A	358	90	Lamito	33/033
	BCC_027B	358	90		
26	BCC_028A	357	90	Lamito	33/033
	BCC_028B	357	90		
	BCC_029A	355	90		
	BCC_029B	355	90		
	BCC_030A	357	90		
	BCC_030B	357	90		
	BCC_031A	351	90		
BCC_031B	351	90			
27	BCC_032A	355	90	Arenito	32/035
	BCC_032B	355	90		
28	BCC_033A	352	90	Arenito	32/035
	BCC_033B	352	90		

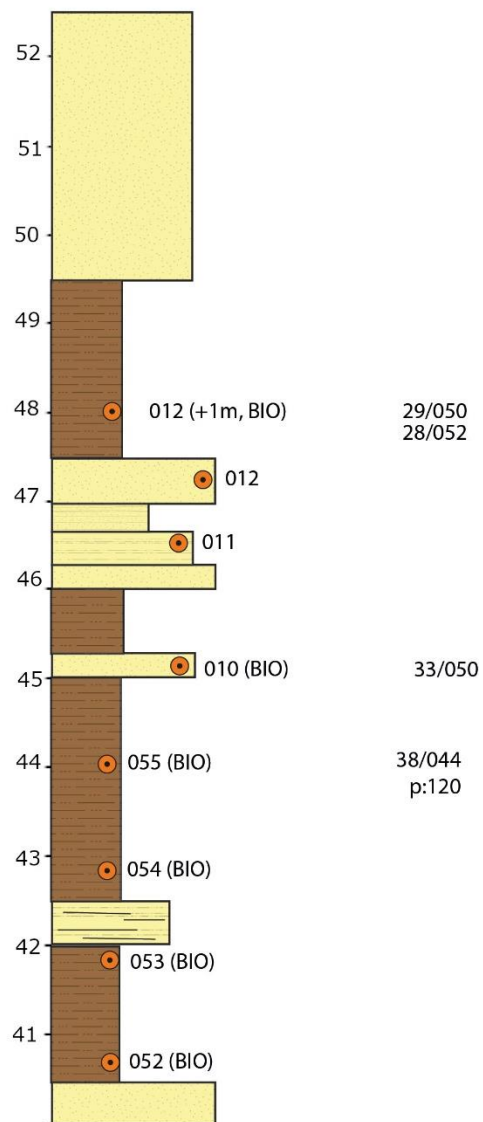
29	BCC_034A1	30	52	Arenito	32/035
	BCC_034A2	30	52		
	BCC_34B1	27	56		
	BCC_34B2	27	56		
	BCC_034C	21	68		
	BCC_035A1	99	60		
	BCC_035A2	99	60		
	BCC_035B	112	43		
30	BCC_035C1	116	46	Lamito	39/045
	BCC_035C2	116	46		
31	BCC_036A	20	90	Lamito	39/045
	BCC_036B	20	90		
32	BCC_037A	24	90	Arenito	39/045
	BCC_037B	24	90		
32	BCC_038A	20	64	Lamito	39/045
	BCC_038B	4	71		
	BCC_038C	3	64		
33	BCC_039A	125	44	Arenito	35/040
	BCC_039B	110	53		
	BCC_039C	91	60		
	BCC_039D	50	58		
	BCC_039E	32	41		
	BCC_039F	40	42		
34	BCC_039G	31	44	Arenito	
	BCC_040A1	111	25		
	BCC_040A2	111	25		
	BCC_040B1	66	60		
	BCC_040B2	66	60		
	BCC_040C	63	45		
	BCC_040D1	42	45		
	BCC_040D2	42	45		
	BCC_040E1	329	64		
	BCC_040E2	329	64		
	BCC_040F1	295	31		
	BCC_040F2	295	31		
	BCC_040G1	323	33		
	BCC_040G2	323	33		
	BCC_040H	322	30		
BCC_040I	258	50			
BCC_040J	256	45			
BCC_040K	154	51			
BCC_040L	29	53			
35	BCC_041A1	9	44	Lamito	
	BCC_041A2	9	44		
	BCC_041B1	358	56		
	BCC_041B2	358	56		
	BCC_041C1	22	59		
BCC_041C2	22	59			
36	BCC_042A1	45	37	Lamito	
	BCC_042A2	45	37		
	BCC_042A3	45	37		
	BCC_042B1	24	43		
	BCC_042B2	24	43		
	BCC_042B3	24	43		
	BCC_042C1	26	52		
	BCC_042C2	26	52		
BCC_042C3	26	52			
37	BCC_056A	34	90	Arenito	
	BCC_056B	34	90		
	BCC_057A	14	90		
	BCC_057B	14	90		
	BCC_058A	19	60		
	BCC_058B	11	71		
	BCC_058C	10	67		
	BCC_059A	69	25		
	BCC_059B	42	31		
BCC_059C	41	30			

APÊNDICE B – Folhas com seções estratigráficas.

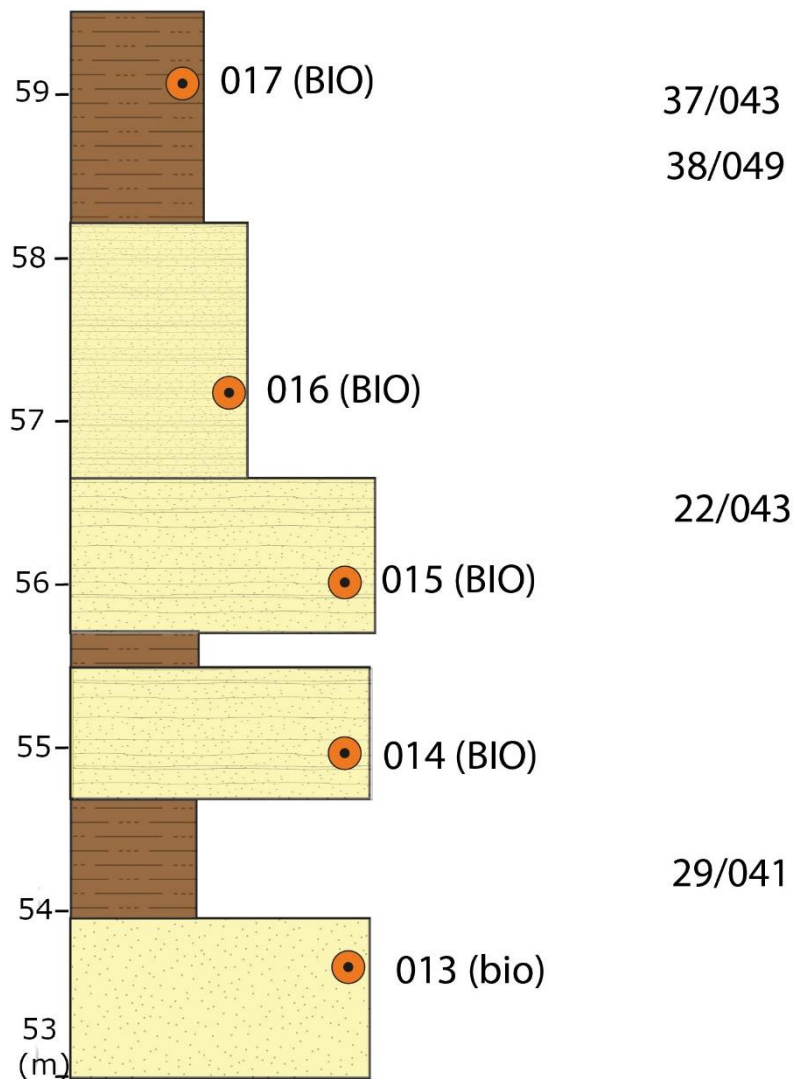
Folha 1



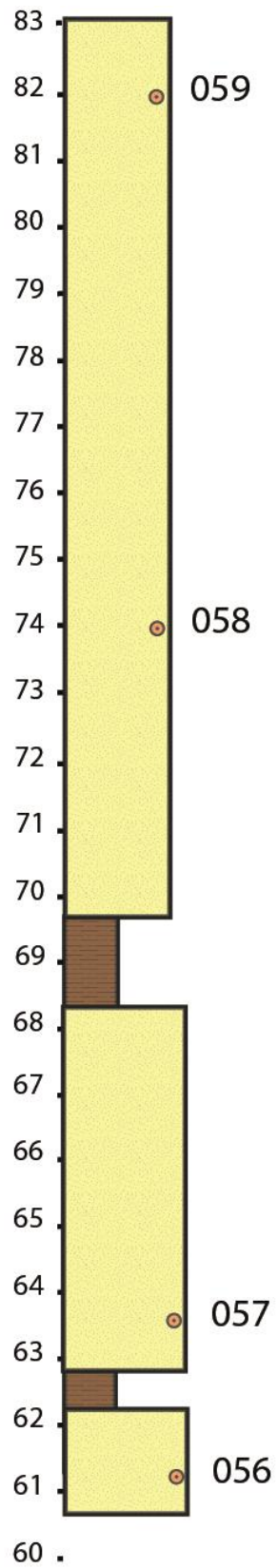
Folha 2



Folha 3

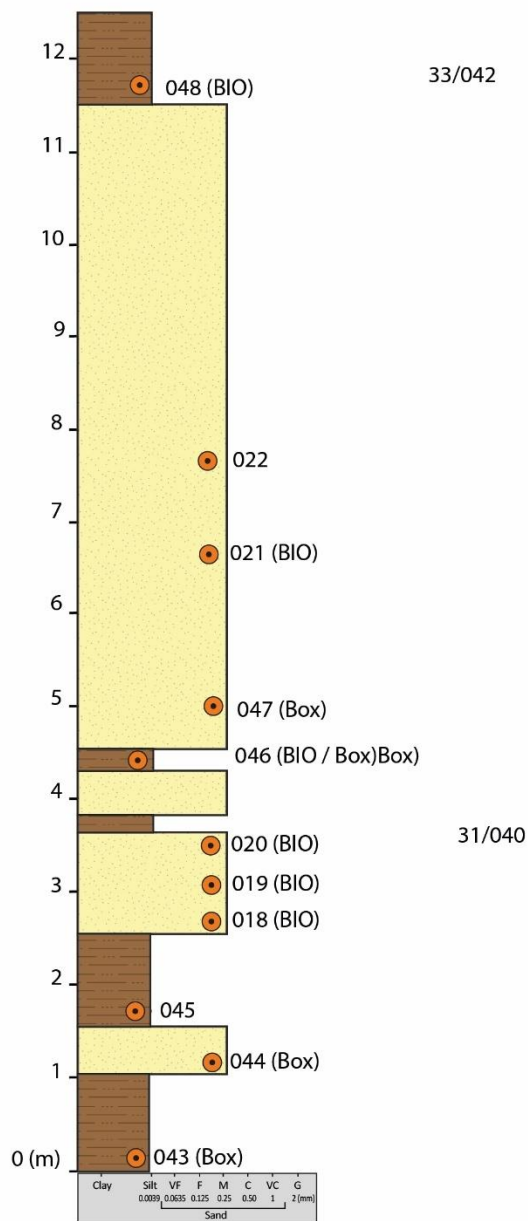


Folha 8

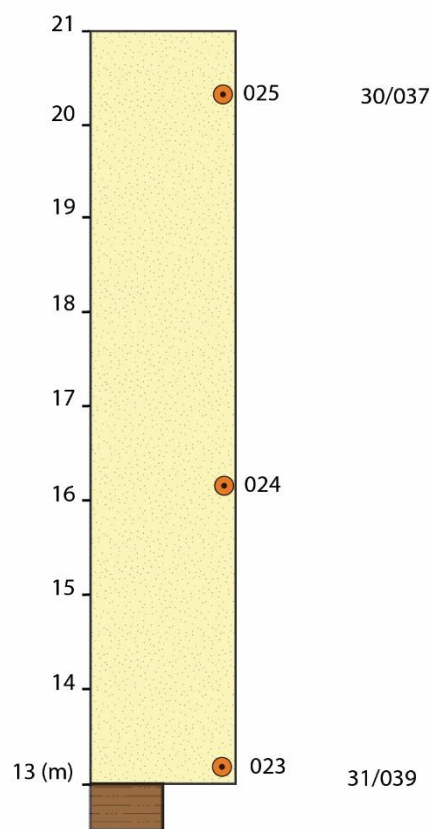


30/048

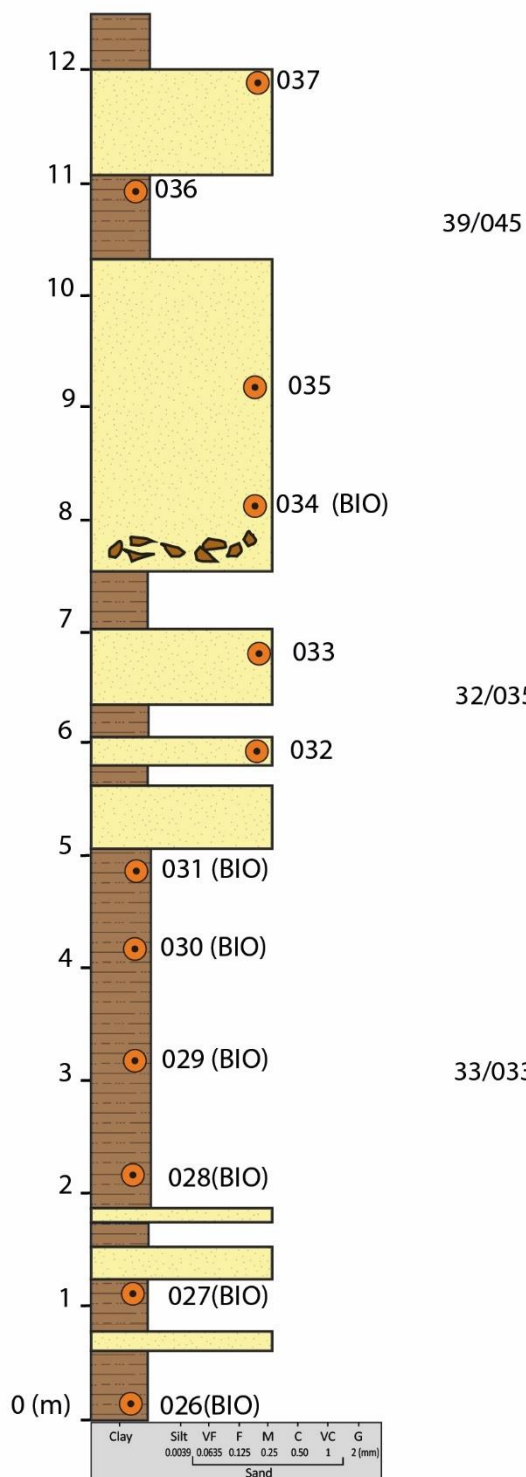
Folha 4



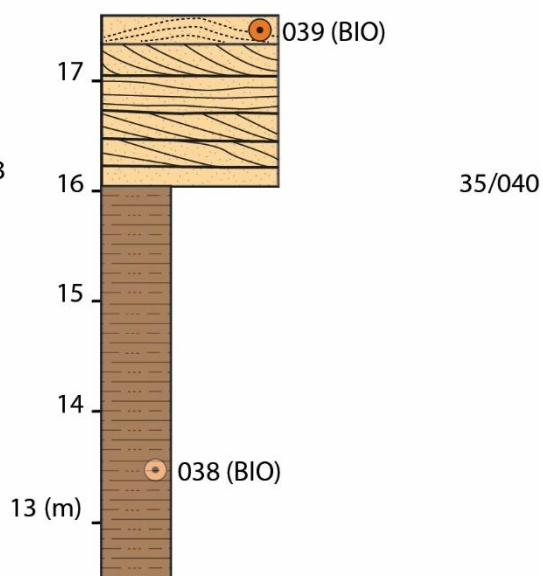
Folha 5



Folha 6



Folha 7



APÊNDICE C - Dados calculados a partir das desmagnetizações AF.

Amostra	Dec (°)	Inc (°)	MAD (°)	Limite 1 (mT)	Limite 2 (mT)	NRM normalizado
017A	204.4	77.3	7.8	5	60	8.33E-02
017B	280.4	62.6	7.6	5	50	1.00E-01
017C	329.1	57.8	11.2	15	30	5.00E-01
016A	357.3	78.9	5.8	5	70	7.14E-02
016B	46.8	65.3	1.9	5	70	7.14E-02
015A	16.8	56.6	7.4	5	45	1.11E-01
015B	2.7	64	3.6	5	70	7.14E-02
015C	18.2	59.5	2.7	5	70	7.14E-02
014A	10	46.3	11	5	20	2.50E-01
014B	226.1	71.2	11.1	10	30	3.33E-01
014C	87.1	60.5	9.2	5	25	2.00E-01
013A	52.8	82.3	9	5	35	1.43E-01
013B2	136.9	52.6	7.7	5	30	1.67E-01
013C	122.1	32.9	4.1	15	30	5.00E-01
012A	185.5	74.8	4.6	5	50	1.00E-01
012B	221.2	79.2	4.9	5	50	1.00E-01
012C	324	79.4	4.4	5	45	1.11E-01
011A	194.2	77.2	8.4	5	30	1.67E-01
011B	354	78.5	9.8	5	20	2.50E-01
011C	23.5	14.2	4.8	10	25	4.00E-01
010A	295.7	65.7	14.3	10	25	4.00E-01
010B	310.9	17.9	9.5	30	45	6.67E-01
010C	117.8	37.9	9.3	10	25	4.00E-01
055A	81.6	68.3	1.3	5	55	9.09E-02
055B	70.7	76.7	2.5	5	60	8.33E-02
054A	100.7	70.6	1.8	5	60	8.33E-02
054B1	119.8	78.7	1.6	5	50	1.00E-01
054B2	91.9	74	1.2	5	60	8.33E-02
053A	19.9	68.3	1.3	5	60	8.33E-02
053B	33.4	69.9	1.7	5	80	6.25E-02
053C	30.5	73.4	1.8	5	70	7.14E-02
052A	326.8	74.1	1.8	5	70	7.14E-02
052B	63.6	77.9	1.6	5	50	1.00E-01
052C	32.5	68.3	1.7	5	60	8.33E-02
009A	10.3	-30.5	13.1	20	35	5.71E-01
009B	101.9	30.2	7.6	5	20	2.50E-01
009C	10.9	65	8.7	10	25	4.00E-01
051A	18	65.3	5.9	5	25	2.00E-01
051B	23.3	65.9	2.6	5	45	1.11E-01
051C	41.5	68.1	2.3	5	40	1.25E-01
050A	47.8	72.8	3.7	10	45	2.22E-01
050B	17.4	63.8	3.4	5	40	1.25E-01
050C	19	71.8	2.6	5	45	1.11E-01
049A	36.2	67.4	2	5	30	1.67E-01
049B	27.1	51	1.9	5	30	1.67E-01

049C	32.6	55.8	4.2	5	40	1.25E-01
007A	128.4	66.5	5.9	10	45	2.22E-01
007B	84.5	28.9	7.1	10	25	4.00E-01
007C	72	7.6	9.1	10	30	3.33E-01
006A	98.7	42.6	10.7	10	35	2.86E-01
006B	84.4	53.5	5.8	15	45	3.33E-01
006C	57.8	67.9	11	5	20	2.50E-01
005A	143	52.7	8.8	5	25	2.00E-01
005B	47.3	43.6	9.8	5	20	2.50E-01
004A	158.2	50.3	8.3	10	20	5.00E-01
004B	61.7	75.9	9.3	5	35	1.43E-01
004C	89.8	61.1	8.8	5	25	2.00E-01
003A	80.1	55.7	12.8	5	30	1.67E-01
003C	46.3	48.2	8	5	35	1.43E-01
002A	64.5	51.2	9.6	5	15	3.33E-01
002B	294.3	71	8.4	5	20	2.50E-01
002C	0.2	46.2	6.4	10	25	4.00E-01
001A	39.7	33.3	11.2	5	15	3.33E-01
001B	267.2	45.4	6.4	45	55	8.18E-01
001C	44.2	52	10.2	15	30	5.00E-01
025A	128.4	39.6	11.3	15	30	5.00E-01
025B	227.1	47.2	8.6	5	20	2.50E-01
025C	86	9	10	30	45	6.67E-01
024A	59.5	55.9	12.9	5	20	2.50E-01
024B	78.1	41.5	9.5	5	25	2.00E-01
024C	31.3	70.4	10	5	20	2.50E-01
023A1	65.5	7.3	7.8	10	25	4.00E-01
023A2	86	-27.2	8.2	15	30	5.00E-01
023B	32.5	-35.7	7.9	15	55	2.73E-01
023C	8.5	28.2	14.1	5	15	3.33E-01
048A	359.7	68.6	1.5	5	35	1.43E-01
048B	33.2	67.4	1.9	5	30	1.67E-01
022A	196.8	-61.3	9.8	5	25	2.00E-01
022B	28.3	-65.8	5.4	5	20	2.50E-01
022C	339.1	-69.8	12	35	50	7.00E-01
021A	216.5	78.8	8.6	5	25	2.00E-01
021B	103.3	77	5.8	5	20	2.50E-01
021C	16.1	43.1	6.1	5	80	6.25E-02
047A	325.5	62.9	4	15	30	5.00E-01
047B	340.2	68.3	5.9	5	15	3.33E-01
046A	341.3	80.1	2.2	5	45	1.11E-01
046B	30.5	65.7	4.5	5	60	8.33E-02
020A	24.2	79	8.6	5	25	2.00E-01
020B	22.3	59.6	5.6	5	20	2.50E-01
019B	129.7	82.5	6.4	10	30	3.33E-01
019C	18.9	47	11.8	5	20	2.50E-01

018A	100.9	23	9.6	10	25	4.00E-01
018B	61	43.1	8.3	5	25	2.00E-01
018C	134.9	88.5	10.5	20	35	5.71E-01
045A	22.2	63.9	2.6	5	60	8.33E-02
045B	36.7	73.6	2.2	5	80	6.25E-02
044A	335.5	63.4	7.5	5	30	1.67E-01
043A	81.1	81.1	6.8	5	35	1.43E-01
043B	82.5	60	2.3	5	30	1.67E-01
039A	110	57.9	7.1	5	25	4.18E-02
039B	31.7	48.4	5.3	5	20	7.02E-02
039C	98.4	56.1	10	5	25	9.12E-02
039D	359.3	46.3	8.3	5	45	8.26E-02
039E	38.9	66.9	4.6	5	60	1.02E-01
039F	313.8	85.3	8.2	5	30	7.62E-02
039G	98.8	13.3	6.9	5	25	4.98E-02
038A	175.3	80	3.1	5	55	7.51E-02
038B	85.7	79.4	2.9	5	60	8.54E-02
038C	69.1	70.7	1.8	5	70	1.01E-01
037A	315.6	52.1	9.3	5	40	4.18E-02
037B	330.1	-68.2	5.1	5	40	1.52E-02
036A	70.5	48.7	9	5	25	3.39E-02
036B	111.9	82.5	9	5	50	3.97E-02
035A	10.7	-2.8	9.6	5	20	7.50E-02
035A2	109.1	-32.3	8.7	5	20	7.12E-02
035B	357.1	12.8	10.5	5	25	6.58E-02
035C1	86.1	-2.4	11.4	5	20	3.63E-02
035C2	102.8	84.3	5	5	25	4.13E-02
034A1	52.1	72.4	9.6	5	35	3.90E-02
034A2	32.2	80.5	9.2	10	25	1.85E-01
034B2	43.2	49	9	10	30	6.08E-02
034C	34.8	56	9.5	5	25	5.27E-02
033A	58.4	23.9	7.4	5	20	1.50E-02
033B	163	83.3	9.4	25	35	2.68E-02
032A	29.2	61	2.5	5	90	1.54E-01
032B	2.9	48.7	6.8	10	40	4.91E-02
031A	34.5	57.7	0.8	5	90	2.29E-01
031B	344.5	75.6	0.5	5	80	4.53E-01
030A	51.6	59.7	2.8	5	50	2.97E-02
030B	35.2	68	2.8	5	40	4.64E-02
029A	57.5	42.6	2.7	5	40	2.76E-02
029B	33.1	42.7	3.3	5	50	2.40E-02
028A	22.7	83.8	2	5	40	5.41E-02
028B	25.6	50.5	2.3	5	55	5.48E-02
027A	39.3	56.9	4.2	5	50	4.88E-02
027B	16.7	62.7	2.9	5	50	4.04E-02
026A	33.1	68.2	8.8	5	55	2.18E-02
026B	355.9	32.3	8.9	5	60	3.15E-02

APÊNDICE D - Dados de mineralogia magnética.

Amostra	Hc	Hcr	Ms	Mrs	Hcr/Hc	Mrs/Ms
BCC_001A	1.066E-02	3.586E-02	2.418E-03	2.411E-04	3.363E+00	9.971E-02
BCC_002A	1.160E-02	3.913E-02	1.713E-03	1.780E-04	3.374E+00	1.039E-01
BCC_003A	5.783E-03	2.194E-02	5.867E-03	3.128E-04	3.794E+00	5.332E-02
BCC_004A	8.832E-03	3.493E-02	1.340E-03	1.633E-04	3.954E+00	1.219E-01
BCC_005C	9.574E-03	3.324E-02	1.419E-03	1.694E-04	3.472E+00	1.193E-01
BCC_006B	1.224E-02	4.382E-02	1.002E-03	1.210E-04	3.579E+00	1.208E-01
BCC_007A	2.009E-02	1.100E-01	1.365E-03	2.345E-04	5.475E+00	1.718E-01
BCC_007C	-1.713E-01	3.768E-02	1.599E-03	2.116E-04	2.200E-01	1.323E-01
BCC_008A	1.039E-02	2.241E-02	2.118E-03	3.454E-04	2.156E+00	1.631E-01
BCC_009C	1.161E-02	3.948E-02	1.577E-03	1.712E-04	3.400E+00	1.086E-01
BCC_010B	7.199E-03	1.519E-02	5.578E-03	6.701E-04	2.111E+00	1.201E-01
BCC_011C	1.258E-02	3.799E-02	1.123E-03	1.652E-04	3.021E+00	1.471E-01
BCC_012A	1.221E-02	3.053E-02	1.826E-03	2.587E-04	2.500E+00	1.417E-01
BCC_013A	1.166E-02	3.838E-02	1.523E-03	1.629E-04	3.293E+00	1.069E-01
BCC_014A	1.097E-02	2.731E-02	1.734E-03	2.148E-04	2.490E+00	1.239E-01
BCC_015C	-1.627E-01	4.499E-02	7.841E-04	9.115E+01	2.766E-01	1.162E-01
BCC_016B	-1.035E-01	3.742E-02	1.137E-03	1.563E-04	3.616E-01	1.374E-01
BCC_017A	1.271E-02	3.633E-02	1.188E-03	1.811E-04	2.858E+00	1.524E-01
BCC_018C	1.175E-02	3.663E-02	1.281E-03	1.496E-04	3.116E+00	1.168E-01
BCC_019A	1.045E-02	2.257E-02	2.952E-03	3.950E-04	2.159E+00	1.338E-01
BCC_020A	1.137E-02	3.383E-02	1.272E-03	1.401E-04	2.976E+00	1.101E-01
BCC_021A	1.028E-02	3.622E-02	1.444E-03	1.668E-04	3.523E+00	1.155E-01
BCC_022C	1.213E-02	3.589E-02	1.151E-03	1.490E-04	2.959E+00	1.295E-01
BCC_023B	1.263E-02	3.668E-02	1.810E-03	2.531E-04	2.905E+00	1.398E-01
BCC_024A	1.156E-02	3.595E-02	1.544E-03	1.645E-04	3.109E+00	1.065E-01
BCC_025A	9.918E-03	2.881E-02	2.302E-03	2.645E-04	2.904E+00	1.149E-01
BCC_026A	1.994E-02	4.309E-02	1.271E-03	1.140E-04	2.161E+00	8.966E-02
BCC_027A	9.304E-03	3.017E-02	2.652E-03	2.174E-04	3.242E+00	8.198E-02
BCC_028A	-4.907E-02	4.668E-02	1.003E-03	1.383E-04	9.512E-01	1.380E-01
BCC_029A	1.027E-02	3.908E-02	8.735E-04	9.932E+01	3.807E+00	1.137E-01
BCC_030A	1.255E-02	4.491E-02	9.438E-04	1.294E-04	3.579E+00	1.371E-01
BCC_031A	1.259E-01	3.299E-01	3.193E-03	1.697E-03	2.620E+00	5.315E-01
BCC_032A	3.566E-02	1.274E-01	3.554E-03	7.913E-04	3.573E+00	2.227E-01
BCC_033A	1.332E-02	4.076E-02	1.677E-03	2.078E-04	3.059E+00	1.239E-01
BCC_034C	1.166E-02	4.268E-02	1.438E-03	1.583E-04	3.659E+00	1.100E-01
BCC_035B	1.197E-02	3.563E-02	2.211E-03	2.941E-04	2.978E+00	1.330E-01
BCC_036A	-2.404E-01	3.978E-02	1.624E-03	1.851E-04	1.655E-01	1.140E-01
BCC_038C	1.097E-02	3.823E-02	1.026E-03	1.220E-04	3.485E+00	1.189E-01
BCC_039A	9.637E-03	3.577E-02	2.152E-03	2.206E-04	3.711E+00	1.025E-01
BCC_039C	-1.789E-01	3.567E-02	2.024E-03	2.127E-04	1.994E-01	1.051E-01
BCC_039G	9.340E-03	2.152E-02	3.138E-03	3.957E-04	2.304E+00	1.261E-01
BCC_040J	1.131E-02	4.153E-02	1.653E-03	2.139E-04	3.671E+00	1.294E-01

BCC_040K	1.302E-02	3.853E-02	1.696E-03	2.097E-04	2.958E+00	1.236E-01
BCC_040L	9.164E-03	3.146E-02	3.504E-03	3.572E-04	3.432E+00	1.019E-01
BCC_043A	-6.966E-02	4.201E-02	1.075E-03	1.321E-04	6.031E-01	1.229E-01
BCC_044A	1.283E-02	4.163E-02	1.380E-03	1.773E-04	3.246E+00	1.284E-01
BCC_045A	1.031E-02	4.526E-02	6.692E-04	7.587E+01	4.389E+00	1.134E-01
BCC_046A	1.009E-02	3.614E-02	8.697E-04	1.032E-04	3.584E+00	1.187E-01
BCC_047A	1.246E-02	4.088E-02	2.177E-03	2.570E-04	3.281E+00	1.181E-01
BCC_048A	1.013E-02	3.910E-02	9.802E-04	9.651E+01	3.862E+00	9.845E-02
BCC_048B	8.730E-03	2.799E-02	2.989E-03	2.255E-04	3.206E+00	7.546E-02
BCC_049B	1.085E-02	3.832E-02	9.041E-04	9.563E+00	3.532E+00	1.058E-01
BCC_050A	1.009E-02	4.274E-02	1.079E-03	8.389E+01	4.235E+00	7.772E-02
BCC_050C	1.069E-02	3.867E-02	9.595E-04	1.095E-04	3.617E+00	1.141E-01
BCC_051B	-1.384E-01	3.871E-02	1.087E-03	1.282E-04	2.797E-01	1.179E-01
BCC_052B	-5.799E-02	3.788E-02	1.194E-03	1.351E-04	6.533E-01	1.131E-01
BCC_053B	1.150E-02	3.359E-02	1.242E-03	1.697E-04	2.922E+00	1.367E-01
BCC_055A	8.422E-03	2.718E-02	4.587E-03	3.767E-04	3.227E+00	8.212E-02
BCC_056A	-1.701E-01	4.980E-02	1.740E-03	2.500E-04	2.929E-01	1.437E-01
BCC_057A	1.082E-02	3.806E-02	1.401E-03	1.537E-04	3.517E+00	1.097E-01
BCC_058B	1.160E-02	4.715E-02	1.891E-03	2.134E-04	4.064E+00	1.128E-01
BCC_059A	1.705E-02	5.834E-02	1.994E-03	3.346E-04	3.422E+00	1.678E-01
BCC_037A1	-3.172E-01	1.914E-01	1.655E-03	4.120E-04	6.036E-01	2.489E-01
BCC_037A2	1.230E-02	3.456E-02	2.666E-03	3.476E-04	2.810E+00	1.304E-01
BCC_040A1	1.134E-02	4.135E-02	3.569E-03	3.556E-04	3.647E+00	9.963E-02
BCC_041A2	6.937E-03	3.486E-02	4.274E-03	3.190E-04	5.025E+00	7.463E-02
BCC_041C2	1.139E-02	4.487E-02	2.380E-03	2.598E-04	3.938E+00	1.092E-01
BCC_042C1	8.032E-03	2.197E-02	4.637E-03	4.895E-04	2.735E+00	1.056E-01
BCC_054B1	-1.814E-01	4.226E-02	1.269E-03	1.272E-04	2.329E-01	1.003E-01