

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

STEPHANIE LANSONI TABORDA

**ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM) APLICADA NA
DETERMINAÇÃO DO FLUXO MAGMÁTICO DE DIQUES BÁSICOS ASSOCIADOS
AO GRUPO SERRA GERAL, NORDESTE DO RS**

Porto Alegre

2023

STEPHANIE LANSONI TABORDA

**ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM) APLICADA NA
DETERMINAÇÃO DO FLUXO MAGMÁTICO DE DIQUES BÁSICOS ASSOCIADOS
AO GRUPO SERRA GERAL, NORDESTE DO RS**

Trabalho de Conclusão do 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: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer
Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Taborda, Stephanie Lansoni
ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM)
APLICADA NA DETERMINAÇÃO DO FLUXO MAGMÁTICO DE DIQUES
BÁSICOS ASSOCIADOS AO GRUPO SERRA GERAL, NORDESTE DO
RS / Stephanie Lansoni Taborda. -- 2023.
69 f.
Orientador: Carlos Augusto Sommer.

Coorientador: Jairo Francisco Savian.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Vulcanismo. 2. Petrofábrica. 3. Magnetismo de
rocha. 4. Fluxo de magma. 5. Mineralogia magnética. I.
Sommer, Carlos Augusto, orient. II. Savian, Jairo
Francisco, coorient. III. Título.

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

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM) APLICADA NA DETERMINAÇÃO DO FLUXO MAGMÁTICO DE DIQUES BÁSICOS ASSOCIADOS AO GRUPO SERRA GERAL, NORDESTE DO RS”, elaborado por “STEPHANIE LANSONI TABORDA” apresentado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Porto Alegre, 27 de março de 2023.

Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Cassiana Michelin (UFRGS)

Profa. Msc. Andrea Sander (CPRM)

Dr. Fernando Rios (UFRGS)

“Ninguém que é curioso é idiota. As pessoas que não fazem perguntas permanecem ignorantes para o resto da vida”

Neil DeGrasse Tyson

AGRADECIMENTOS

Agradeço à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) pelo apoio financeiro (proc. 21/2551-0002036-9). À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por ter tido a oportunidade de estudar em uma universidade pública de excelência, não apenas em qualidade de ensino, mas também em termos de infraestrutura e pesquisa.

Aos meus orientadores Carlos Sommer e Jairo Savian, pelos ensinamentos e por todo o comprometimento no desenvolvimento do projeto. Principalmente, obrigada pela oportunidade de poder desenvolver este trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Paleomagnetismo (IAG-USPmag), da Universidade de São Paulo, obrigada por toda a recepção, trocas de conhecimentos e pela oportunidade de poder processar os meus dados. Em especial, ao Ualisson pelo treinamento, risadas e toda a ajuda no processamento dos dados pós-laboratório.

Aos amigos que fiz na graduação, obrigada por tornarem a Geologia mais leve. Melissa, obrigada por todas as conversas, e áudios, geológicos e sobre a vida. Alana, obrigada por todos esses anos de graduação e por tornar o processo do TCC menos solitário. Camila, mesmo não sendo da graduação e sim da pós, muito obrigada pela ajuda na preparação das amostras e pela ajuda através do *meet* na interpretação dos resultados.

À minha pessoa, Juliane, por ser a melhor amiga que eu podia ter. Obrigada por todos esses anos de amizade, por me escutar falar de geologia mesmo sem entender, e por saber que eu sempre vou ter uma amiga maravilhosa pra quem contar nas horas ruins e boas.

Agradeço aos meus pais, Márcia e Luiz, por sempre me apoiarem e me incentivarem a ir atrás dos meus sonhos e a acreditar no meu potencial. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu não acreditava. Estou aonde estou graças a vocês.

RESUMO

A Província Magmática Paraná-Etendeka (133 Ma) localiza-se, em sua maior parte, na América do Sul, com menor área na África, representando a segunda maior província magmática continental do mundo. No Brasil, esta província é conhecida estratigraficamente como Grupo Serra Geral que é constituído predominantemente por rochas vulcânicas básicas. Intrusões básicas na forma de diques e soleiras são comuns nesta unidade. São importantes porque refletem os mecanismos de colocação dos derrames associados à Província Magmática Paraná-Etendeka. O objetivo desta pesquisa é, através dos dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) e mineralogia magnética, identificar a direção de fluxo e os mecanismos de transporte das intrusões básicas associadas aos depósitos vulcânicos do Grupo Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. A metodologia envolveu uma etapa de campo, nas quais foram realizadas descrições de afloramentos associado a coleta de amostras orientadas para a ASM e para a obtenção da mineralogia magnética, utilizando as curvas de histerese e de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI). Estes corpos são intrusivos nos arenitos da Formação Botucatu com direção preferencial NE-SW, que bordejam a unidade vulcânica. Também é comum a ocorrência de diques e soleiras cortando os derrames *pahoehoe* basais, com direções preferenciais NE-SW. Morfológicamente os diques podem ser separados em simétricos e assimétricos e as espessuras variam de 0,30 à 8 metros. Os simétricos têm geometria tabular e bordas retas, enquanto os assimétricos possuem um padrão anastomosado, com bordas difusas e irregulares e espessuras variáveis dentro do mesmo corpo. Nas porções de contato dos corpos intrusivos, observa-se uma textura equigranular fina a afanítica, e nas porções centrais a textura predominante é a equigranular fina a média. Os resultados obtidos de mineralogia magnética demonstram que a susceptibilidade magnética das intrusões é da ordem de 10^{-2} . Esses dados apontam para uma contribuição de minerais ferromagnéticos. As curvas de histerese são características de minerais de baixa coercividade, como a magnetita. A foliação magnética obtida para as 11 intrusões analisadas possui direção preferencial NE-SW. A inclinação do eixo magnético K_1 indica que o *emplacement* destas intrusões foi por fluxos inclinados ($30^\circ < K_1 < 60^\circ$), podendo indicar que a fonte de magma estava perto.

Palavras-Chave: Vulcanismo. Petrofábrica. Magnetismo de rocha. Fluxo de magma. Mineralogia Magnética.

ABSTRACT

The Paraná-Etendeka Magmatic Province (133 Ma) is located, for the most part, in South America, with a smaller area in Africa, representing the second largest continental magmatic province in the world. In Brazil, this province is known stratigraphically as the Serra Geral Group, which is predominantly formed of basic volcanic rocks. Basic intrusions in the form of dykes and sills are common in this unit. They are important because they reflect the emplacement mechanisms of flows associated with the Paraná-Etendeka Magmatic Province. The objective of this research is, through Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and magnetic mineralogy data, to identify the flow direction and the transport mechanisms of the basic intrusions associated with the volcanic deposits of the Serra Geral Group in the northeast region of Rio Grande do Sul. The methodology involved a field stage, in which outcrop descriptions were carried out associated with the collection of samples oriented towards the AMS and to obtain the magnetic mineralogy, using the hysteresis curves and acquisition of isothermal remanent magnetization curves (MRI). These bodies are intrusive in the Botucatu Formation sandstones with preferential NE-SW direction that border the volcanic unit. The occurrence of dykes and sills cutting through the basal pahoehoe flows is also common, with NE-SW preferred directions. Morphologically, the dykes can be separated into symmetrical and asymmetrical and the thickness varies from 0.30 to 8 meters. Symmetrical intrusions have tabular geometry and straight edges, while asymmetrical ones have an anastomosed pattern, with diffuse and irregular edges and variable thicknesses within the same body. In the contact portions of the intrusive bodies, a fine to aphanitic equigranular texture is observed, and in the central portions the predominant texture is fine to medium equigranular. The results obtained from magnetic mineralogy demonstrate that the magnetic susceptibility of the intrusions is of the order of 10^{-2} . These data point to a contribution of ferromagnetic minerals. Hysteresis curves are characteristic of low coercivity minerals such as magnetite. The magnetic foliation obtained for the 11 analyzed intrusions has a preferred NE-SW direction. The inclination of the K_1 magnetic axis indicates that the emplacement of these intrusions was by inclined flows ($30^\circ < K_1 < 60^\circ$), which could indicate that the magma source was nearby.

Palavras-Chave: Volcanism. Petrofabric. Rock-magnetism. Magma flow. Magnetic mineralogy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo e as principais vias de acesso.....	16
Figura 2 - Reconstrução da PBC Paraná-Etendeka durante a fase inicial de abertura da porção sul do Oceano Atlântico, mostrando a grande extensão desse vulcanismo na Província Paraná quando comparado com a Província Etendeka (Modificado de Gibson <i>et al.</i> , 2006).....	19
Figura 3 - Modelos de corpos tabulares intrusivos de acordo com: (A) Modelo clássico de preenchimento de fraturas pré-existentes; (B) Modelo de fraturamento hidráulico de tração (Modificado de Motoki & Sichel, 2008)	22
Figura 4 - Esquema representa a Influência das partículas sobre o tensor magnético (Haag <i>et al.</i> , 2019).....	23
Figura 5 - Perfuração dos cilindros, com destaque em amarelo para a bomba de água contendo uma mistura de água e óleo solúvel para a refrigeração e diminuição do atrito durante a perfuração.....	26
Figura 6 - Marcação de 1 cm de profundidade feita inicialmente (em vermelho). Perfuração concluída, espaço onde foi retirado o cilindro (em amarelo).....	27
Figura 7 - Leitura da orientação dos cilindros.....	28
Figura 8 - Corte dos cilindros amostrados em campo e preparação dos espécimes para medidas paleomagnéticas.....	29
Figura 9 - Magnetômetro MicroMag 3900 utilizado para a obtenção das curvas de MRI e histereses. Extraído do site do fabricante do equipamento (<i>Lake Shore Cryotronics</i>).....	31
Figura 10 - Ciclo completo de histerese com as posições dos parâmetros de magnetização de saturação (M_s), magnetização remanente de saturação (M_{rs}), coercividade (H_c) e coercividade de remanência (H_{cr}).....	32
Figura 11 - (a) Representação tridimensional do elipsoide magnético e (b) seus respectivos eixos de susceptibilidade magnética plotados em estereograma.....	34
Figura 12 - Susceptibilímetro KAPPABRIDGE MFK1 – FA (AGICO) conectado ao software ANISOFT 5.....	35

Figura 13 - Intrusões básicas: (a) textura do diabásio; (b) dique assimétrico; (c) dique simétrico; (d) soleira assimétrica.....	37
Figura 14 - Mapa de localização das intrusões estudadas nesta monografia.....	39
Figura 15 - Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P).....	40
Figura 16 - Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P).....	41
Figura 17 - Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P).....	42
Figura 18 - Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P).....	44
Figura 19 - Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P).....	45
Figura 20 - Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P).....	47
Figura 21 - (a) Resultados da ASM para o sítio PDS-01, (b) dique cortando os derrames básicos da Fm. Torres do Grupo Serra Geral.....	48
Figura 22 - (a) Resultados da ASM para o sítio PDS-09, (b) dique cortando os derrames básicos da Fm. Torres do Grupo Serra Geral.....	49
Figura 23 - (a) Resultados da ASM para o sítio PDS-15, (b) soleira cortando os derrames básicos da Fm. Torres do Grupo Serra Geral.....	51
Figura 24 - Resultados da ASM para os sítios PDS-07 e PDS-13.....	52

Figura 25 - Ciclo de histerese (a) e MRI (b) representativo para todos os sítios.....	53
Figura 26 - Diagrama de correlação entre grau de anisotropia (P) <i>versus</i> susceptibilidade magnética média (Km) de todas as intrusões.....	54
Figura 27 - Diagrama de correlação entre parâmetro de forma (T) <i>versus</i> grau de anisotropia (P) de todas as intrusões.....	55
Figura 28 - Estereogramas representativos das intrusões.....	57
Figura 29 - Diagrama de Day para resultados de histerese dos sítios analisados (Day <i>et al.</i> , 1977, modificado por Dunlop, 2002). Hcr - coercividade de remanência; Hc - coercividade; Mrs - magnetização remanente de saturação; Ms - magnetização de saturação; SD - single-domain, PSD - pseudo-simple domain, MD - multi-domain.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sítios de ASM analisados nesta monografia.....	38
Tabela 2 - Dados de ASM das intrusões do Grupo Serra Geral.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS

ASM - Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

cm - Centímetro

GSG - Grupo Serra Geral

LIPs - *Large Igneous Province* (Grandes Províncias Ígneas)

MD - Multidomínio

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

PDS - Pseudo-domínio

SD - Domínio simples

SI - Sistema internacional de unidades

Ti-Magnetita - Titano-Magnetita

LISTA DE SÍMBOLOS

H - Campo magnético

Hc - Coercividade

Hcr - Coercividade de remanência

K - Susceptibilidade magnética

K1 - Eixo máximo do tensor magnético/lineação magnética

K2 - Eixo intermediário do tensor magnético

K3 - Eixo mínimo do tensor magnético/polo da foliação magnética

Km - Susceptibilidade magnética média

Ms - Magnetização de saturação

Mrs - Magnetização remanente de saturação

mT - mili Tesla

P - Grau de anisotropia

T - Parâmetro de forma

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	09
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	18
3 ESTADO DA ARTE.....	19
3.1 Contexto Geológico Regional.....	19
3.1.1 <i>Província Magmática Paraná-Etendeka</i>	19
3.1.2 <i>Grupo Serra Geral</i>	20
3.1.3 <i>Intrusões do Grupo Serra Geral</i>	21
3.2 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.....	22
4 METODOLOGIA.....	24
4.1 Etapa Pré-Campo.....	24
4.2 Etapa de Campo.....	25
4.2.1 <i>Trabalho de campo</i>	25
4.2.2 <i>Amostragem paleomagnética</i>	25
4.3 Etapa Pós-Campo.....	28
4.3.1 <i>Preparação das amostras</i>	28
4.3.2 <i>Caracterização da mineralogia magnética</i>	29
4.3.2.1 <i>Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI)</i>	30
4.3.2.2 <i>Curvas de histerese</i>	31
4.3.3 <i>Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM)</i>	33
5 RESULTADOS.....	36
5.1 Geologia das intrusões.....	36
5.2 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM).....	38
5.2.1 <i>Dados escalares das intrusões</i>	39

5.2.2 <i>Dados direcionais das intrusões</i>	47
5.3 Mineralogia Magnética.....	52
6 DISCUSSÃO.....	54
6.1 Dados escalares.....	54
6.2 Direção de fluxo.....	55
6.3 Mineralogia magnética.....	57
7 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS.....	60
ANEXOS.....	68

1 INTRODUÇÃO

O estudo das intrusões básicas (diques e soleiras) tem se mostrado relevante para o entendimento da gênese e evolução das Grandes Províncias Ígneas (*Large Igneous Province* - LIPs), principalmente as províncias basálticas continentais como *Deccan Traps* (e.g. Bondre *et al.*, 2006; Chenet *et al.*, 2008; Vanderkluyzen *et al.*, 2011), *Columbia River* (e.g. Swanson *et al.*, 1979; Brueseke *et al.*, 2007; Biasi & Karlstrom, 2021), *Siberian Traps* (e.g. Burgess *et al.*, 2017; Fedorenko & Czamanske, 1997; Pavlov *et al.*, 2007) e Paraná-Etendeka (Ernesto *et al.*, 1990, 1999; Florisbal *et al.*, 2014, 2018; Rossetti *et al.*, 2018, 2021; Sarmiento *et al.*, 2017, 2020).

As intrusões de rochas básicas e intermediárias toleíticas permitem uma melhor compreensão sobre a ascensão, transporte e colocação das rochas vulcânicas na Província Magmática Paraná. As intrusões de diques e soleiras são correlacionadas aos derrames do Grupo Serra Geral, podendo representar o sistema de condutos magmáticos que alimentam as lavas em superfície (Rossetti *et al.*, 2018, 2021; Sarmiento *et al.*, 2017, 2020). Estudos apontam que o volume referente a esses corpos intrusivos do tipo soleira é de pelo menos 112.000 km³ (Frank *et al.*, 2009); contudo, não há uma estimativa em relação ao volume de diques. A maioria das intrusões se encontram encaixadas nos sedimentos paleozoicos da Bacia do Paraná e são relativamente abundantes em toda a sua extensão, embora ocorram em maior concentração no limite leste (Almeida, 1986; Zalán *et al.*, 1985). Em muitas ocasiões, essas intrusões são agrupadas na forma de enxames de diques, cujas maiores ocorrências estão localizadas nos estados do Paraná (enxames de diques de Ponta Grossa), Santa Catarina (enxames de diques de Florianópolis) (Deckart *et al.*, 1998; Raposo *et al.*, 1998; Florisbal *et al.*, 2014), São Paulo e Rio de Janeiro (enxames de diques Serra do Mar) (Corval *et al.*, 2008; Corval *et al.*, 2009).

Neste trabalho será aplicado o método de ASM (Anisotropia de Susceptibilidade Magnética) em diques previamente estudados por Sarmiento *et al.* (2017, 2020), a fim de compreender os mecanismos de transporte e a dinâmica de fluxo dos magmas e verificar se os diques indicam um fluxo magmático vertical ou oblíquo que sugira sua relação como alimentador dos derrames básicos do Grupo Serra Geral. A área estudada abrange, principalmente, a região nordeste do Rio

Grande do Sul, envolvendo a região do Litoral Norte, perto da cidade de Torres (Fig. 1).

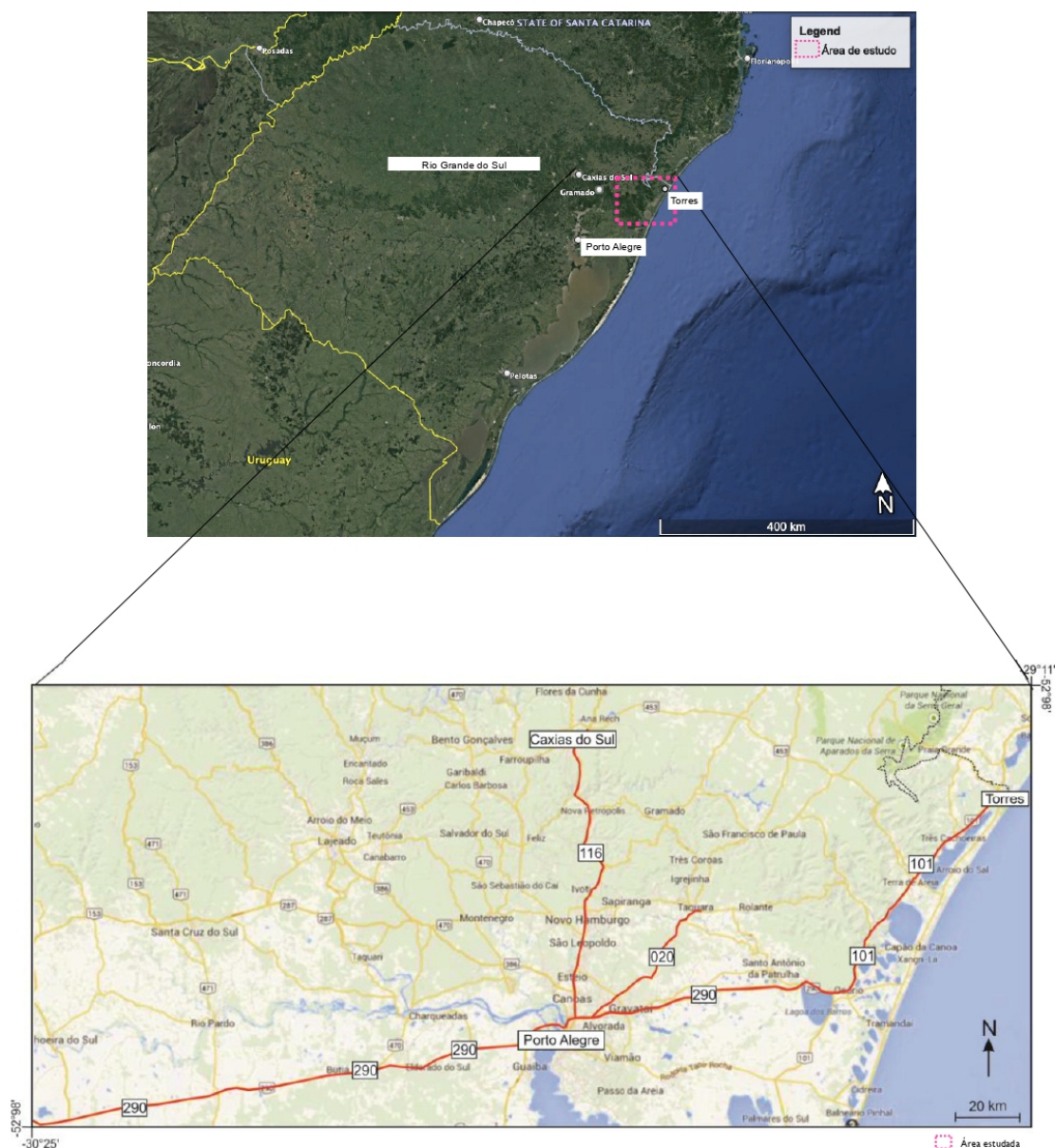


Figura 1. Localização da área de estudo e as principais vias de acesso (Modificado de Sarmiento *et al.* 2017).

Há inúmeros estudos petrológicos e geoquímicos sobre os depósitos vulcânicos do Grupo Serra Geral e intrusivas relacionadas; entretanto, pesquisas que abordam os mecanismos de colocação destes corpos são escassas. A análise de marcadores cinemáticos é fundamental para a obtenção de direções de fluxo em corpos intrusivos. No entanto, a coleta de dados estruturais e texturais em campo

pode ser demorada e, muitas vezes, inviável devido às características petrográficas das rochas vulcânicas (ex.: textura afanítica, holohialina, etc). Como alternativa, pode ser usado o método geofísico indireto da ASM que auxilia na determinação da direção de movimento do magma em corpos intrusivos, pois permite definir a orientação preferencial dos minerais magnéticos presentes na rocha durante a sua formação (Tarling & Hrouda, 1993).

Sarmiento *et al.* (2014, 2017, 2020) demonstraram que há muitos outros corpos intrusivos na porção centro-leste e nordeste do Rio Grande do Sul, cortando tanto os sedimentos da Bacia do Paraná quanto as unidades basais e intermediárias do Grupo Serra Geral (Formações Torres, Vale do Sol e Palmas – Rossetti *et al.* 2018). Em razão disso, o trabalho priorizará o estudo de 11 intrusões, sendo 9 diques e 2 soleiras, de composição básica relacionados ao vulcanismo do Grupo Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul com o foco em seus aspectos geofísicos.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem o objetivo de identificar a direção de fluxo e os mecanismos de transporte de 11 intrusões intrusões básicas associadas aos depósitos vulcânicos do Grupo Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. Dentre os objetivos específicos destacam-se:

1. Determinar a trama magnética das rochas que possam auxiliar na determinação do sentido de fluxo magmático dos diques, permitindo sugerir sua relação como alimentador dos derrames básicos do Grupo Serra Geral.
2. Determinar a mineralogia magnética das rochas estudadas e os minerais magnéticos que a compõem e são responsáveis pela trama magnética.

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Contexto Geológico Regional

3.1.1 Província Magmática Paraná-Etendeka

A Província Magmática Paraná-Etendeka precede a fragmentação da região sul do continente Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico Sul, representando um dos eventos magmáticos mais significativos do Cretáceo Inferior (133 ± 1 Ma) e de mais rápida duração (cerca de 1 Ma) (Rossetti *et al.*, 2017; Milani *et al.*, 2007, Rocha *et al.*, 2020). Cerca de 90% do magmatismo desta província está localizado na parte centro-leste da Placa Sul-Americana, principalmente no Brasil, e o restante na Namíbia, África (Fig. 2).

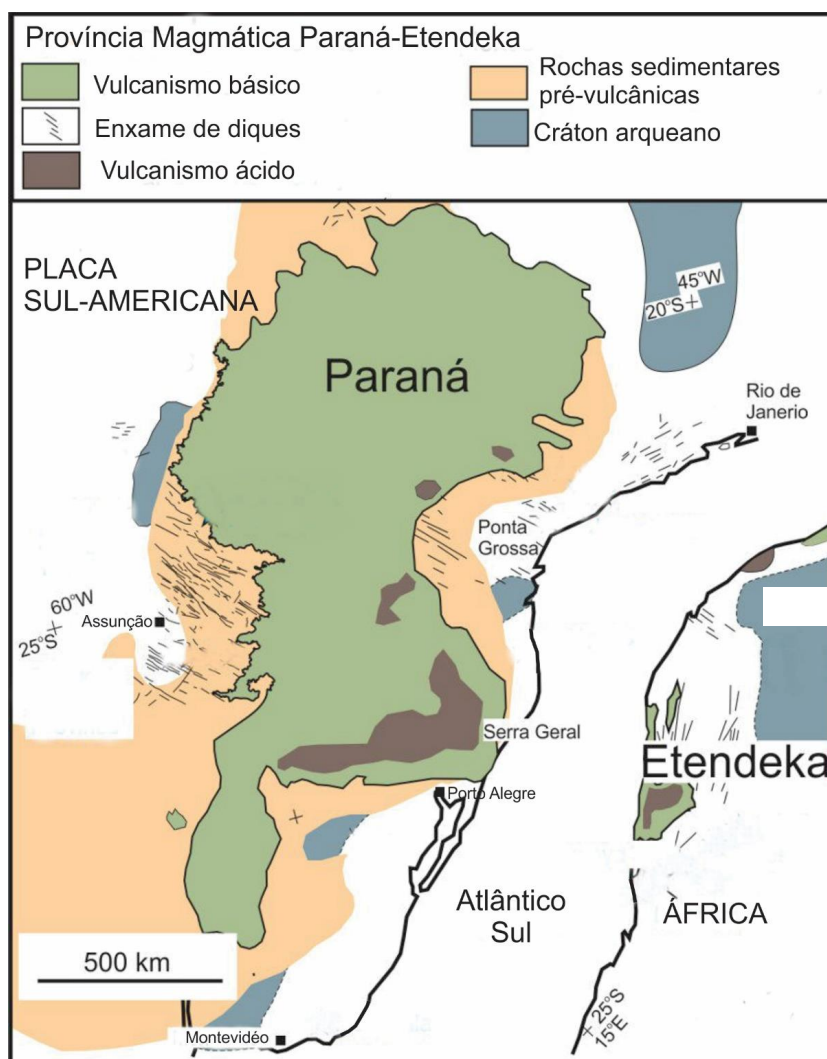


Figura 2. Reconstrução da Província Magmática Paraná-Etendeka durante a fase inicial de abertura da porção sul do Oceano Atlântico, mostrando a grande extensão desse vulcanismo na Província Paraná quando comparado com a Província Etendeka (Modificado de Gibson *et al.*, 2006).

No Brasil, a Província Magmática Paraná-Etendeka é representada pelo Grupo Serra Geral, cuja evolução está associada à Supersequência Gondwana III da Bacia do Paraná, compreendendo parte Argentina, Brasil e Uruguai. Esta bacia é do tipo intracratônica que cobre uma área de cerca de 1.500.000 km², desenvolvida entre o Ordoviciano e o Cretáceo. A sequência vulcano-sedimentar da Bacia do Paraná possui 7,5 km de espessura e é composta pelas supersequências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, II e III e Bauru (Frank *et al.*, 2009; Milani *et al.*, 2007).

3.1.2 Grupo Serra Geral

O vulcanismo basáltico proveniente da Província Magmática Paraná-Etendeka foi denominado estratigraficamente de Grupo Serra Geral por Rossetti *et al.* (2018, 2021), sendo constituído predominantemente por rochas basálticas e andesitos basálticos toleíticos (90%), além de andesitos toleíticos (7%), riolitos e riolitos (3%) (Bellieni *et al.*, 1986; Piccirillo *et al.*, 1989; Nardy, 1995). Estas rochas são frequentemente agrupadas em magmas-tipos, a partir de suas características geoquímicas, levando-se em conta o conteúdo de TiO₂ e de alguns elementos-traço, especialmente Y e Yb. Predominam rochas enriquecidas em TiO₂ na porção norte da bacia (alto Ti/Y), enquanto rochas empobrecidas em TiO₂ são predominantes na região sul (baixo Ti/Y). Autores como Bellieni *et al.* (1984) e Mantovani *et al.* (1985) associam esta variação a uma composição diferenciada na fonte primária do magma, ou seja, não haveria uma homogeneização composicional no manto quando analisado regionalmente. Já Fodor *et al.* (1989) explicam a variação do teor de TiO₂ como resultante de diferentes graus de assimilação crustal pelo magma em sua ascensão até a superfície (Milani *et al.*, 2007).

No estado do Rio Grande do Sul, ao longo da Calha de Torres, o Grupo Serra Geral é constituído, nas suas porções inferiores, principalmente por lavas básicas com morfologia *pahoehoe* espessas (*ponded*) que ocupam os espaços interdunas da Formação Botucatu. As porções intermediárias desta província são compostas de derrames do tipo *pahoehoe*, *rubly-pahoehoe* e tipo *a'a'* no topo, sendo as ocorrências de corpos intrusivos básicos/intermediários menos frequentes. Derrames e domos ácidos são predominantes nas unidades superiores desta sequência vulcânica (Lima *et al.*, 2012a,b; Waichel *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2018, 2021).

3.1.3 Intrusões do Grupo Serra Geral

Os diques básicos que intrudem as rochas sedimentares da Bacia do Paraná e do Grupo Serra Geral possuem direção preferencial NE-SW. Eles coincidem com os lineamentos tectono-magmáticos que representam as fraturas que serviram de dutos para enxames de diques paralelos às costas do Brasil e da Namíbia, sugerindo que eles fizeram parte do sistema de junção tríplice relacionado à abertura do Atlântico Sul (Piccirillo *et al.*, 1990; Coutinho, 2008; Sarmiento *et al.*, 2014, 2017, 2020). As direções preferenciais dos diques (NW-SE) que cortam os derrames de lavas são semelhantes às direções dos arcos de Ponta Grossa, Rio Grande e Calha de Torres e podem ter feito parte ou serem causados por um ou mais ciclos geotectônicos. Segundo alguns autores, estes diques podem ser separados morfologicamente em simétricos e assimétricos e têm composição basáltica, andesítica basáltica e traquiandesítica de afinidade toleítica (Sarmiento *et al.*, 2014, 2017, 2020).

Os mecanismos de *emplacement* de diques e soleiras máficos na crosta é bastante discutido. A ideia mais aceita para a colocação dos diques é a que ocorre com mais facilidade ao longo de sistemas de fraturas e zonas de fraquezas pré-existentes do que por criação de novas fraturas (Billings, 1972). Contudo, experimentos analíticos que tratam de conceitos de mecânica das rochas, ao aproximarem a geometria dos diques para corpos elípticos alongados, demonstram que a tensão concentrada ao longo da extremidade do dique seria suficiente para fraturar a rocha encaixante mesmo sob baixas pressões de magma (Atkinson, 1987).

As soleiras geralmente intrudem rochas sedimentares sub-horizontais em baixas profundidades. Os corpos intrusivos concordantes subverticais são mais difíceis de serem observados em campo. Poderiam ter sido, originalmente, intrusões sub-horizontais inclinadas por um evento tectônico posterior. A transição dique-soleira pode se dar pela ascensão do magma por flutuabilidade de locais mais profundos para um nível neutro, onde se acumularia, ou pela mudança na orientação do σ_3 de vertical em locais mais profundos para horizontal em locais mais rasos (Motoki & Sichel, 2008) (Fig. 3).

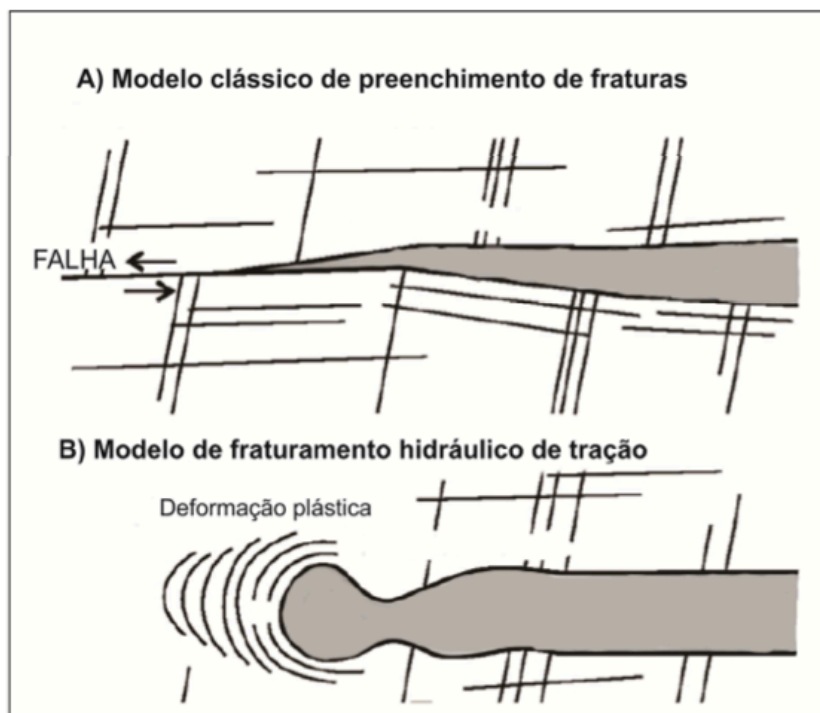


Figura 3. Modelos de corpos tabulares intrusivos de acordo com: (A) Modelo clássico de preenchimento de fraturas pré-existentes; (B) Modelo de fraturamento hidráulico de tração (Modificado de Motoki & Sichel, 2008).

3.2 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

A anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) é uma técnica geofísica indireta que utiliza a orientação dos minerais magnéticos presentes nas rochas e pode ser utilizada para estudos de petrofábrica e de geologia estrutural (Tarling & Hrouda, 1993). As principais vantagens do uso da ASM são a aplicação para praticamente qualquer rocha e o curto tempo para obtenção de dados (Rochette *et al.*, 1992).

O princípio desta teoria baseia-se na orientação preferencial de minerais magnéticos anisotrópicos. A medição da ASM é feita através da obtenção do elipsoide de susceptibilidade magnética definido pelo comprimento e orientação dos seus três principais eixos: $K_1 \geq K_2 \geq K_3$. A lineação magnética é representada pelo eixo K_1 , sendo ele o de maior susceptibilidade, enquanto o K_3 representa o polo do plano de foliação e o eixo de menor susceptibilidade (Rochette *et al.*, 1992). Sendo assim, o tensor magnético (K) representa a orientação das partículas e a soma de

todos os tensores magnéticos individuais presentes na amostra, podendo possuir muitas formas diferentes (Fig. 4) (Haag, 2019).

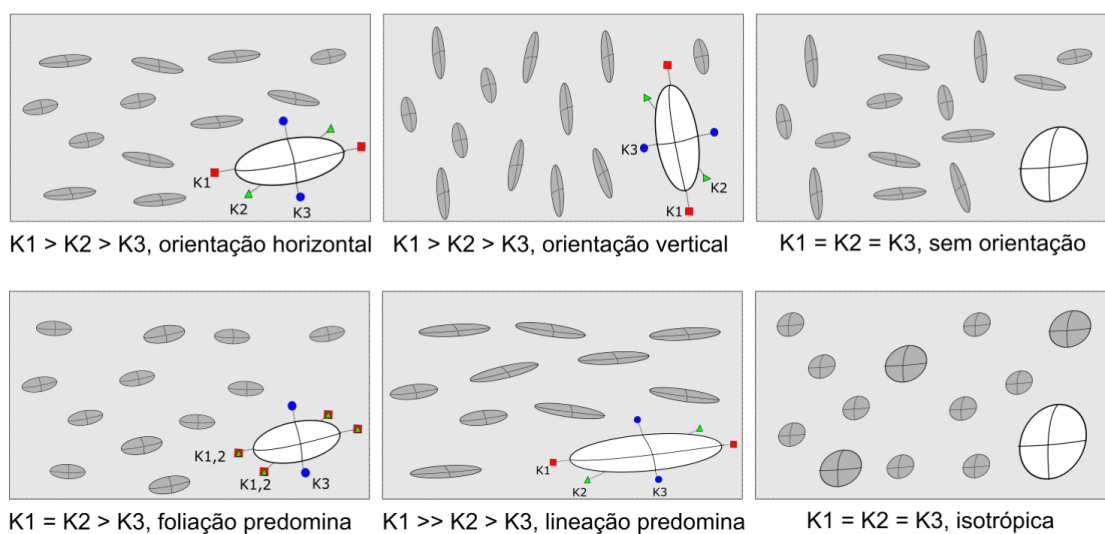


Figura 4. Esquema representa a Influência das partículas sobre o tensor magnético (Haag, 2019).

A ASM permite obter, além dos parâmetros direcionais, os parâmetros escalares, que se referem à relação entre os eixos K_1 , K_2 e K_3 do tensor magnético. A susceptibilidade magnética média representa a média aritmética das intensidades de K_1 , K_2 e K_3 , relacionando-a com a composição das rochas (Hunt *et al.*, 1995). O parâmetro de forma (T) atribui-se à forma do tensor magnético, diferenciando entre elipsoides oblatos ($T > 0$), prolatos ($T < 0$) ou triaxiais ($T = 0$) (Jelínek, 1981). O grau de anisotropia (P) representa a diferença entre os eixos do tensor magnético, o que permite analisar a magnitude entre cada um dos eixos (Tarling & Hrouda, 1993).

Cada mineral presente na rocha comporta-se de uma maneira quando há um campo magnético presente, e com base neste comportamento, podem ser classificados como paramagnéticos, diamagnéticos ou ferromagnéticos. Os minerais paramagnéticos alinham-se com o campo magnético externo e possuem magnetização nula quando retirado o campo indutor, apresentando valores positivos de susceptibilidade magnética (χ), como a biotita, clorita, anfibólios, piroxênios. Os minerais diamagnéticos apresentam uma magnetização fraca que é oposta e proporcional ao campo aplicado, apresentando valores negativos de χ , como é o caso do quartzo e feldspatos. Já os minerais ferromagnéticos, como a magnetita, possuem uma magnetização remanente natural (MRN), com magnetização mais alta

que a dos minerais paramagnéticos e diamagnéticos (Tarling & Hrouda, 1993; Gambeta, 2021).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste no uso da técnica geofísica Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) aplicada na determinação da dinâmica de fluxo das intrusões básicas do Grupo Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. Além disso, um estudo detalhado da mineralogia magnética foi realizado para a determinação dos portadores magnéticos. Neste capítulo são apresentados os principais métodos aplicados neste trabalho, envolvendo as etapas pré-campo (revisão bibliográfica), de campo (coleta dos cilindros orientados, descrição dos afloramentos, etc.) e pós-campo (compilação dos dados, análise das anisotropias magnéticas e interpretação dos dados).

4.1 Etapa Pré-Campo

Esta etapa consistiu na revisão bibliográfica sobre o método geofísico ASM que foi empregado neste trabalho e sobre as sequências vulcânicas das áreas selecionadas a fim de aproveitar informações geológicas básicas, como cartografia, geologia regional, estratigrafia, petrologia, geoquímica e geologia estrutural. A compilação dos dados existentes foi muito importante para a organização da etapa de campo, pois é utilizada uma perfuratriz pesada, específica para a coleta de amostras, de difícil transporte em campo. A análise geológica das intrusões básicas foi baseada nos trabalhos de Sarmiento *et al.* (2014, 2017, 2020) que realizaram estudos petrológicos e geoquímicos das intrusões básicas na porção nordeste do Rio Grande do Sul.

4.2 Etapa de Campo

4.2.1 Trabalho de campo

O trabalho de campo ocorreu entre os dias 28 e 31 de julho de 2022 na região da cidade de Torres, Rio Grande do Sul. O trabalho de campo incluiu amostragem para petrografia, anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) e análises de magnetismo de rocha.

As medições estruturais e de localização foram realizadas com o *software* FieldMove Clino. Os dados descritivos foram processados e compilados utilizando o Microsoft Excel e o Google Earth Pro.

4.2.2 Amostragem paleomagnética

Foram coletados 11 sítios paleomagnéticos, sendo retirados cerca de oito cilindros por sítio, totalizando 88 cilindros coletados. Os sítios contêm amostras das intrusões básicas, diques e soleiras, e de suas encaixantes.

A amostragem foi realizada com o auxílio de uma perfuratriz portátil da marca *STIHL* movida a gasolina acoplada com uma broca cilíndrica oca não magnética de 1” de diâmetro por 20 cm de comprimento com a extremidade diamantada. Uma bomba manual de água contendo uma mistura de água e óleo solúvel biodegradável foi acoplada ao sistema sendo liberada na base da broca para reduzir a temperatura e o atrito da rocha (Fig. 5).



Figura 5. Perfuração dos cilindros, com destaque em amarelo para a bomba de água contendo uma mistura de água e óleo solúvel para a refrigeração e diminuição do atrito durante a perfuração.

É muito importante que a rocha amostrada esteja *in situ* pois, caso não esteja, a análise dos dados direcionais será inválida. A rocha deve apresentar um grau de alteração mínimo ou nulo e conter poucas fraturas, sob o risco de fragmentar-se ou desintegrar-se pelo atrito produzido pela broca fazendo, muitas vezes, com que o cilindro emperre dentro desta.

Antes de começar a perfuração, foi feita uma marcação de 1 cm de profundidade rente ao local a ser amostrado para o registro da posição dos cilindros, caso quebrassem e houvesse a sua desorientação. Após esta etapa, iniciou-se a perfuração. Finalizada a perfuração, duas marcações ficam registradas nos cilindros, uma inicial, marcada parcialmente, e outra final (Fig. 6).



Figura 6. Marcação de 1 cm de profundidade feita inicialmente (em vermelho). Perfuração concluída, espaço onde foi retirado o cilindro (em amarelo).

A posição espacial de cada cilindro foi registrada por um orientador que contém acoplado na extremidade uma bússola magnética (modelo *Brunton*) e uma bússola solar, proporcionando a leitura até em casos de alta intensidade de magnetização das rochas, e um transferidor para a medição do ângulo de inclinação do furo. O orientador foi posicionado nos furos e ajustado de maneira que o clinômetro da bússola ficasse nivelado na posição central, indicando que está na posição horizontal. Após, foram anotadas as leituras das medidas magnéticas e solar, quando possível, e da inclinação em que o cilindro foi retirado (Fig. 7).

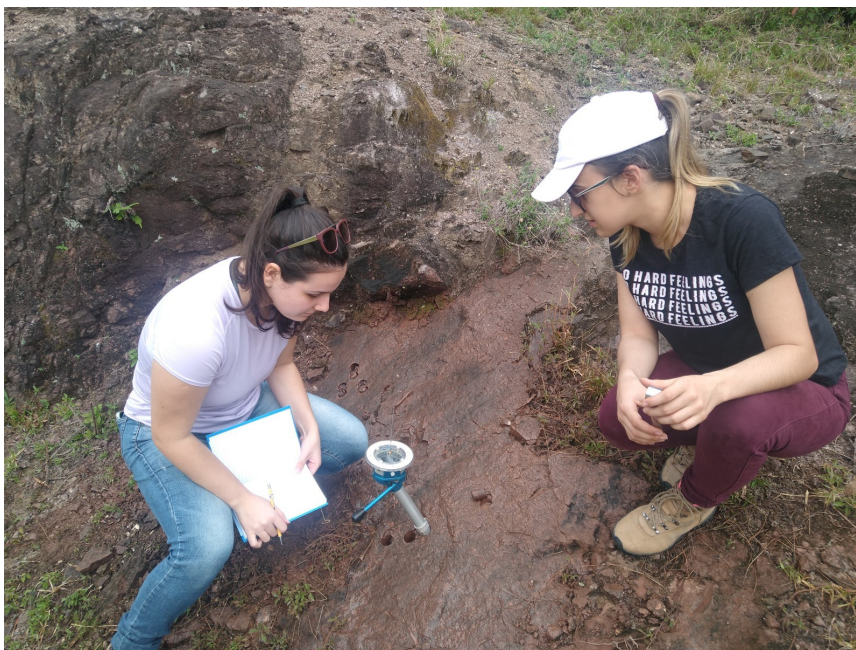


Figura 7. Leitura da orientação dos cilindros.

Nos cilindros que não quebraram durante a perfuração, o orientador foi colocado sem a retirada da amostra. A marcação foi feita diretamente nos cilindros utilizando-se um arame de cobre e, então, o cilindro foi identificado. Nos testemunhos que quebraram, a marcação teve de ser feita com uma caneta permanente na rocha do lado externo do furo, remarcando no cilindro quando este foi colocado na posição original.

4.3 Etapa Pós-Campo

4.3.1 Preparação das amostras

A preparação de amostras foi realizada no Núcleo de Preparação de Amostras do CPGq/IGEO da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGEO-UFRGS). Essa etapa consistiu no corte dos cilindros em espécimes de tamanho padrão, com 2,2 centímetros de altura (Fig. 8), utilizando uma serra não magnética com ajuste próprio para o corte. A padronização dos espécimes permite que eles fiquem no volume necessário para serem analisados no susceptômetro, com cerca de 11 cm³. Além da preparação dos espécimes para aquisição de dados de ASM, os

fragmentos, frequentemente da base do cilindro, foram utilizados para análise da mineralogia magnética.

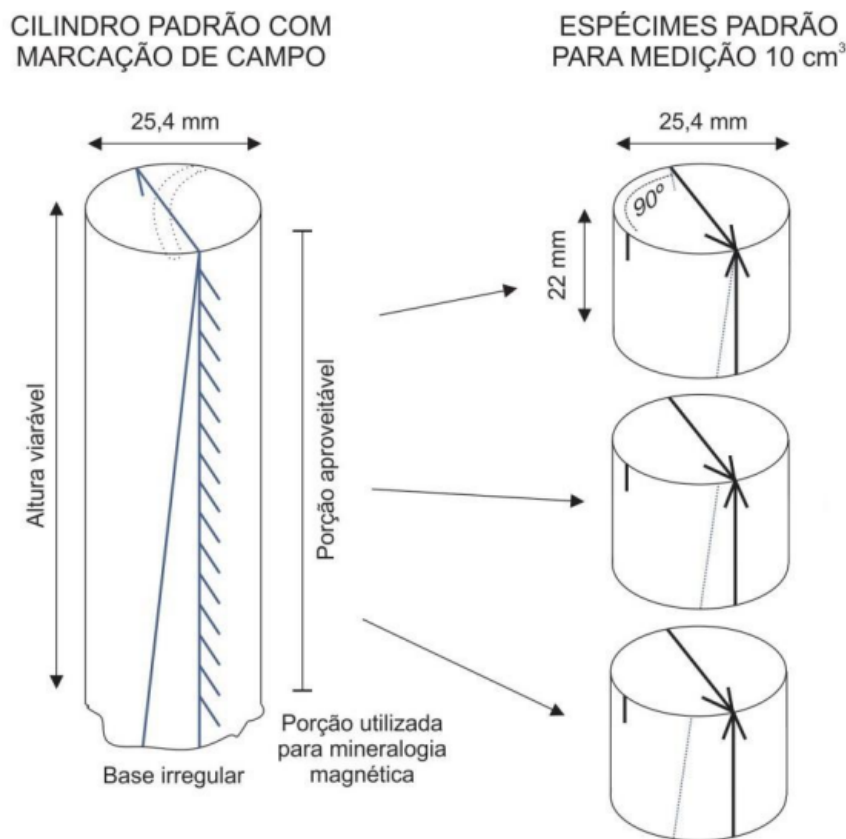


Figura 8. Corte dos cilindros amostrados em campo e preparação dos espécimes para medidas paleomagnéticas (Haag *et al.*, 2021).

4.3.2 Caracterização da mineralogia magnética

A caracterização da mineralogia magnética das amostras foi realizada no Laboratório de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USPmag). Uma amostra significativa de cada sítio paleomagnético foi submetida aos seguintes métodos: curvas de histerese e curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI).

A caracterização da mineralogia magnética é essencial nos estudos de ASM, pois as direções dos principais eixos magnéticos (que determinam o elipsoide magnético e a trama magnética, assim como a susceptibilidade magnética total da rocha) variam de acordo com os minerais que compõem a rocha (Tarling & Hrouda,

1993; Moncinhatto *et al.*, 2020).). A partir do comportamento da susceptibilidade magnética dos minerais é possível determinar três classes principais: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

4.3.2.1 Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI)

O método consiste em expor brevemente uma amostra a um campo magnético forte em temperatura ambiente e constante, permitindo adquirir precisamente a coercividade e a magnetização remanente da amostra, dada pela presença de partículas ferromagnéticas na rocha. O campo magnético indutor é feito com o aumento cada vez maior da sua intensidade, chegando ao limite do equipamento (1 Tesla) ou até onde a curva apresente uma inflexão e a magnetização continue constante, permitindo inferir que houve a saturação da magnetização da amostra. Com a aquisição da curva de MRI é possível identificar quais são as fases ferromagnéticas presentes, dado que minerais de baixa coercividade (*e.g.* magnetita) saturam a campos induzidos baixos (<300 mT) e minerais de alta coercividade (*e.g.* hematita) saturam a campos que podem ultrapassar o limite do equipamento, não chegando ao seu limite (Dunlop & Özdemir, 1997).

As curvas de MRI foram obtidas para uma amostra de cada um dos 14 sítios amostrados para ASM. O equipamento utilizado é o magnetômetro MicroMag 3900 de *Lake Shore Cryotronics* (Fig. 9).

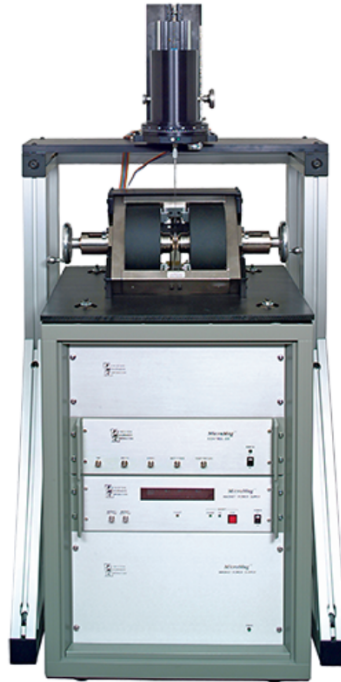


Figura 9. Magnetômetro MicroMag 3900 utilizado para a obtenção das curvas de MRI e histereses. Extraído do site do fabricante do equipamento (*Lake Shore Cryotronics*).

4.3.2.2 Curvas de histerese

O método baseia-se na medição da magnetização (M) em função de um campo magnético indutor (H). Os parâmetros de magnetização de saturação (M_s), magnetização remanente de saturação (M_{rs}), coercividade (H_c) e coercividade de remanência (H_{cr}) são obtidos através do ciclo completo de histerese e são importantes para a determinação das fases minerais ferromagnéticas presentes na rocha (Gambeta *et al.*, 2021) (Fig. 10). Quando aplicado um campo magnético na amostra, os minerais presentes sofrem saturação da sua magnetização em campos que podem ser muito baixos (<300 mT) ou altos, indicando as fases minerais ferromagnéticas de baixa e alta coercividade respectivamente. Quando o campo é retirado, mantém-se apenas a M_{rs} . Com a aplicação de um campo indutor reverso, a amostra perderá toda a magnetização em um determinado valor de campo, denominado H_c . O ciclo de histerese termina com o valor do campo necessário para que ocorra a anulação da magnetização remanente, definido como H_{cr} .

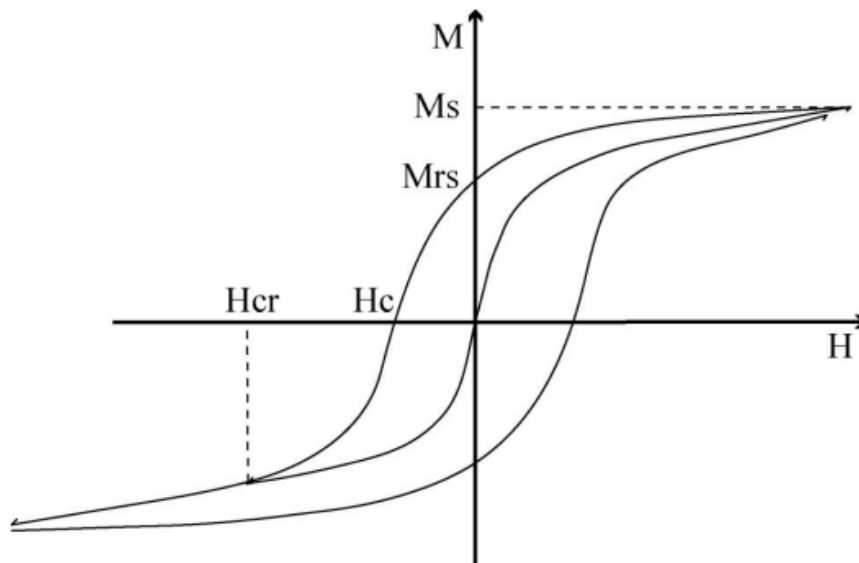


Figura 10. Ciclo completo de histerese com as posições dos parâmetros de magnetização de saturação (M_s), magnetização remanente de saturação (M_{rs}), coercividade (H_c) e coercividade de remanência (H_{cr}) (Tauxe *et al.*, 2018).

Os padrões e parâmetros obtidos com as curvas possibilitam a caracterização dos minerais magnéticos responsáveis pela susceptibilidade magnética do material, dado que a histerese representa a soma da contribuição de todas as partículas magnéticas presentes na amostra (Tauxe *et al.* 2018). Além disso, o formato das curvas também indica se há mistura de minerais de alta e baixa coercividade (Tauxe *et al.*, 1996). Os dados obtidos podem ser utilizados para definir as estruturas de domínio dos minerais ferromagnéticos (SD, domínio simples; PDS, pseudo-domínio simples; e MD, multi-domínio) a partir dos parâmetros M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c plotados no diagrama de Day (Day *et al.*, 1977).

Os grãos com comportamento SD são muito pequenos e apresentam uma magnetização estável, difícil de remagnetizar, necessitando de muita energia para inverter sua magnetização. Os de comportamento PSD (1-10 μm) ocorrem na transição entre os grãos de tamanho SD e o MD. Estes grãos contêm um pequeno número de domínios e podem ter um momento magnético considerável (Butler, 1992). Os grãos MD, de maior tamanho, apresentam dois ou mais domínios. Eles se subdividem internamente em domínios para minimizar a energia magnetoestática.

Uma característica importante dos domínios magnéticos é a dependência da direção da magnetização com a forma dos grãos, pois eles podem afetar a ASM de uma rocha. Nos grãos MD a magnetização é paralela ao eixo maior dos grãos, enquanto que nos SD a magnetização é perpendicular ao eixo maior. As rochas formadas por grãos SD possuem susceptibilidade máxima perpendicular a direção de alongamento, o que corresponde às tramas inversas (Rochette, 1992).

4.3.3 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM)

A anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) é uma técnica que se baseia na orientação dos minerais magnéticos presentes na rocha para estudos de petrofábrica e de geologia estrutural através da medição da capacidade que o material tem em se magnetizar quando submetido a um campo magnético induzido (Tarling & Hrouda, 1993). Apesar da ASM ser considerada muito fraca em rochas vulcânicas, o método permite obter medidas com precisão uma vez que elas são fortemente magnéticas, sendo a técnica mais confiável e rápida na investigação das petrotramas.

A medição da ASM é feita através da obtenção do elipsoide de susceptibilidade magnética definido pela orientação e comprimento dos seus três principais eixos: $K_1 \geq K_2 \geq K_3$. A trama magnética é a representação espacial desses três eixos principais, sendo definida pela lineação magnética (K_1 ou $K_{\text{máx}}$), pelo polo da foliação magnética (K_3 ou $K_{\text{mín}}$) e pelo plano de foliação magnética ($K_1 + K_2$), podendo ser representados por um estereograma semelhante ao utilizado em geologia estrutural (Tarling & Hrouda, 1993) (Fig. 11).

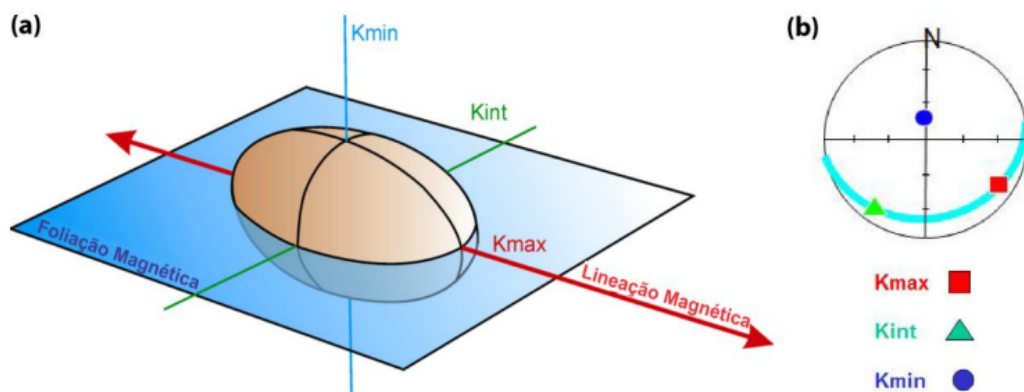


Figura 11. (a) Representação tridimensional do elipsoide magnético e (b) seus respectivos eixos de susceptibilidade magnética plotados em estereograma (Lyra *et al.*, 2018).

A aquisição dos dados foi realizada no USPMag e utilizado o susceptibilímetro KAPPABRIDGE MFK1 – FA (AGICO), operando a temperatura ambiente em um campo magnético de 200 A/m e frequência de 976 Hz (Fig. 12). O processo baseia-se na leitura dos três eixos (x, y e z) ortogonais entre si e na leitura da anisotropia total. Para tal, o operador coloca o espécime no *holder* de amostras presente no susceptibilímetro e realiza uma medida para cada um dos três eixos, através de um sistema automatizado que rotaciona o espécime (0,4 Hz) durante o processo. A última medida fornece a anisotropia total do espécime. As correções necessárias para a posição original da amostra em relação ao norte geográfico são efetuadas para cada espécime utilizando o referencial da orientação obtida em campo presente em cada cilindro. Os dados são processados pelo *software* ANISOFT 5 que realiza as estatísticas, gerando uma média para cada eixo.

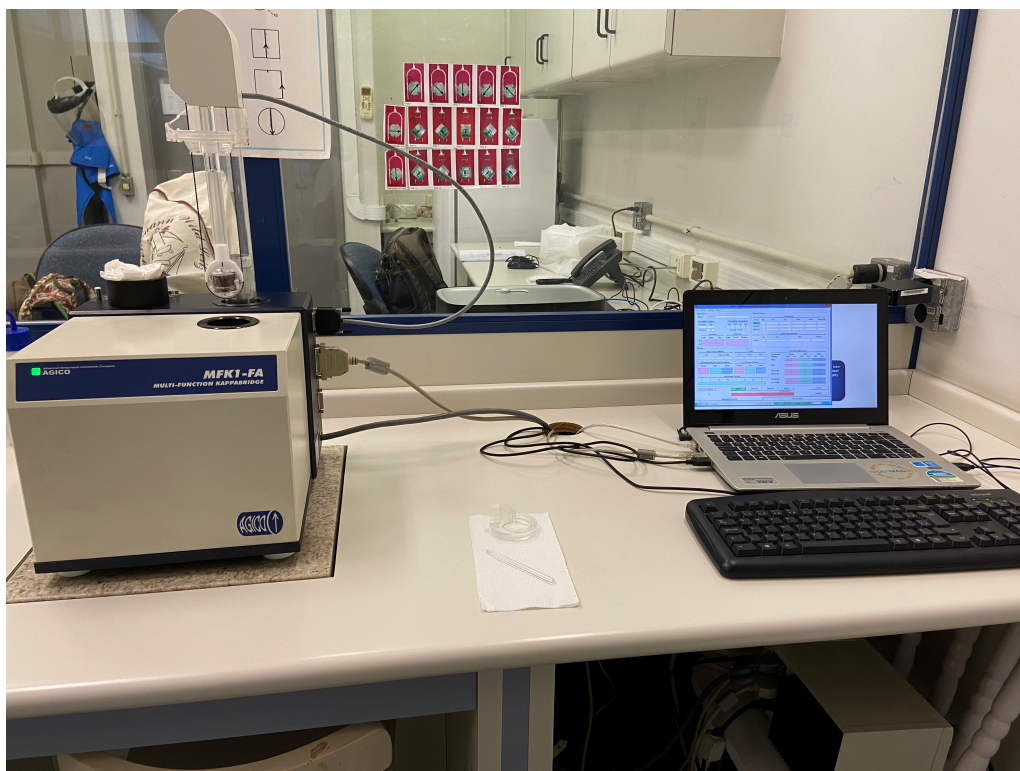


Figura 12. Susceptímetro KAPPABRIDGE MFK1 – FA (AGICO) conectado ao *software* ANISOFT 5.

5 RESULTADOS

5.1 Geologia das intrusões

As intrusões estudadas foram nove diques e duas soleiras, com o predomínio de diques. Possuem direção preferencial de NE-SW, e secundariamente direção NW-SE. Possuem espessuras variadas (0,30 a 8m), mas predominam os diques de 1-2m de espessura. Os corpos intrudem derrames *pahoehoe* das unidades basais do Grupo Serra Geral e arenitos médios da Formação Botucatu. Morfologicamente são classificados como diabásios, com textura equigranular fina no centro e com bordas afaníticas (Fig. 13a).

Morfologicamente, os diques foram divididos em dois grupos: simétricos e assimétricos. Os termos se referem aos diques com formas tabulares e bordas retilíneas e aos diques que apresentam uma geometria mais irregular, anastomosada, quando em contato com a rocha encaixante, respectivamente (Fig. 13b,c).

Os diques simétricos são os mais comuns. Estes diques, assim como os assimétricos, intrudem os derrames *pahoehoe* e as rochas sedimentares. Apresentam uma geometria tabular, regular e com bordas retas. As disjunções colunares são comuns nesses corpos. (Fig. 13d).

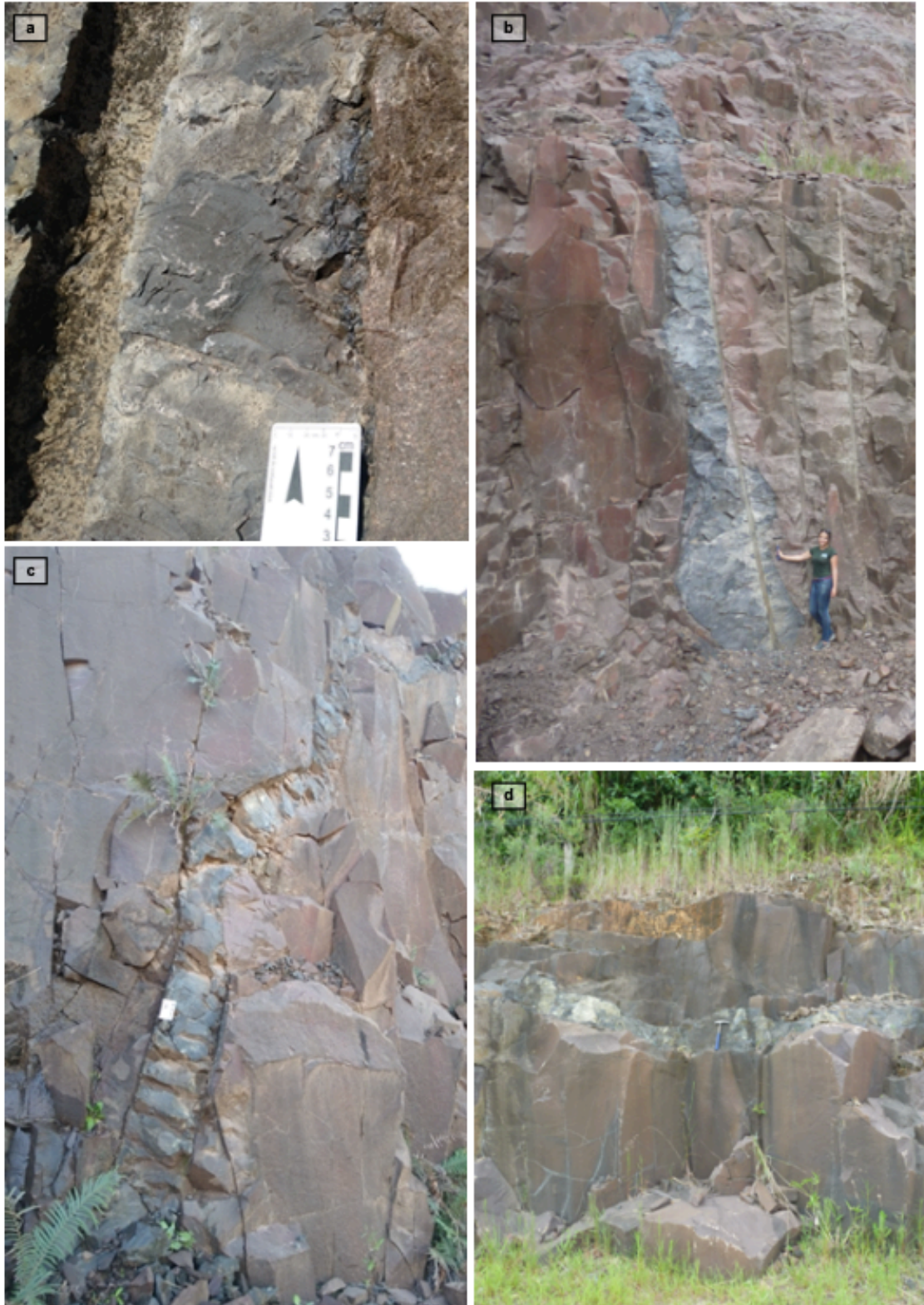


Figura 13. Intrusões básicas: (a) textura do diabásio; (b) dique assimétrico; (c) dique simétrico; (d) soleira assimétrica.

5.2 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM)

Os resultados da ASM obtidos correspondem à 11 intrusões amostradas, totalizando 217 espécimes. A divisão dos sítios e o total de espécimes de cada um deles está retratada na Tabela 1. Cada um deles possuem pelo menos 6 espécimes, o que garante a estatística mínima para estudos de ASM (Jelinek, 1981).

Tabela 1. Sítios de ASM analisados nesta monografia.

Sítio	Grupos	Tipologia	Espessura (m)	Total de espécimes
PDS-01	Terra de Areia	Dique	3	22
PDS-03	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	1,5	28
PDS-06	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	1,5-2	19
PDS-07	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Soleira	1,5-2	9
PDS-08	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	2	12
PDS-09	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Soleira	5-8	25
PDS-11	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	1,5	18
PDS-12	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	0,3	14
PDS-13	Três Cachoeiras	Dique	8	22
PDS-15	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	0,5-0,8	31
PDS-16	Torres/Dom Pedro de Alcântara	Dique	0,9-1	17

Todos os resultados direcionais dos tensores magnéticos obtidos foram representados em estereogramas equi-área projetados no hemisfério inferior, através dos eixos K_1 (máx.), simbolizado como um quadrado azul, K_2 (int.), simbolizado como um triângulo verde, e K_3 (mín.), simbolizado como um círculo rosa. Os parâmetros escalares, que expressam o formato dos tensores magnéticos medidos, englobam o grau de anisotropia (P), o parâmetro de forma (T) e a susceptibilidade magnética (K_m). Foram representados através de diagramas bivariados.

5.2.1 Dados escalares das intrusões

As intrusões possuem 11 sítios, abrangendo os sítios PDS-01, PDS-03, PDS-06, PDS-07, PDS-08, PDS-09, PDS-11, PDS-12, PDS-13, PDS-15 e PDS-16 (Fig. 14).

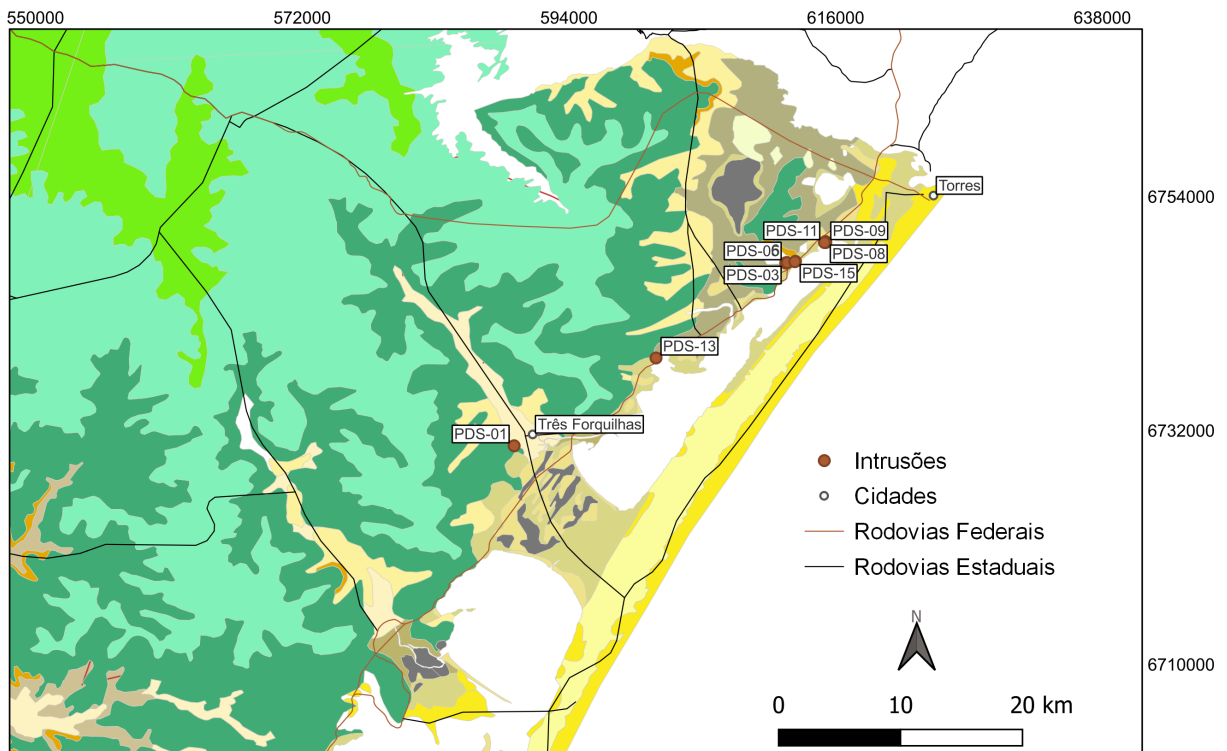


Figura 14. Mapa de localização das intrusões estudadas nesta monografia.

5.2.1.1 PDS-01

O sítio foi amostrado da borda para o centro de um dique, com direção NW-SE e com cerca de 3m de espessura. O dique é maciço com bordas retas e disjunção colunar centimétrica.

O Km é considerado alto, com um valor de $4,99 \times 10^{-2}$ SI. O P tem valor médio de 1,018 e, quando comparado com o Km, o seu grau não muda com o aumento da susceptibilidade (Fig. 15a). A relação entre T e P mostra que os espécimes apresentam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, na mesma proporção, e uma média de 0,006. E apenas um espécime é triaxial (T=0) (Fig. 15b).

5.2.1.2 PDS-03

O sítio foi amostrado perpendicularmente à borda de um dique, com direção NE-SW e com cerca de 1,5m de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de 1cm de material afanítico de aspecto vítreo. A susceptibilidade magnética média é $6,2 \times 10^{-2}$ SI, considerada alta. O grau de anisotropia possui valor médio de 1,008 e, quando comparado com o Km, o P aumenta (Fig. 15c).

A relação entre T e P demonstra que os espécimes estão agrupados com um valor médio de -0,155, indicando que os elipsoides são prolatos. Há poucos valores de $T > 0$, plotados, portanto, no campo do elipsoide oblato (Fig. 15d).

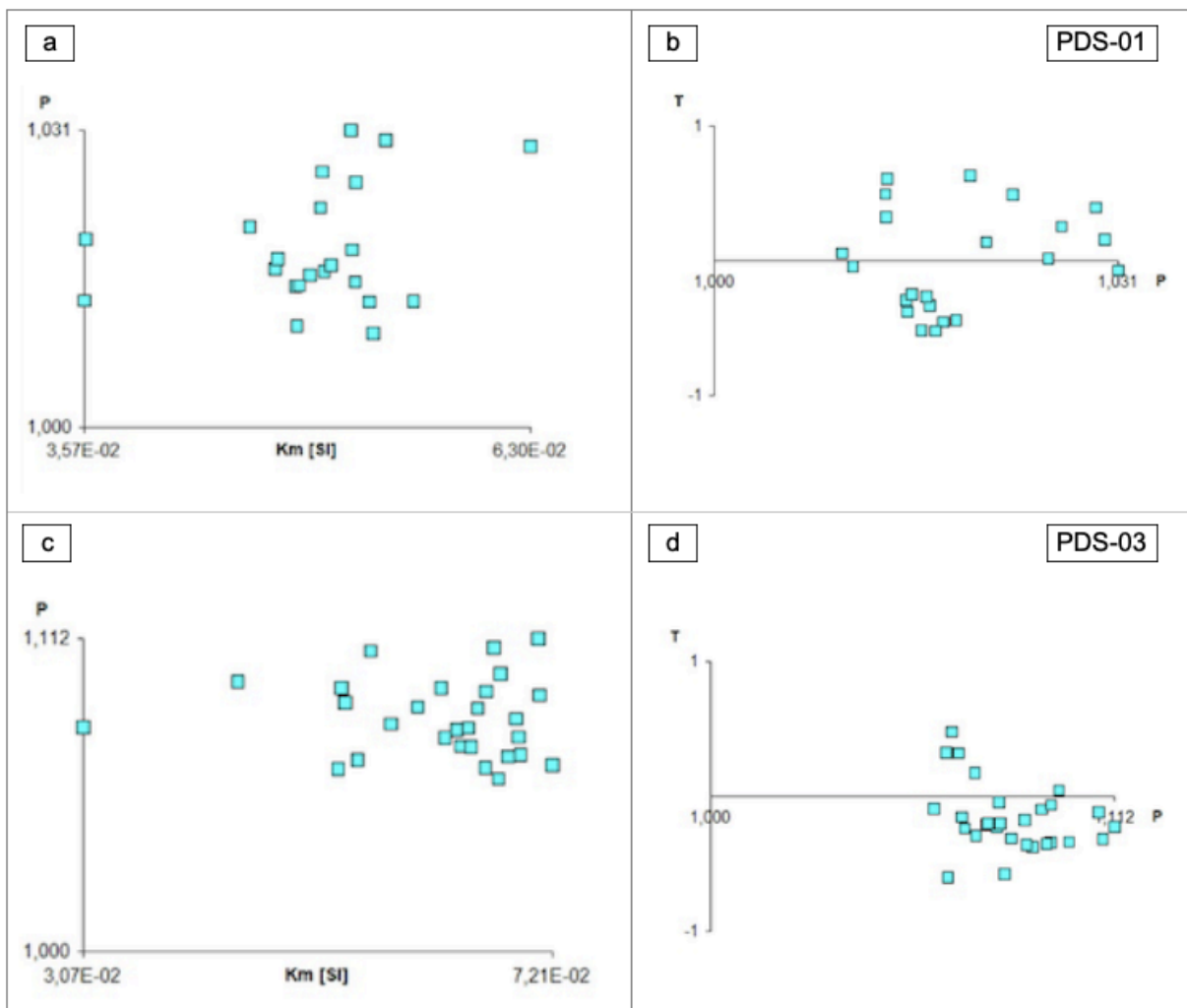


Figura 15. Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

5.2.1.4 PDS-06

O sítio foi amostrado perpendicular ao dique, com direção NW-SE e com 1,5m a 2m de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de 0,5cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km é considerado alto, com um valor de $5,62 \times 10^{-2}$ SI. O P tem valor médio de 1,082 e, quando comparado ao Km, o P apresenta uma leve variação (Fig. 16a). A relação entre T e P revela que os espécimes se encontram agrupados com uma média de -0,378, indicando elipsoides prolatos. Entretanto, há poucos valores de elipsoides oblatos, e um valor de elipsoide triaxial (Fig. 16b).

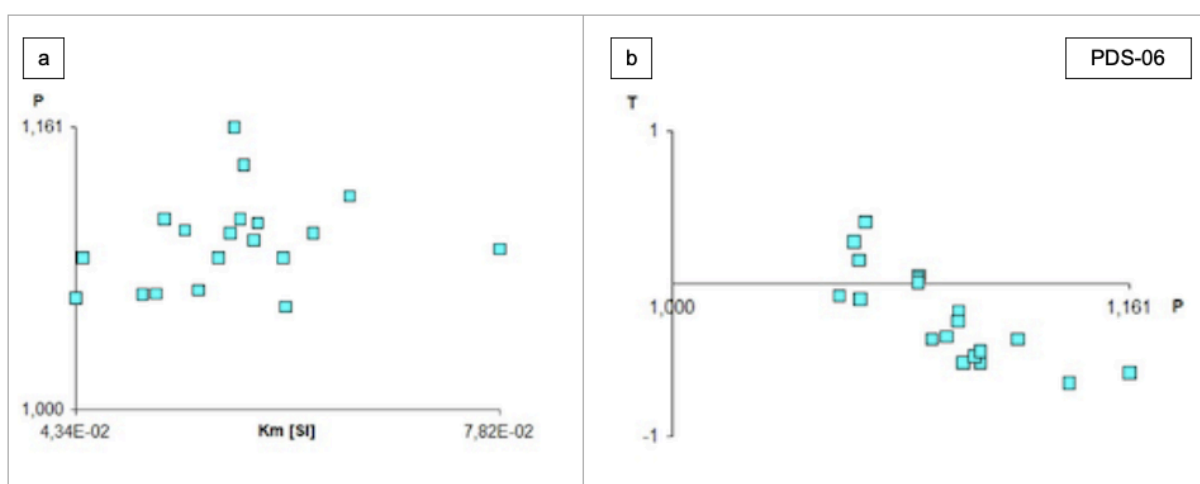


Figura 16. Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) *versus* susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) *versus* grau de anisotropia (P).

5.2.1.5 PDS-07

O sítio foi amostrado do topo ao meio da soleira, com direção NW-SE e com 1,5m a 2m de espessura. As bordas são retas e as margens resfriadas têm 0,5cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km é $1,17 \times 10^{-2}$ SI, considerada alta. O P possui um valor médio de 1,005 e, quando comparado ao Km, o P aumenta e varia bastante (Fig. 17a). A relação entre o T e o P mostra que os espécimes apresentam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, na mesma proporção, e uma média de -0,061, indicando predomínio de prolato (Fig. 17b).

5.2.1.6 PDS-08

O sítio foi amostrado na direção do dique (NE-SW) com 2m de espessura. O dique tem bordas retas e não foi possível identificar margens resfriadas. O Km é considerado alto, com um valor de $4,3 \times 10^{-2}$ SI. O P tem um valor médio de 1,011 e, quando comparado ao Km, o P aumenta e apresenta uma variação (Fig. 17c). A relação entre T e P demonstra que os espécimes estão agrupados em uma média de 0,523, indicando elipsoides oblatos. Há um espécime com T=0 (Fig. 17d).

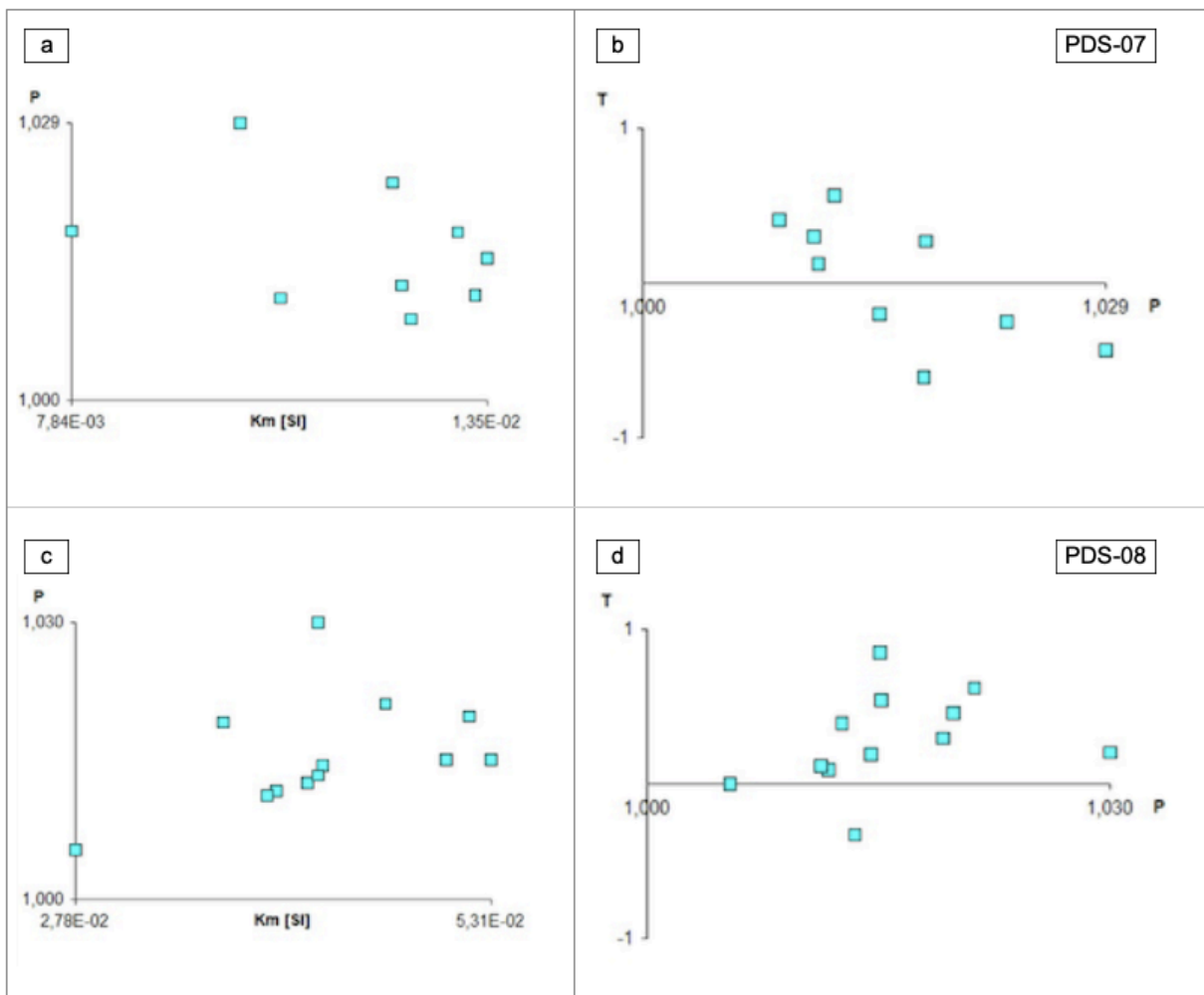


Figura 17. Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) *versus* susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) *versus* grau de anisotropia (P).

5.2.1.7 PDS-09

O sítio foi amostrado no centro da soleira, com direção NE-SW e com 5-8m de espessura. Possui bordas retas e margens resfriadas de 3-5cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km é $4,75 \times 10^{-2}$ SI, considerado alto. O P possui um valor médio de 1,017 e, quando comparado ao Km, o P aumenta e varia bastante (Fig. 18a). A relação entre T e P demonstra que os espécimes apresentam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, na mesma proporção, e uma média de -0,256, predomínio de prolato. Há três espécimes que indicam elipsoide triaxial (Fig. 18b).

5.2.1.8 PDS-11

O sítio foi amostrado na borda do dique, com direção NE-SW e com 1,5m de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de cerca 1cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km é considerado alto, com um valor de $6,42 \times 10^{-2}$ SI. O P apresenta um valor de 1,007 e, quando comparado ao Km, o P aumenta e varia bastante (Fig. 18c). A relação entre T e P demonstra que os espécimes apresentam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, na mesma proporção, e uma média de -0,311, predomínio de prolato. Contudo, há dois elipsoides triaxiais (Fig. 18d).

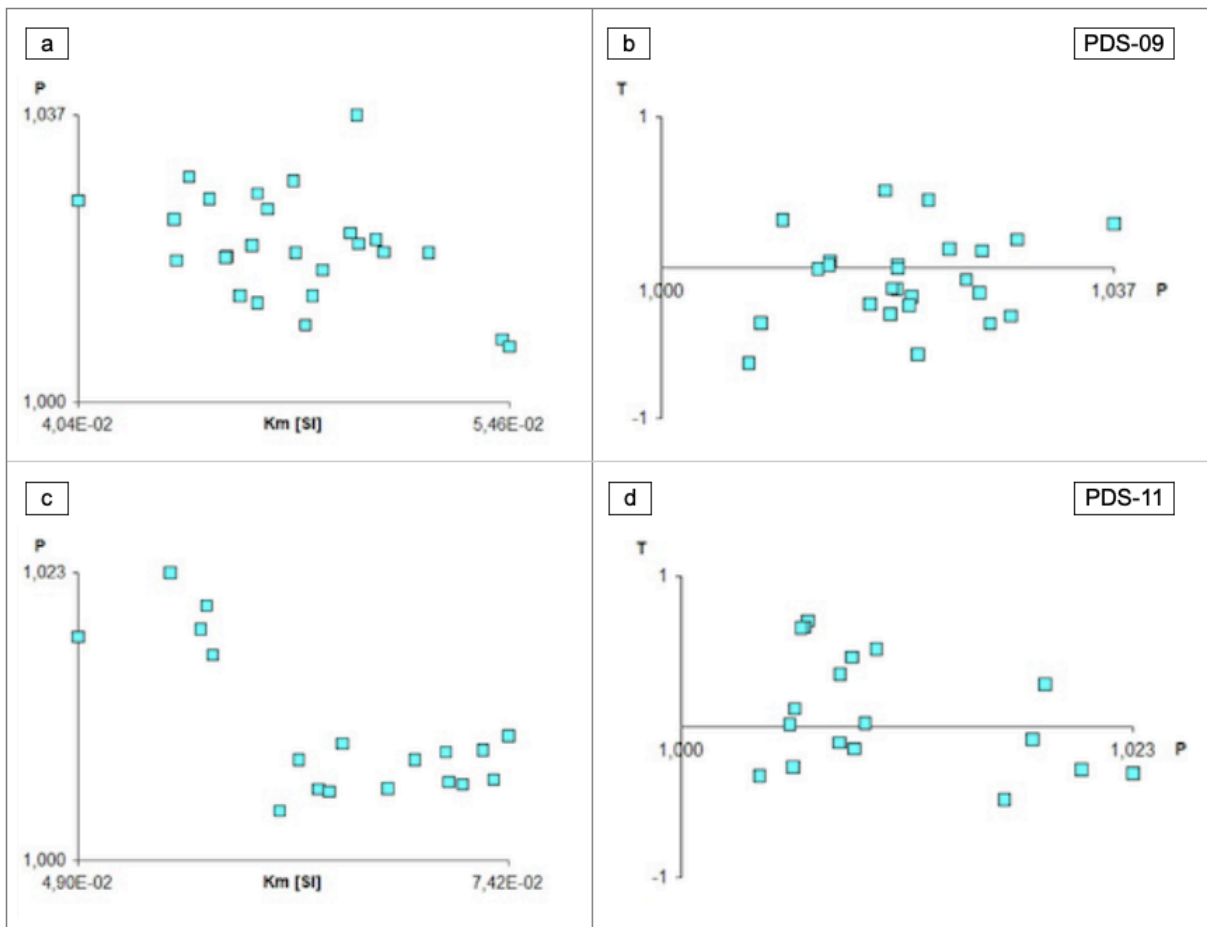


Figura 18. Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) *versus* susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) *versus* grau de anisotropia (P).

5.2.1.9 PDS-12

O sítio foi amostrado na borda do dique, com direção NE-SW e com 30cm de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de cerca 1cm de material de aspecto vítreo. O Km possui valor $4,11 \times 10^{-2}$ SI, considerado alto. O P apresenta um valor de 1,103 e, quando comparado ao Km, o P aumenta (Fig. 19a). A relação entre T e P mostra que os espécimes estão todos agrupados na região de $T < 0$, prolatos, com uma média de -0,301 (Fig. 19b).

5.2.1.10 PDS-13

O sítio foi amostrado no centro do dique, com direção NE-SW e com 8m de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de 10cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km é considerado alto, com um valor de $5,83 \times 10^{-2}$ SI. O P tem um valor médio de 1,007 e, quando comparado ao Km, o P encontra-se bastante disperso (Fig. 19c). A relação entre T e P mostra que os espécimes apresentam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, na mesma proporção, e uma média de 0,334, predomínio de oblato (Fig. 19d).

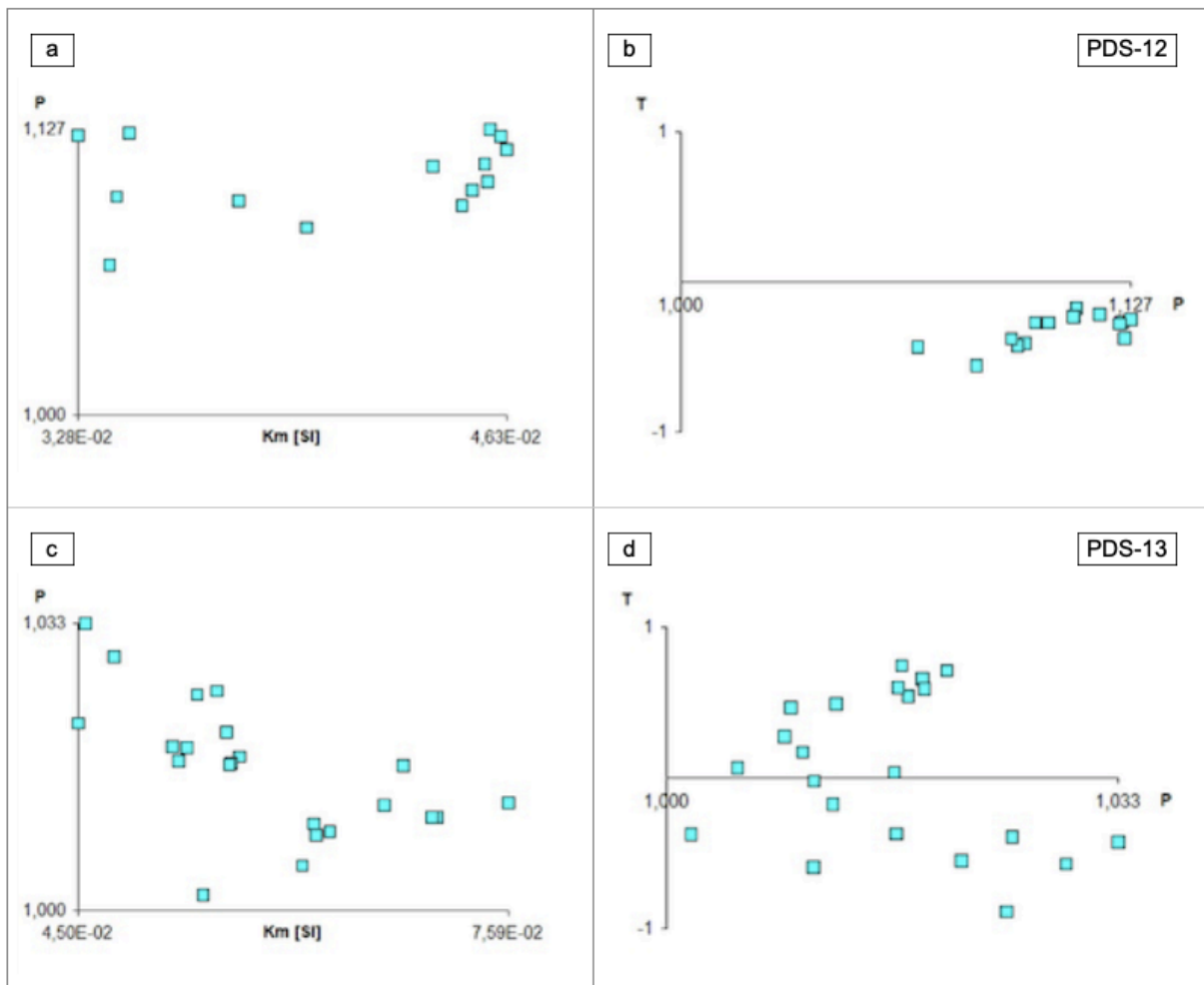


Figura 19. Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

5.2.1.11 PDS-15

O sítio foi amostrado perpendicular à direção do dique, com direção NE-SW e com 50-80cm de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de 1cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km apresenta um valor $4,95 \times 10^{-2}$ SI, considerado alto. O P possui um valor médio de 1,064 e, quando comparado ao Km, o P está disperso e agrupado no centro do gráfico (Fig. 20a). A relação entre T e P demonstra que os espécimes estão todos agrupados em uma média de -0,260, indicando elipsoides prolatos (Fig. 20b).

5.2.1.12 PDS-16

O sítio foi amostrado perpendicular à direção do dique, com direção subvertical e com 0,9-1m de espessura. O dique tem bordas retas e margens resfriadas de 1cm de material afanítico de aspecto vítreo.

O Km apresenta um valor $4,96 \times 10^{-2}$ SI, considerado alto. O P possui um valor médio de 1,017 e, quando comparado ao Km, o P encontra-se disperso com uma pequena concentração no meio do gráfico (Fig. 20c). A relação entre T e P demonstra que os espécimes estão agrupados em uma média de -0,767, indicando elipsoides prolatos. Contudo, há um elipsoide com $T=0$ (Fig. 20d).

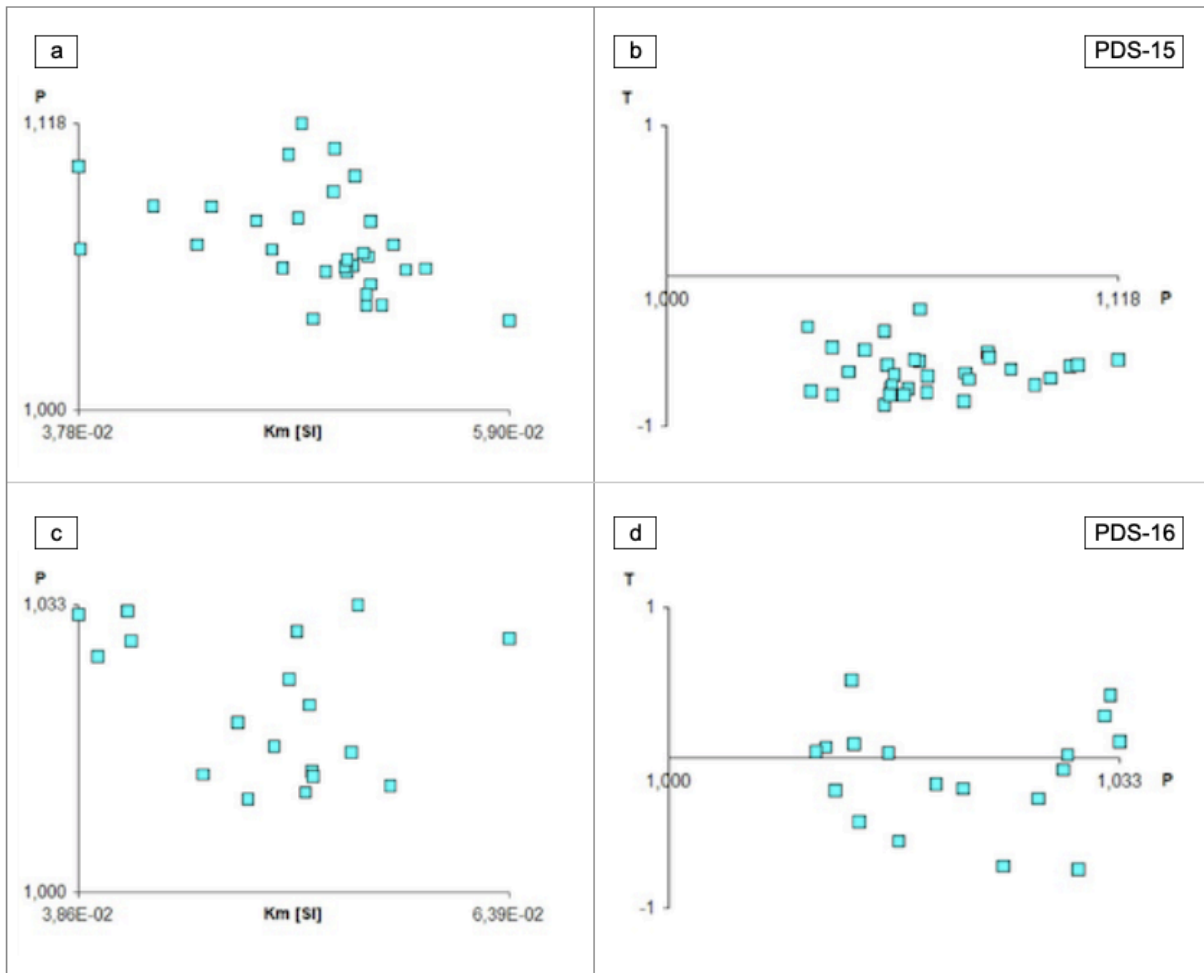


Figura 20. Diagrama de correlação entre: (a) (c) grau de anisotropia (P) *versus* susceptibilidade magnética média (Km) e, (b) (d) parâmetro de forma (T) *versus* grau de anisotropia (P).

5.2.2 Dados direcionais das intrusões

5.2.2.1 PDS-01

A direção do dique medida em campo é NW-SE (Fig. 21b). Os eixos magnéticos (K_1 , K_2 e K_3) encontram-se relativamente bem agrupados, com exceção de alguns pontos que estão mais dispersos do agrupamento principal. O K_1 tem direção SW com baixo ângulo de caimento, K_2 apresenta um agrupamento na região NW, enquanto K_3 tem um agrupamento na área SE, quase leste. A foliação magnética, dada pelo alinhamento de K_1 e K_2 , concorda com a direção medida em campo. A lineação possui sentido SW (Fig. 21a).

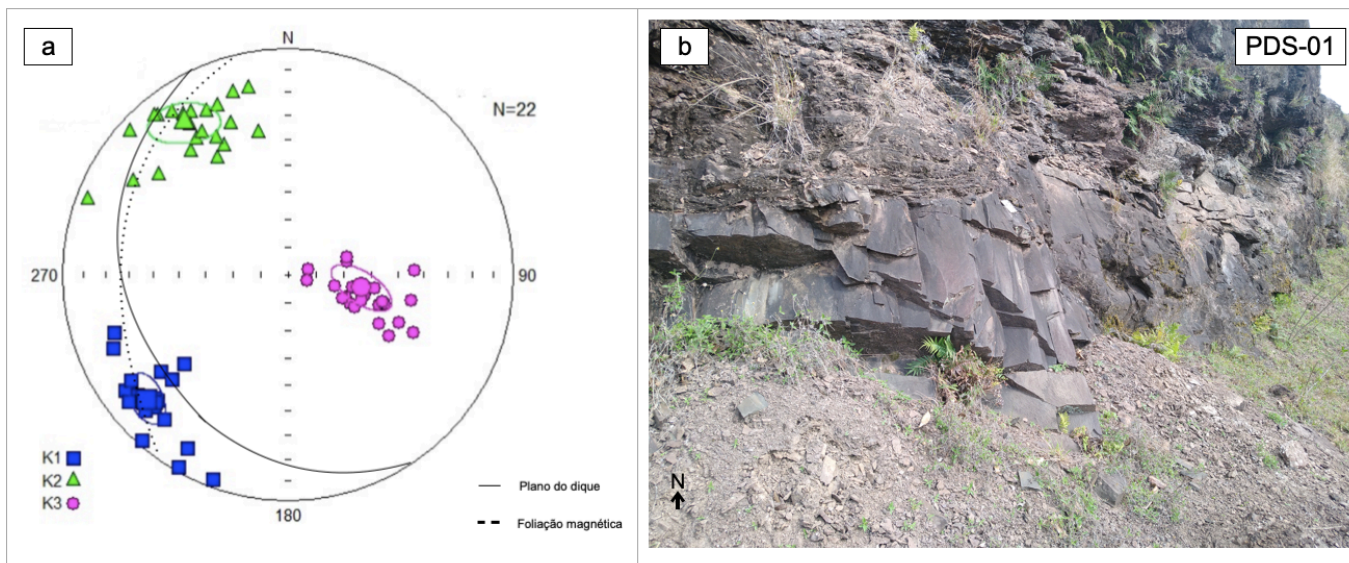


Figura 21. (a) Resultados da ASM para o sítio PDS-01, (b) dique cortando os derrames básicos da Fm. Torres do Grupo Serra Geral.

5.2.2.2 PDS-03

A direção do dique medida em campo é NE-SW. Os eixos magnéticos encontram-se relativamente bem agrupados, com exceção de alguns pontos que estão mais dispersos do agrupamento principal. O K1 tem direção E com alguns pontos em NE e SE, e ângulo de caimento mediano, K2 apresenta um agrupamento na região SW, enquanto K3 tem um agrupamento na área NW. A foliação magnética tem direção concordante com a medida em campo, e a lineação tem sentido E.

5.2.2.3 PDS-06

A direção do dique medida em campo é NE-SW. Neste sítio, os eixos magnéticos estão dispersos, porém é possível definir a foliação magnética como tendo direção NE-SW, concordante com a medida em campo, e lineação possuindo sentido NE. O K1 encontra-se distribuído na região NE, o K2 no quadrante SW e o K3 na área NE do estereograma.

5.2.2.4 PDS-08

A direção do dique medida em campo é NE-SW. O sítio PDS-08 não apresenta um padrão dos eixos magnéticos bem definido. O alinhamento da foliação magnética indica uma direção NE-SW, concordante com a medida em campo, e lineação com sentido SW, ao passo que o K₃ possui um baixo ângulo de caimento no quadrante SE.

5.2.2.5 PDS-09

A direção da soleira medida em campo é NE-SW (Fig. 22b). O eixo magnético K₁ está um pouco mais agrupado que os eixos K₂ e K₃, os quais estão bem dispersos. O K₁ tem baixo ângulo de caimento no quadrante SW. Apesar de estarem muito espalhados pelo estereograma, é possível inferir a direção do plano da foliação da intrusão em NW-SE, discordante da direção medida em campo, e lineação com sentido SW (Fig. 22a).

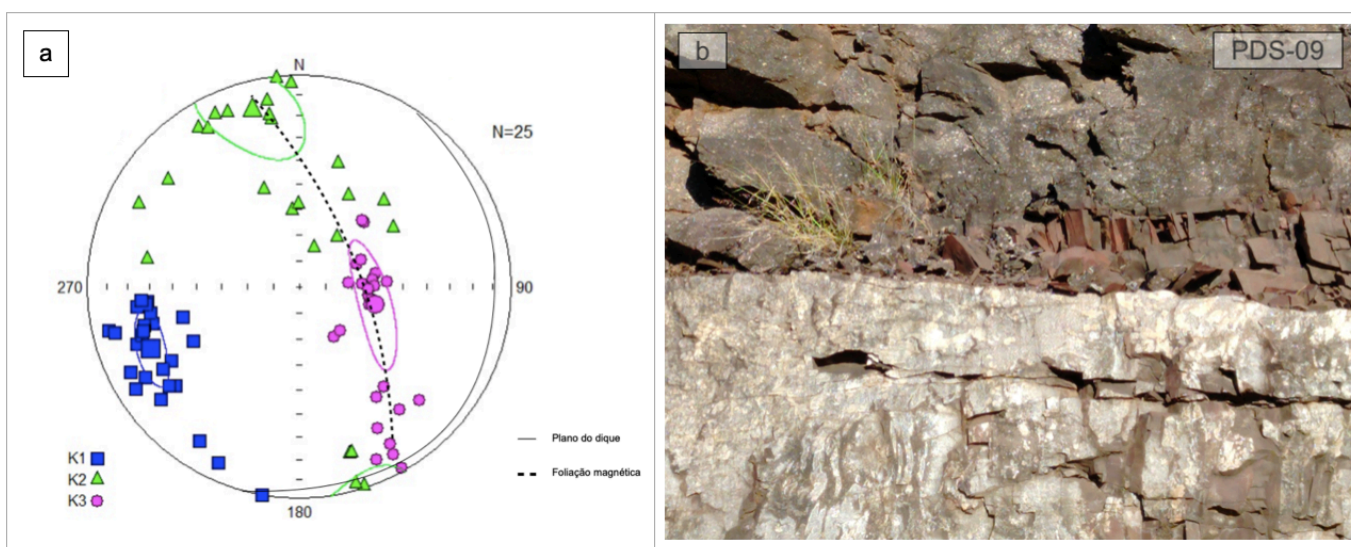


Figura 22. (a) Resultados da ASM para o sítio PDS-09, (b) soleira cortando os derrames básicos da Fm. Torres do Grupo Serra Geral.

5.2.2.6 PDS-11

A direção do dique medida em campo é NE-SW. Todos os eixos magnéticos encontram-se dispersos. O K₁ possui um agrupamento pequeno na borda NE, o K₂

está distribuído na parte SW e K3 nas bordas NW-SE. É possível observar que K2 e K3 se interpolam levemente, quase formando uma guirlanda. A foliação magnética tem direção NW-SE, discordante com a medida em campo, e lineação com sentido NE.

5.2.2.7 PDS-12

A direção do dique medida em campo é NE-SW. Os eixos magnéticos estão pouco dispersos. O eixo K1 apresenta um ângulo de caimento mediano no quadrante SE e o eixo K2 encontra-se na borda SW do estereograma. É possível identificar a relação entre K1 e K2, indicando que o plano da foliação deste dique possui direção concordante com a medida em campo, e lineação com sentido SE. O eixo magnético K3 constitui um pequeno agrupamento na região NW.

5.2.2.8 PDS-15

A direção do dique medida em campo é NE-SW (Fig. 23b). O eixo magnético K1 é bem definido, com um forte agrupamento no centro do estereograma. Tanto o eixo K2 quanto o K3 apresentam uma grande dispersão e estão distribuídos nas bordas NW e NE, principalmente, interpolando-se e formando uma guirlanda. Contudo, é possível determinar a foliação magnética como tendo direção NE-SW, concordante da medida em campo, e lineação com sentido SE (Fig. 23a).

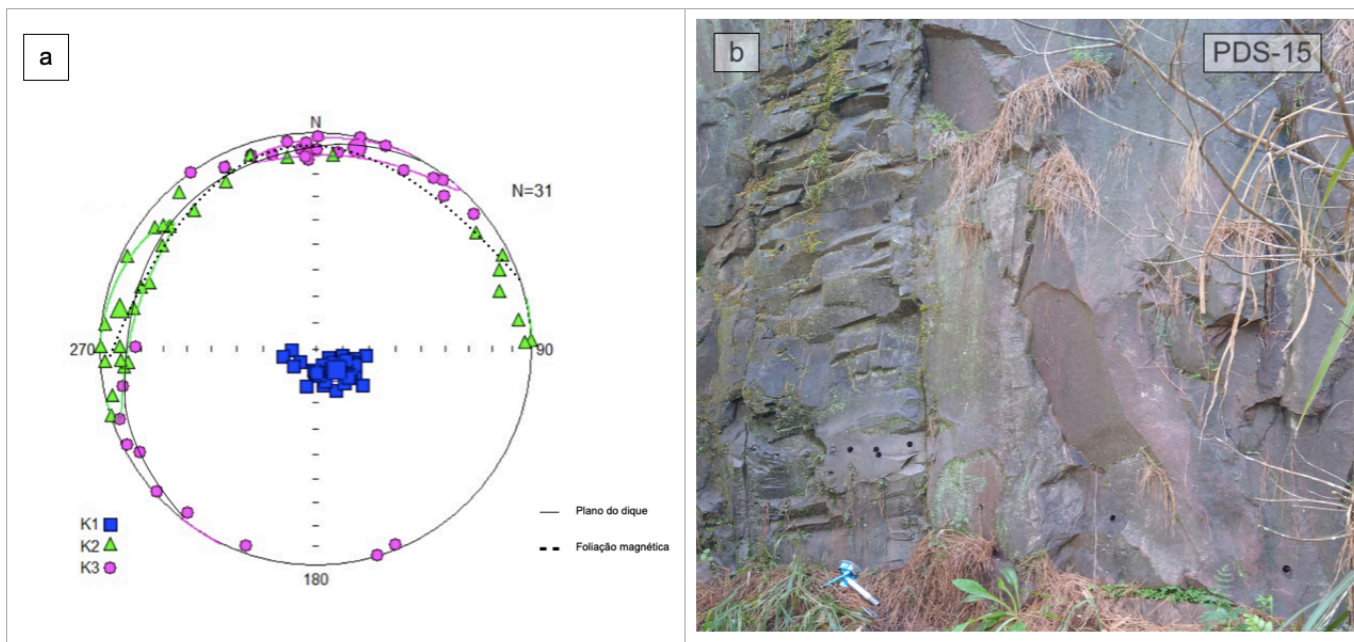


Figura 23. (a) Resultados da ASM para o sítio PDS-15, (b) dique cortando os derrames básicos da Fm. Torres do Grupo Serra Geral.

5.2.2.9 PDS-16

A direção do dique medida em campo é NE-SW. O sítio PDS-16 não apresenta um padrão dos eixos magnéticos bem definido. O alinhamento da foliação magnética indica uma direção NE-SW, concordante com a medida em campo, e lineação com sentido SW. O eixo K1 possui um ângulo de caimento médio e o eixo K2 um baixo ângulo de caimento, enquanto que o eixo K3 possui um baixo ângulo de caimento no quadrante NW.

5.2.2.10 PDS-07 e PDS-13

Os sítios PDS-07 e PDS-13 não foram possíveis de chegar a uma conclusão das suas direções devido aos eixos magnéticos (K1, K2 e K3) apresentarem uma alta dispersão (Fig. 24).

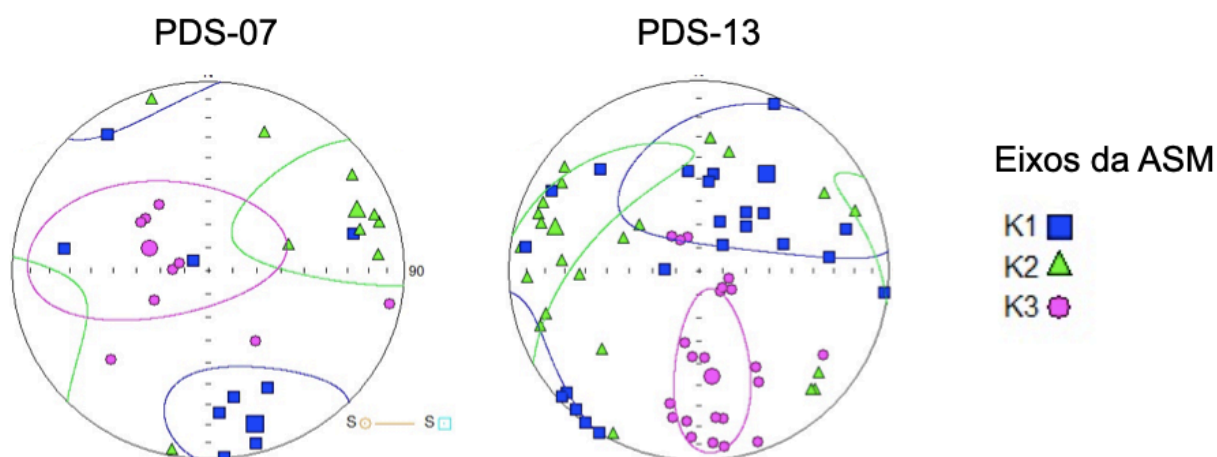


Figura 24. Resultados da ASM para os sítios PDS-07 e PDS-13.

5.3 Mineralogia Magnética

A mineralogia magnética das intrusões indica um predomínio de Ti-Magnetita como o principal portador de ASM, conforme estudo geoquímico e petrográfico de Sarmiento *et al.*, (2017).

As curvas de histerese apresentaram um formato esperado para uma mineralogia ferromagnética, com curvas simétricas com uma cintura mais estreita para todas as amostras analisadas (Tauxe *et al.*, 2018) (Fig. 25a). Pode-se determinar a contribuição paramagnética através da estimativa da declividade dos extremos das curvas de histerese não corrigidas (curva em azul na Fig. 25). Com isso, é possível determinar que estas curvas apresentam uma pequena contribuição paramagnética devido a baixa diferença entre as curvas corrigidas e não corrigidas (Tauxe *et al.*, 2018).

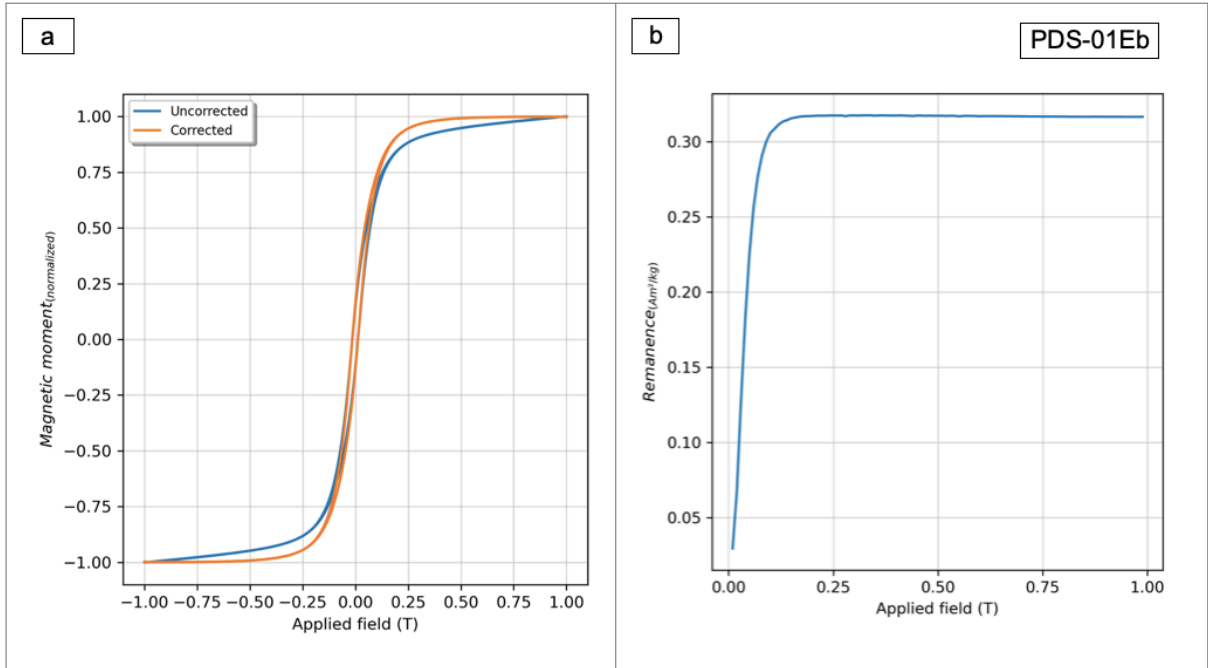


Figura 25. Ciclo de histerese (a) e MRI (b) representativo para todos os sítios.

6 DISCUSSÃO

6.1 Dados escalares

A susceptibilidade magnética média é da mesma ordem (10^{-2} SI) para todos os sítios, indicando uma grande contribuição dos minerais ferromagnéticos (Tarling & Hrouda, 1993; Cañon-Tapia, 2004). O grau de anisotropia das amostras estudadas tem um valor médio de 1,014, de acordo com os reportados para as rochas basálticas do Mesozóico (Raposo, 1997). Quando comparado aos valores de Km não é possível observar uma tendência nos dados: em algumas amostras o P aumenta progressivamente conforme a susceptibilidade magnética aumenta, e em outras o P é alto enquanto a susceptibilidade magnética é baixa, e vice-versa (Fig. 26).

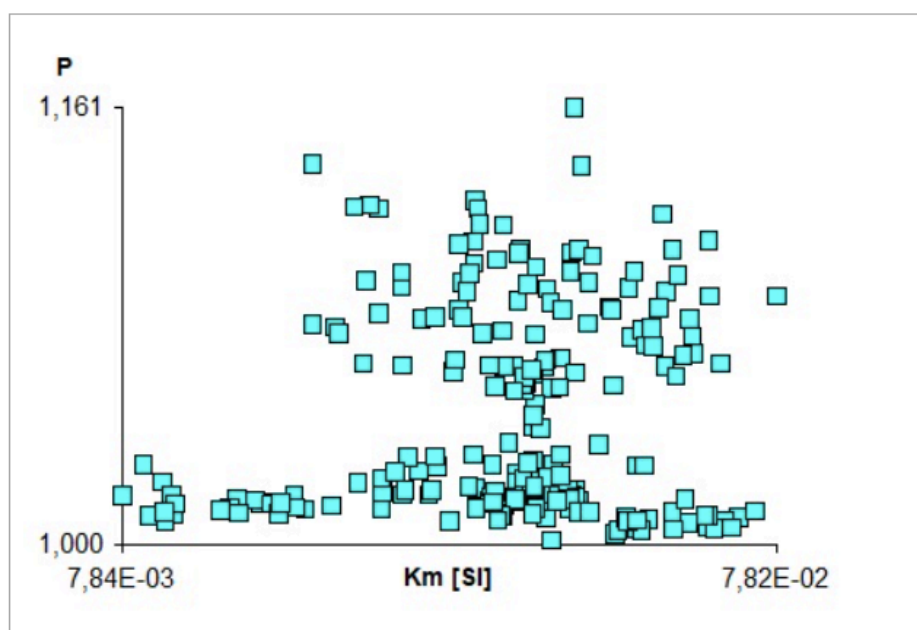


Figura 26. Diagrama de correlação entre grau de anisotropia (P) *versus* susceptibilidade magnética média (Km) de todas as intrusões.

A relação entre o parâmetro de forma e o grau de anisotropia mostra que os sítios apresentam tanto elipsoides oblatos quanto prolatos mas, de maneira geral, o predomínio é de elipsoides prolatos com valor médio de 0,202 (Fig. 27). Ao analisar as intrusões individualmente, foi possível identificar a predominância de elipsoides

oblatos nos sítios PDS-01, PDS-08 e PDS-13; e de elipsoides prolatos nos sítios PDS-03, PDS-06, PDS-07, PDS-09, PDS-11, PDS-12, PDS-15 e PDS-16.

Segundo Knight & Walker (1988), os elipsoides prolatos representam, teoricamente, as bordas de uma intrusão e que constituem uma imbricação, podendo estar relacionada à velocidade do fluxo, a qual é maior nas bordas. Por outro lado, elipsoides oblatos representam o centro da intrusão, onde a velocidade de fluxo é menor.

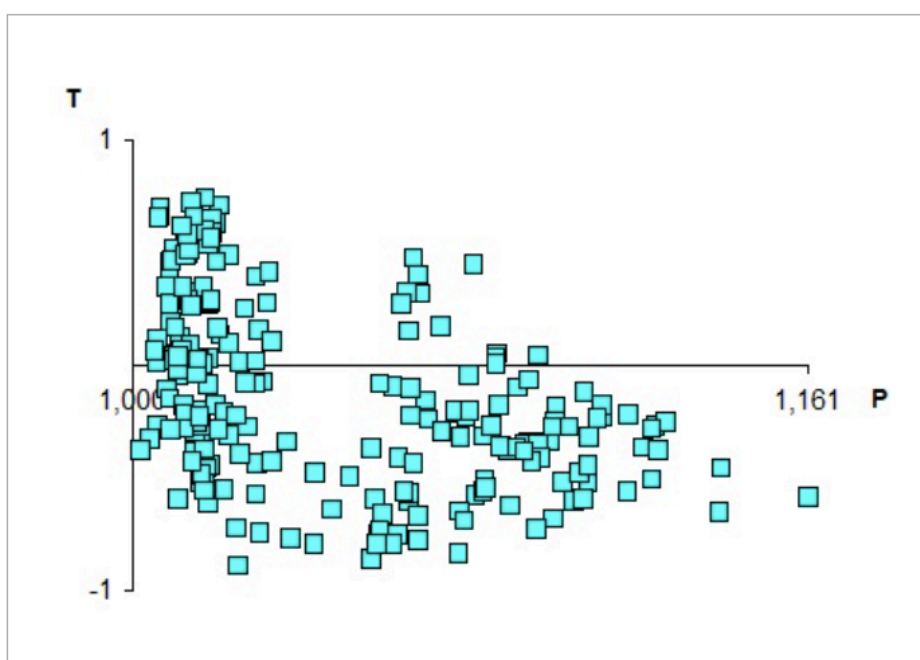


Figura 27. Diagrama de correlação entre parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P) de todas as intrusões.

6.2 Direção de Fluxo

As direções de fluxo foram interpretadas segundo Tomé *et al.* (2014) e Cañon-Tapia *et al.* (2004), onde o K1 associado ao K2 indica a direção do plano da foliação magnética da intrusão e o K1, o sentido do fluxo magmático.

Ao comparar a foliação e sentido magnético de todos os sítios é possível observar que a direção preferencial é NE-SW (Fig. 28) e o sentido predominante é para SE, secundariamente para SW e NE. O eixo máximo principal de susceptibilidade magnética, K1, está no plano da maioria dos diques com inclinação

variando de horizontal a subvertical. O eixo mínimo principal de susceptibilidade magnética, K_3 , apresenta inclinação predominantemente horizontal, porém alguns estão próximos aos planos da foliação magnética.

Dados de Wiegand *et al.* (2016) mostram que as direções de intrusões máficas pertencentes ao Enxame de Diques de Henties Bay Outjo na Namíbia, África, da Província Magmática Etendeka, possuem direção dominante NE-SW e secundariamente NW-SE. Trabalhos realizados na parte brasileira desta província também corroboram a direção predominante em NE-SW, tanto para intrusões máficas (Raposo *et al.*, 1994; Raposo, 1997; Acosta, 2022) quanto para as ácidas (Simões *et al.*, 2018).

Para a interpretação de *emplacement* das intrusões, Knight & Walker (1988) estabelecem os limites da inclinação de K_1 usados para inferir o modo de colocação dos corpos intrusivos (horizontal, inclinado ou vertical) e se estão longe ou não da câmara magmática. Com isso, os limites são $K_1 < 30^\circ$ indica que os diques foram alimentados por derrames horizontais ou sub-horizontais; $30^\circ < K_1 < 60^\circ$ indica que o magma entrou de forma inclinada e $K_1 > 60^\circ$ indica um *emplacement* vertical.

As intrusões do Grupo Serra Geral, na região nordeste do Rio Grande do Sul, foram alimentados por fluxos inclinados e horizontais, predominantemente, sendo que apenas uma foi alimentada por fluxo vertical (PDS-15), semelhantes aos dados para o enxame de diques do Arco de Ponta Grossa, Paraná, de Raposo *et al.* (1995) e para o enxame de diques de Florianópolis, Santa Catarina, de Raposo (1997) (dados das inclinações na Tabela 2 nos anexos).

Os fluxos com inclinações mais verticais sugerem que as intrusões estavam mais próximas da fonte de magma, enquanto que os fluxos com inclinações mais horizontais estariam mais longe da fonte magmática (Ernst, 1990). Segundo Raposo *et al.* (1994) e Raposo (1997), em estudos feitos no Arco de Ponta Grossa e no Enxame de Diques de Florianópolis, a fonte de magma que alimentou estas intrusões estava localizada ao sul do Arco de Ponta Grossa, perto da ilha de Santa Catarina.

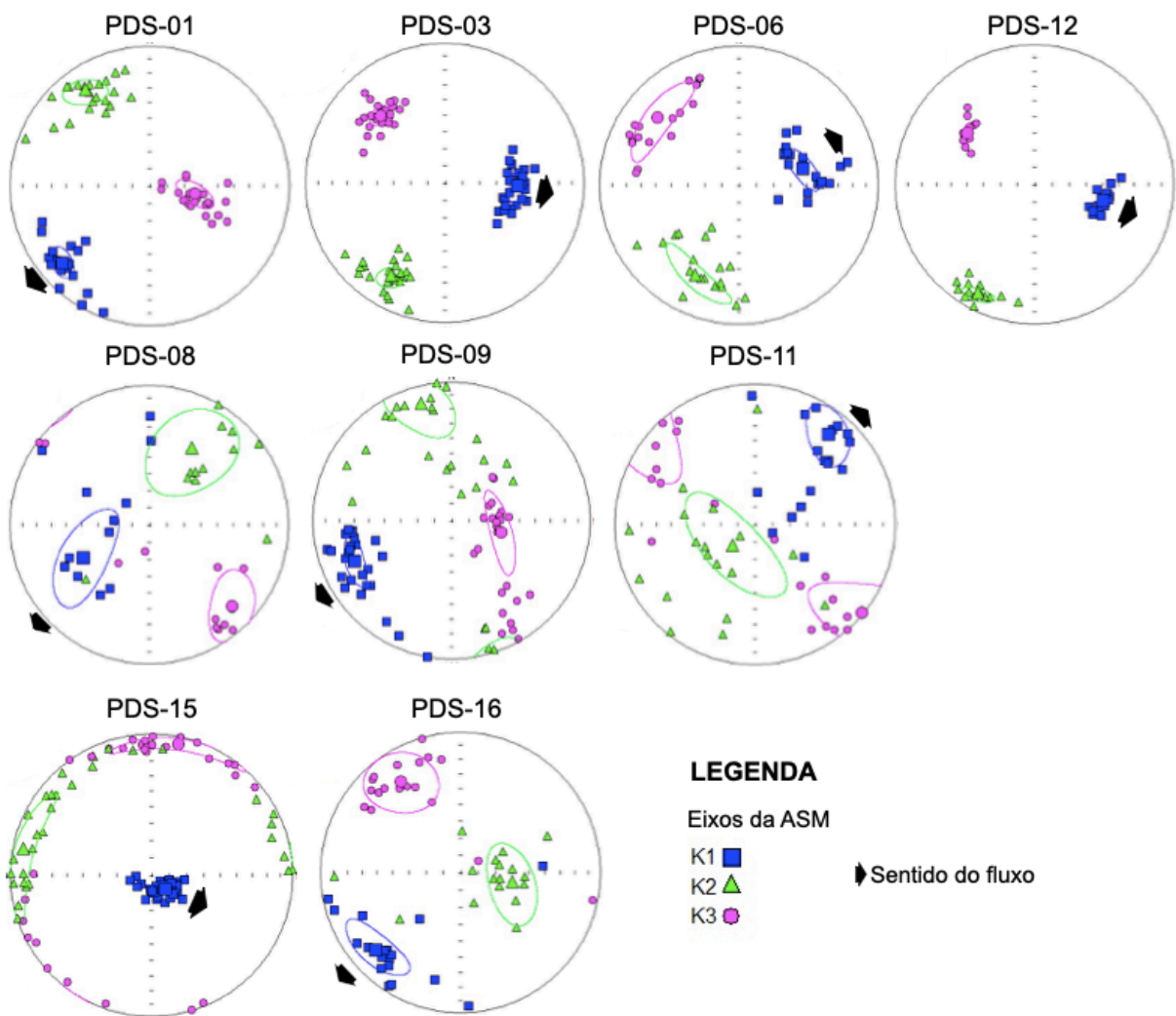


Figura 28. Estereogramas representativos das intrusões.

6.3 Mineralogia magnética

A identificação da mineralogia magnética das rochas é muito importante para a análise de ASM, como enfatizado por Rochette *et al.*, (1992) e Moncinhatto *et al.*, (2020). Quando combinadas as observações e estruturas de campo, a mineralogia magnética se torna um fator decisivo na interpretação das direções de fluxo das unidades vulcânicas (Knight & Walker, 1988; Cañón-Tapia, 2004).

A análise conjunta dos das curvas de histerese e MRI permitiu identificar um padrão semelhante a todos os espécimes analisados. Este padrão apresenta uma curva de histerese simétrica com uma cintura mais estreita, formato indicativo de que há apenas uma fase mineral ferromagnética e de baixa coercividade ($H_c < 25$ mT)

(Tauxe *et al.*, 2018) e curvas MRI que saturam antes de 300mT, típicas de titanomagnetita.

As curvas de histerese também indicam que há uma mistura de grãos SD e MD (Fig.29), devido a algumas curvas apresentarem uma diferença entre a curva corrigida e a não-corrigida. Entretanto, é necessário analisar estas amostras em MEV para confirmar esta mistura de domínios.

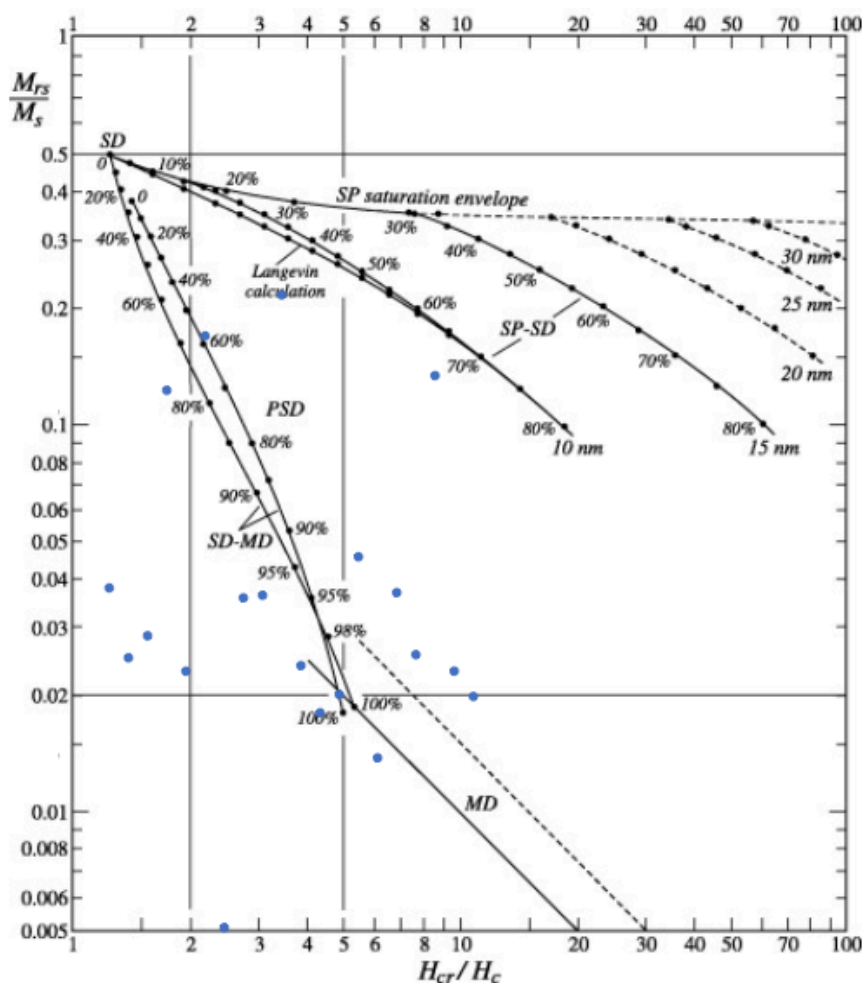


Figura 29. Diagrama de Day para resultados de histerese dos sítios analisados (Day *et al.*, 1977, modificado por Dunlop, 2002). H_{cr} - coercividade de remanência; H_c - coercividade; M_{rs} - magnetização remanente de saturação; M_s - magnetização de saturação; SD - single-domain, PSD - pseudo-simple domain, MD - multi-domain.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados de ASM e mineralogia magnética, juntamente com dados de campo, foi possível identificar a direção de fluxo e *emplacement* das intrusões relacionadas ao vulcanismo do Grupo Serra Geral.

As intrusões são classificadas morfologicamente como diabásios, com textura equigranular fina no centro e com bordas afaníticas, cortando os derrames *pahoehoes* e os arenitos da Formação Botucatu. Apresentam morfologias simétrica e assimétrica, variando de 0,30-8m.

A mineralogia magnética demonstra que a susceptibilidade magnética das intrusões é da ordem de 10^{-2} SI, apontando para uma contribuição de minerais ferromagnéticos.

As curvas de histerese são caracterizadas por minerais de baixa coercividade. A Ti-Magnetita é o principal mineral magnético portador de ASM nas rochas.

Os dados de parâmetro de forma indicam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos. Apesar da sua distribuição não apresentar uma mudança significativa, os elipsoides sutilmente dominantes são os prolatos, indicando que estas intrusões são caracterizadas por uma trama linear.

A direção preferencial das intrusões é NE-SW, concordante com as direções medidas em campo. Os sentidos principais são para SE e SW.

Com a análise da inclinação de K_1 , foi possível determinar que os sítios PDS-01, PDS-09, PDS-11 e PDS-16 foram alimentados por fluxo de magma horizontal ($K_1 < 30^\circ$), indicando que poderiam estar longe da câmara magmática. O sítio PDS-15 por fluxo vertical ($K_1 > 60^\circ$), o que indica que estava perto da câmara magmática. E os sítios restantes, que foram alimentados por fluxos inclinados ($30^\circ < K_1 < 60^\circ$), podem indicar que a fonte de magma estava relativamente perto.

REFERÊNCIAS

Acosta, A.C.M. (2022). **Geologia, litogeoquímica e anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) do vulcanismo da Província Magmática Paraná, Morro da Igreja, SC: mecanismos de colocação, orientação de fluxo magmático e implicações estratigráficas**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geociências) - Universidade Federal de Santa Catarina. 90 p.

Almeida, F.F.M. (1986). **Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil**. Revista Brasileira Geociências, 16(4): 325-349.

Archanjo, C. J.; Launeau, P. (2004). **Magma flow inferred from preferred orientations of plagioclase of the Rio Ceara-Mirim dyke swarm (NE Brazil) and its AMS significance**. Geological Society, London, Special Publications, 238(1), 285–298. doi:10.1144/GSL.SP.2004.238.01.17

Atkinson, B. K. (1987). **Fracture Mechanics of Rock**. Academic Press. London. 380p.

Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L. S., Melfi, A. J., Stolf A, D. (1984). **Low-pressure evolution of basalt sills from bore-holes in the Paraná Basin, Brazil**. TMPM, 33: 25-47.

Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L. S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E. M., Roisenberg, A. (1986). **Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships**. Journal of Petrology, 27, 915-944.

Billings, M. P. (1972). **Structural Geology**. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 606 p.

Bondre, N.R., Hart, W.K. , Sheth, H.C. (2006). **Geology and geochemistry of the Sangamner mafic dyke swarm, western Deccan volcanic province, India: implications for regional stratigraphy**. Journal of Geology 114: 155–170.

Burgess, S.D., Muirhead, J.D. & Bowring, S.A. (2017). **Initial pulse of Siberian Traps sills as the trigger of the end-Permian mass extinction**. Nat Commun 8, 164. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00083-9>

Butler, Robert F. **Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes**. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1992.

Brueseke, M. E., Heizler, M. T., Hart, W. K., Mertzman, S. A. (2007). **Distribution and geochronology of Oregon Plateau (U.S.A.) flood basalt volcanism: The Steens Basalt revisited**. J. Volcanol. Geotherm. Res. 161: 187– 214.

Cañón-Tapia, Edgardo. (2004). **Anisotropy of magnetic susceptibility of lava flows and dykes: A historical account**. Geological Society, London, Special Publications. 238. 205-225. 10.1144/GSL.SP.2004.238.01.14.

Chenet, A-L., Fluteau, F., Courtillot, V., Gérard, M., Subbarao, K.V. (2008). **Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment**. Journal of Geophysical Research, 113, B04101.

Corval, A., Valente, S., Duarte, B. P., Famelli, N., Zanon, M. (2008). **Dados petrológicos preliminares dos diabásios dos setores centro-norte e nordeste do Enxame de Diques da Serra do Mar**. Geochimica Brasiliensis 22, 159-177.

Corval, A. V., (2009). **Petrogênese e Contexto Geodinâmico das Suítes Basálticas Toleíticas (de alto -TiO₂ e baixo - TiO₂) do Cretáceo Inferior da Formação Centro-oriental do Enxame de Diques da Serra do Mar**. Tese (Doutorado) - Centro de Tecnologia e Ciências. Faculdade de Geologia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Day, R., Fuller, M., Schmidt, V. A. (1977). **Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence**. Physics of the Earth and planetary interiors, 13(4), 260-267.

Deckart, K., Féraud, G., Marques, L.S., Bertrand, H. (1998). **New time constraints on dyke swarms related to the Paraná – Etendeka magmatic province, and**

subsequent South Atlantic opening, southeastern Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 80: 67-83.

Dunlop D. J.; Özdemir, Ö (1997). **Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers.** Cambridge: University Press. p. 573.

Dunlop, D. J. (2002). **Theory and application of the Day plot (*Mrs/Ms* versus *Hcr/Hc*) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils,** *J. Geophys. Res.*, 107 (B3), doi:10.1029/2001JB000487.

Ernesto, M., Pacca, I., Hiedo, F., Nardy, A. (1990). **Palaeomagnetism of the Mesozoic Serra Geral Formation, southern Brazil.** *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 64, 153–175.

Ernesto, M., Raposo, M., Marques, L., Renne, P., Diogo, L., De Min, A. (1999). **Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the north-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications.** *Journal of Geodynamics*, 28, 321–340.

Ernst, R., (1990). **Magma flow in two mafic Proterozoic dyke swarms of the Canadian Shield as estimated using anisotropy of magnetic susceptibility data.** In: Paker, A.J., Rickwood, P.C., Tucker, D.H. (Eds.), *Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 231–235.

Fedorenko, V.; Czamanske, G. (1997). **Results of new field and geochemical studies of the volcanic and intrusive rocks of the Maymecha-Kotuy area, Siberian flood-basalt province, Russia.** *Int. Geol. Rev.* 39, 479–531.

Florisbal, L. M., Heaman, L. M., Janasi, V. A., Bitencourt, M. F. (2014). **Tectonic significance of the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná–Etendeka Magmatic Province: A reappraisal based on precise U–Pb dating.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 289, 140-150.

Florisbal, L. M., Janasi, V. A., Bitencourt, M. F., Nardi, L. V. S., Marteleto, N. S. (2018). **Geological, geochemical and isotope diversity of ~ 134 Ma dykes from the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná Magmatic Province: Geodynamic controls on petrogenesis.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355, 181–203.

Fodor, R.V.; McKee, E.H.; Roisenberg, A. (1989). **Age distribution of Serra Geral (Paraná) flood basalts, southern Brazil.** *Journal of South American Earth Sciences*, 2(4), 343–349. doi:10.1016/0895-9811(89)90012-6.

Frank, H.T., Gomes, M.E.B., Formoso, M.L.L. (2009). **Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America.** *Pesquisas em Geociências*, 36 (1), 49-57.

Gambeta, J.H. (2021). **Anisotropia magnética em sistemas vulcânicos ácidos: aplicação ao vulcanismo Acampamento Velho no platô do Taquarembó, extremo sul do Brasil.** Tese (Programa de Pós-Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 93 p.

Gibson, S.A., Thompson, R.N., Day J.A. (2006). **Timescales and mechanisms of plume–lithosphere interactions: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná–Etendeka large igneous province.** *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 1-17.

Haag, M.B. (2019). **Anisotropia de susceptibilidade magnética aplicada a determinação do sentido de fluxo de lavas e ignimbritos do complexo vulcânico Caviahue-Copahue (Argentina).** Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 100 p.

Haag, M. B.; Sommer, C. A.; Savian, J.F.; Caselli, A.T.; Moncinhatto, T.R.; Hartmann, G.A.; Ort, M.H.; Poletti, W.; Trindade, R.I.F. (2021). **AMS and rock magnetism in the Caviahue-Copahue Volcanic Complex (Southern Andes): Emission center, flow dynamics, and implications to the emplacement of non-welded PDCs.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107283

Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. and Banerjee, S.K. (1995). **Magnetic Properties of Rocks and Minerals.** In *Rock Physics & Phase Relations*, T.J. Ahrens (Ed.). <https://doi.org/10.1029/RF003p0189>.

Jelínek, V. (1981). **Characterization of the magnetic fabric of rocks.** *Tectonophysics*, 79(3-4), T63–T67.

Knight, Michael D.; Walker, George P. L. (1988). **Magma flow directions in dikes of the Koolau Complex, Oahu, determined from magnetic fabric studies**. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5), 4301–. doi:10.1029/jb093ib05p04301.

Lima, E.F.; Philipp, R. P.; Rizzon, G.C.; Waichel, B.L.; Rossetti, L.M.M. (2012a). **Sucessões Vulcânicas e Modelo de Alimentação e Geração de Domos de Lava Ácidos da Formação Serra Geral na Região de São Marcos-Antonio Prado (RS)**. *Geol. USP. Série Científica*, 12: 49-64.

Lima, E.F.; Waichel, B.L.; Rossetti, L.M.M.; Viana, A.R.; Scherer, C.M.; Bueno, G.V.; Dutra, G. (2012b). **Morphology and petrographic patterns of the pahoehoe and 'a'a flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline (Rio Grande do Sul state, Brazil)**. *Rev. Bras. Geoc.*, 42: 744-753.

Lyra, D.S. (2018). **Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) aplicada ao modelo de posicionamento do Granito Butiá: um granito peraluminoso sintectônico do sul do Brasil**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 85 p.

Mantovani, M.S.M., Marques, L.S., Souza, M.A., Atalla, L., Civeta, L., Inonocenti, F. (1985). **Trace Element and Strontium Isotope Constrains of the Origin and Evolution of Paraná Continental Flood Basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil)**. *Journal of Petrology*, 26: 187-209.

Milani, E.J.; Fernandes, L.A.; França, A.B; Melo, J.H.G.; Souza, P.A. (2007). **Bacia do Paraná**. In: Milani, E.J. (ed.). *Boletim de geociências da Petrobrás, Cartas estratigráficas*. Petrobrás, 15 (2): 265-287.

Moncinhatto, T.R., Haag, M.B., Hartmann, G.A., Savian, J.F., Poletti, W., Sommer, C.A., Caselli, A.T. Trindade, R.I.F. (2020). **Mineralogical control on the magnetic anisotropy of lavas and ignimbrites: a case study in the Caviahue-Copahue field (Argentina)**. *Geophysical Journal International*, 220:821-838.

Motoki, A., Sichel S.E. (2008). **Hydraulic fracturing as a possible mechanism of dyke-sill transitions and horizontal discordant intrusions in trachytic tabular bodies of Arraial do Cabo, State of Rio de Janeiro, Brazil**. *Geofísica Internacional*, 47 (1): 13- 25.

Nardy, A.J.R. (1995). **Geologia e petrologia do vulcanismo mesozóico da região central da Bacia do Paraná**. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo.

Pavlov, V.E., Courtillot, V., Bazhenov, M.L., Veselovsky, R.V. (2007). **Paleomagnetism of the Siberian traps: New data and a new overall 250 Ma pole for Siberia**. *Tectonophysics*, 443(1-2), 72-92.

Piccirillo, E.M., Civetta, L., Petrini, R., Longinelli, A., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J. (1989). **Regional variations within the Paraná Flood Basalts (Southern Brazil): Evidence for subcontinental mantle heterogeneity and crustal contamination**. *Chemical Geology*, 75, 103-122.

Piccirillo, E. M.; Bellieni, G.; Cavazzini, G.; Comin-Chiaramonti, P.; Petrini, R.; Melfi, A. J.; Pinesi, J. P. P.; Zantadeschi, P.; Demin, A. (1990). **Lower Cretaceous tholeiitic dyke swarms from the Ponta Grossa (southeast Brazil): Petrology, Sr-Nd isotopes and genetic relationships with the Paraná flood volcanic**. *Chemical Geology, Netherlands*, 89: 19-48.

Raposo, M.I.B., Ernesto, M. (1995). **Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction**. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 87:183–196.

Raposo, M.I.B. (1997). **Magnetic fabric and its significance in the Florianópolis dyke swarm, southern Brazil**, *Geophysical Journal International*, Volume 131, Issue 1, Pages 159–170, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb00602.x>

Raposo M.I.B., Ernesto M., Renne P.R. (1998). **Paleomagnetism and dating of the early Cretaceous Florianópolis dike swarm (Santa Catarina Island), Southern Brazil**. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 108(4):275-290. DOI: 10.1016/S0031-9201(98)00102-2

Rocha, B.C.; Davies, J.H.F.L; Janasi, V.A.; Schaltegger, U.; Nardy, A.J.R.; Greber, N.D.; Lucchetti, A.C.F.L.; Polo, L.A. (2020). **Rapid eruption of silicic magmas from the Paraná magmatic province (Brazil) did not trigger the Valanginian event**. *Geology* 2020; 48 (12): 1174–1178. doi: <https://doi.org/10.1130/G47766.1>

Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C. (1992). **Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility**. Rev. Geophys. 30, 209. doi: 10.1029/92RG00733.

Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simões, M.S., Scherer, C.M.S. (2018). **Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework**. J. Volcanol. Geotherm. Res., 355: 98–114.

Rossetti, L.M.M., Simões, M. S., Lima, E. F., Waichel, B. L., Sommer, C. A. (2021). **Estratigrafia do Grupo Serra Geral na Calha de Torres, Sul do Brasil**. In: Andréa Ritter Jelinek, Carlos Augusto Sommer. (Org.). Contribuições à geologia do Rio Grande do Sul. 1ed.Porto Alegre: Editora Compasso Lugar Cultura, v. 1, p. 321-336.

Sarmiento, C.T., Sommer, C.A., Lima, E.F., Oliveira, D.S. (2014). **Corpos hipabissais associados à Formação Serra Geral na região do Cerro do Coronel, RS: geologia e petrologia**. Geologia da USP. Série Científica. 14 (2) 23-44.

Sarmiento, C.C.T. (2017). **Geologia e Petrologia das Rochas Hipabissais Associadas à Província Magmática Paraná-Etendeka e a sua Correlação Petrogenética com o Vulcanismo da Calha de Torres no Sul do Brasil**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 186 p.

Sarmiento, C.C.T., Sommer, C.A., Lima, E.F. (2017). **Mafic subvolcanic intrusions and their petrologic relation with the volcanism in the south hinge Torres Syncline, Paraná-Etendeka Igneous Province, southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences. 77, 70-91.

Sarmiento, C.C.T., Sommer, C.A., Lima, E.F., Barreto, C.J.S., Rosseti, L.M.R., Lafon, J.M. (2020). **Mafic subvolcanic intrusions from the southern Paraná-Etendeka Large Igneous Province: Insights from geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes**. Geological Journal. 1, 1-24.

Simões, M.S.; Lima, E.F.; Sommer, C.A. (2018). **Litofácies, fábrica magnética e geoquímica de condutos alimentadores e lavas ácidas do Grupo Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul**. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 243 p.

Swanson, D., Wright, T. L., Hooper, P. R., Bentley, R. D. (1979). **Revisions in stratigraphic nomenclature of the Columbia River Basalt Group**. US Geol. Survey. Bull. 1457-G, 59p.

Tarling, D. H., Hrouda, F. (1993). **The Magnetic Anisotropy of Rocks**. Chapman & Hall, London, 217 p.

Tauxe, L., Mullender, T.A.T., Pick, T. (1996). **Potbellies, wast-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis**. J. Geophys. Res. 101 (B1), 571–583.

Tauxe, L., Banerjee, S. K., Butler, R. F., Van der Voo, R. (2018). **Essentials of paleomagnetism**, 5th web edition. Disponível em: EarthRef.org -- Essentials of Paleomagnetism: Third Web Edition. Acesso em: 12/09/2022.

Tomé, C.R. (2014). **Caracterização magnética e estrutural dos diques compostos da Enseada de Zimbros, SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 87 p.

Vanderkluyzen, L., Mahoney, J.J., Hooper, P.R., Sheth, H.C., Ray, R. (2011). **The feeder system of the Deccan Traps (India): insights from dyke geochemistry**. Journal of Petrology 52:315–343.

Waichel, B. L., Lima, E. F., Viana, A., Scherer, C. M. S., Bueno, G., Dutra, G. (2012). **Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province**. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 215: 74-82.

Wiegand, M., et al. (2016). **An AMS study of magma transport and emplacement mechanisms in mafic dykes from the Etendeka Province, Namibia**, Tectonophysics, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.016>

Zalán, P. V., Conceição, J. C. J., Astolfi, M. A. M., Appi, V. T., Wolff, S., Vieira, I. S., Marques, A. (1985). **Estilos estruturais relacionado às intrusões magmáticas básicas em rochas sedimentares**. Boletim Técnico da PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, 28 (4): 221 – 230.

ANEXOS

Tabela 2

Dados de ASM das intrusões do Grupo Serra Geral

Sítios	Espessura (m)	Direção	N	Coordenadas		Parâmetros escalares					Parâmetros direcionais			
				mE	mN	Km (SI)	P	T	K1 (dec/inc)	ϵ_{12} (K2)	K2 (dec/inc)	ϵ_{23} (K2)	K3 (dec/inc)	ϵ_{31} (K3)
PDS-01	3	NW-SE	22	589159	6731084	0,0499 ± 0,00580	1,018	0,006	229,0 / 17,9	8,6 / 6,5	325,5 / 19,5	12,6 / 7,5	99,6 / 63,1	12,7 / 5,5
PDS-03	1,5	NE-SW	28	611668	6748077	0,062 ± 0,00906	1,008	-0,155	92,4 / 47,4	9,3 / 4,8	209,9 / 22,9	8,9 / 5,7	316,2 / 33,6	6,1 / 5,4
PDS-06	1,5-2	NE-SW	19	611793	6748094	0,0562 ± 0,00792	1,082	-0,378	75,2 / 50,9	14,5 / 6,1	205,6 / 27,8	24,6 / 9,4	309,9 / 25,2	24,6 / 9,4
PDS-07	1,5-2	NW-SE	9	614949	6750058	0,0117 ± 0,00184	1,005	-0,061	163,7 / 16,7	35,1 / 25,6	67,6 / 19,6	56,3 / 25,8	291,2 / 63,7	57,0 / 29,1
PDS-08	2	NE-SW	12	614956	6750044	0,0430 ± 0,00700	1,011	0,523	243,9 / 46,0	32,7 / 13,5	29,7 / 38,6	32,8 / 20,5	134,5 / 17,8	21,6 / 12,8
PDS-09	5-8	NE-SW	25	614976	6749965	0,0475 ± 0,00332	1,017	-0,256	247,8 / 25,2	13,3 / 6,4	345,1 / 15,2	25,4 / 13,1	103,2 / 60,0	25,4 / 6,4
PDS-11	1,5	NE-SW	18	614868	6749967	0,0642 ± 0,00743	1,007	-0,311	39,1 / 18,7	18,7 / 11,5	224,4 / 71,3	39,2 / 16,2	129,6 / 1,6	39,2 / 13,3
PDS-12	0,3	NE-SW	14	611791	6748108	0,0411 ± 0,00543	1,103	-0,301	103,1 / 48,2	7,5 / 2,8	207,1 / 12,2	7,9 / 4,5	307,3 / 39,2	5,7 / 2,3
PDS-13	8	NE-SW	22	600899	6739242	0,0583 ± 0,00840	1,007	0,334	34,8 / 38,0	62,1 / 32,9	286,0 / 22,4	62,1 / 16,4	172,9 / 43,6	38,6 / 15,0
PDS-15	0,5-0,8	NE-SW	31	612459	6748222	0,0495 ± 0,00459	1,064	-0,767	135,8 / 79,4	7,7 / 4,2	280,7 / 8,7	30,7 / 7,3	11,6 / 6,0	30,6 / 4,4
PDS-16	0,9-1	Subvertical	17	612408	6748190	0,0496 ± 0,00663	1,017	-0,26	227,3 / 20,0	18,2 / 9,6	100,6 / 58,6	25,6 / 11,6	326,2 / 23,1	25,1 / 16,1

N = número de espécimes; Km = susceptibilidade magnética média (SI); P = grau de anisotropia dos elipsoides; T = parâmetro de forma dos elipsoides; K1 = tendência e inclinação do eixo magnético máximo (em graus); K2 = tendência e inclinação do eixo magnético intermediário; K3 = tendência e inclinação do eixo magnético mínimo; ϵ_{12} , ϵ_{23} , and ϵ_{31} são os ângulos de confiança (em graus) das elipses da ASM de acordo com a estatística de Jelinek (1978).