

AS ROCHAS INTRUSIVAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL NA PORÇÃO LESTE DA BACIA DO PARANÁ NO ESTADO DE SÃO PAULO: ASPECTOS PETROGRÁFICOS E GEOQUÍMICOS – RESULTADOS PRELIMINARES

Fábio Braz MACHADO ¹, Antonio José Ranalli NARDY ²,
Rodrigo Prudente de MELO ³, Marcos Aurélio Farias de OLIVEIRA ², Eloiza SQUISATO¹

(1) Pós-Graduandos em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Rua 10, 2527 – Santana. CEP 13500-230. Rio Claro, SP. Endereços eletrônicos: fabiobm@rc.unesp.br; eloizas@rc.unesp.br. (2) Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereços eletrônicos: nardy@rc.unesp.br; maurelio@rc.unesp.br. (3) Graduando em Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Rua 10, 2527 – Santana. CEP 13500-230. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: rmelo@rc.unesp.br.

Introdução
Situação Geológica
Aspectos Petrográficos
Aspectos Geoquímicos
 Geoquímica dos Basaltos da Formação Serra Geral
 Geoquímica dos *Sills* de Diabásio da Área Estudada
 Magmas-tipo da Área de Estudo
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Aqui são apresentados resultados preliminares do estudo petrográfico e geoquímico das rochas intrusivas, na forma de *sills* e diques, associadas ao Vulcanismo Serra Geral, na porção leste da Bacia do Paraná, no Estado de São Paulo. Dados petrográficos mostraram que as rochas estudadas são constituídas essencialmente de plagioclásio (25 a 50%), augita (3 a 39%), minerais opacos (4 a 20%) e pigeonita (0 a 10%), caracterizando diabásios com texturas predominantemente intergranular, subofítica e ofítica. Dados geoquímicos de elementos maiores, menores e traços de 80 amostras indicaram que as rochas estudadas apresentam natureza básica, afinidade toleítica e elevadas concentrações em TiO₂ (acima de 2%), e podem ser classificadas como sendo dos tipos Paranapanema e Pitanga. A distribuição destes magmas pela área estudada não se faz ao acaso: as do tipo Paranapanema ocorrem nos *sills* da região de Campinas, enquanto que as do tipo Pitanga nos corpos intrusivos das regiões de Cajuru, Pirassununga, Leme, Rio Claro, Limeira e Itacemópolis. Além disso, pôde-se observar que os derrames de lavas da região são exclusivamente do tipo Urubici. Levando-se em consideração que a diferenciação magmática se fez através de processos de fusão ou cristalização fracionada para produzir estes magmas-tipos a partir de um mesmo material parental, é necessário o fracionamento extensivo de certas fases minerais, o que implicaria a diferença significativa na mineralogia destas rochas. Entretanto esta diferença não foi observada, o que parece indicar que estas rochas foram geradas através de fontes mantélicas distintas. Com isso, pode-se admitir que as rochas intrusivas desta região não são, como se pensava anteriormente, meros apêndices não extravasados dos derrames de lavas observados em superfície.

Palavras-chave: Diabásio, basalto, Bacia do Paraná, vulcanismo Serra Geral, magmas-tipo.

ABSTRACT – F.B. Machado, A.J.R. Nardy, R.P. de Melo, M.A.F. de Oliveira, E. Squisato – *Intrusive rocks of the Serra Geral Formation in eastern of Paraná Basin in the State of São Paulo: petrographic and geochemistry topics - preliminary analysis.* The purpose of this paper is to present preliminary aspects of the petrography and chemistry of intrusive rocks (*sills* and dykes) from the eastern portion of the Paraná Basin in the State of São Paulo. Data from 80 samples of the region show a subaphyric and subophitic nature and have plagioclase (25-50%), augite (3-39%), pigeonite (0-10%) and magnetite (4-20%) as an essential minerals. Apatite and quartz are present as accessory minerals. The geochemical data of intrusive rocks show a basic to intermediate composition (48% < SiO₂ < 56%) and a high Ti nature (TiO₂ > 2%). Based on the minor and trace composition of the intrusive rocks, two different magma types were recognized, named Paranapanema and Pitanga. The spatial distribution of these magma types is not alleatory in the studied region. The intrusive rocks of Pitanga magma type are displayed in the Campinas-Paulínia region, while the Paranapanema magma type cover a large region above that one, between Rio Claro and Cajuru. Furthermore, the chemical composition of the lava flows of the Serra Geral Formation, sampled in this work, reveals a magma of Urubici type. So, the intrusive rocks of the eastern portion of the of State São Paulo are not the extension of the lava flows, or they aren't a portions which don't reach the surface.

Keywords: Diabase, basalt, Paraná Basin, volcanism Serra Geral, magma-types.

INTRODUÇÃO

As ocorrências de províncias magmáticas em áreas continentais estão frequentemente relacionadas a processos geodinâmicos que envolvem ruptura de placas litosféricas. Essas províncias são em maioria representadas por derrames e intrusões basálticas e têm sido intensamente pesquisadas e debatidas na

literatura internacional. Como resultado dessas investigações foram propostos diferentes modelos para explicar a origem dos derrames e das intrusões associadas.

Segundo Richards et al. (1989), as províncias ígneas seriam o resultado da atuação de plumas mantélicas, de modo que a geração do magma basáltico não estaria diretamente relacionada ao mecanismo de distensão da crosta, como é o caso da Província Magmática do Paraná. Por outro lado, White & McKenzie (1989, 1995) propõem que a atividade ígnea estaria relacionada a processos distensivos, que poderiam evoluir para a abertura de oceanos, sendo que neste caso a distensão da litosfera precederia o magmatismo, ocasionando alívio de pressão em regiões do manto anormalmente quentes.

Ainda, a reconstrução paleogeográfica dos continentes, baseada em dados paleomagnéticos realizada por Ernesto (1996), Raposo et al. (1998) e Ernesto et al. (1999), mostrou que, se a pluma de Tristão da Cunha

já existisse há 133 Ma e se mantivesse desde então como um ponto fixo no manto, sua posição estaria deslocada em cerca de 1.000 km em relação ao sul da Bacia do Paraná. Ernesto et al. (2002) integrando dados paleomagnéticos, geoquímicos e gravimétricos, propuseram uma fonte de calor alternativa localizada na costa oeste da África, sobre a qual uma região da litosfera continental, onde teria se desenvolvido a Província Magmática do Paraná, ficaria estacionada por cerca de 50 Ma, causando aumento da temperatura em cerca de 100 a 150°C, o que seria suficiente para que a temperatura do *solidus* fosse atingida, provocando a fusão parcial do manto litosférico com posterior ruptura do Gondwana.

Neste contexto, o estudo da Província Magmática do Paraná (Figura 1) é de grande importância por ser uma das maiores manifestações de basaltos continentais do mundo, com cerca de 800.000 km³ de lavas que recobriram cerca de 75% de toda superfície da Bacia do Paraná.



FIGURA 1. Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, mostrando a extensa distribuição da Província Magmática do Paraná. 1: Sedimentos pós-vulcânicos. 2 e 3: rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, de natureza básica e ácida respectivamente. Modificado de Nardy et al. (2001).

As intrusões ígneas de composição básica, na forma de *sills* e diques, são fenômenos comuns na região Sudeste do Brasil, onde se observa um grande número desses corpos. Dados geocronológicos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ destas rochas fornecem idades variando entre $129,9 \pm 0,1$ Ma e $131,9 \pm 0,4$ Ma (Ernesto et al., 1999).

Esse período de tempo é praticamente o mesmo obtido para os derrames de lavas da Formação Serra Geral, ou seja 133-132 Ma (Renne et al., 1992; Turner et al., 1994 e Rene et al., 1996), mostrando que estas rochas intrusivas estão relacionadas ao vulcanismo Serra Geral da Bacia do Paraná.

SITUAÇÃO GEOLÓGICA

A bacia intracratônica do Paraná está localizada na porção centro-leste da América do Sul e cobre uma área aproximada de 1.700.000 km². A sedimentação da bacia foi iniciada no Eopaleozóico e resultou no acúmulo de cerca de 4.000 m de sedimentos.

A estratigrafia da bacia pode ser dividida em cinco seqüências principais de sedimentação, que se estendem do Ordoviciano-Siluriano ao Neocretáceo, separadas entre si por três discontinuidades como mostram as

colunas estratigráficas da Figura 2, de Milani et al. (1994) e Zalán et al. (1990). Estas discontinuidades, segundo os mesmos autores, representam a superposição de, no mínimo, três bacias diferentes, cujas geometrias e limites variam de uma para outra em decorrência do movimento das placas, que conduziram a evolução do Gondwana no tempo geológico, podendo ser representadas por três eventos distensivos, datados em 440 Ma, 296 Ma e 132-144 Ma, segundo Quintas et al. (1997).

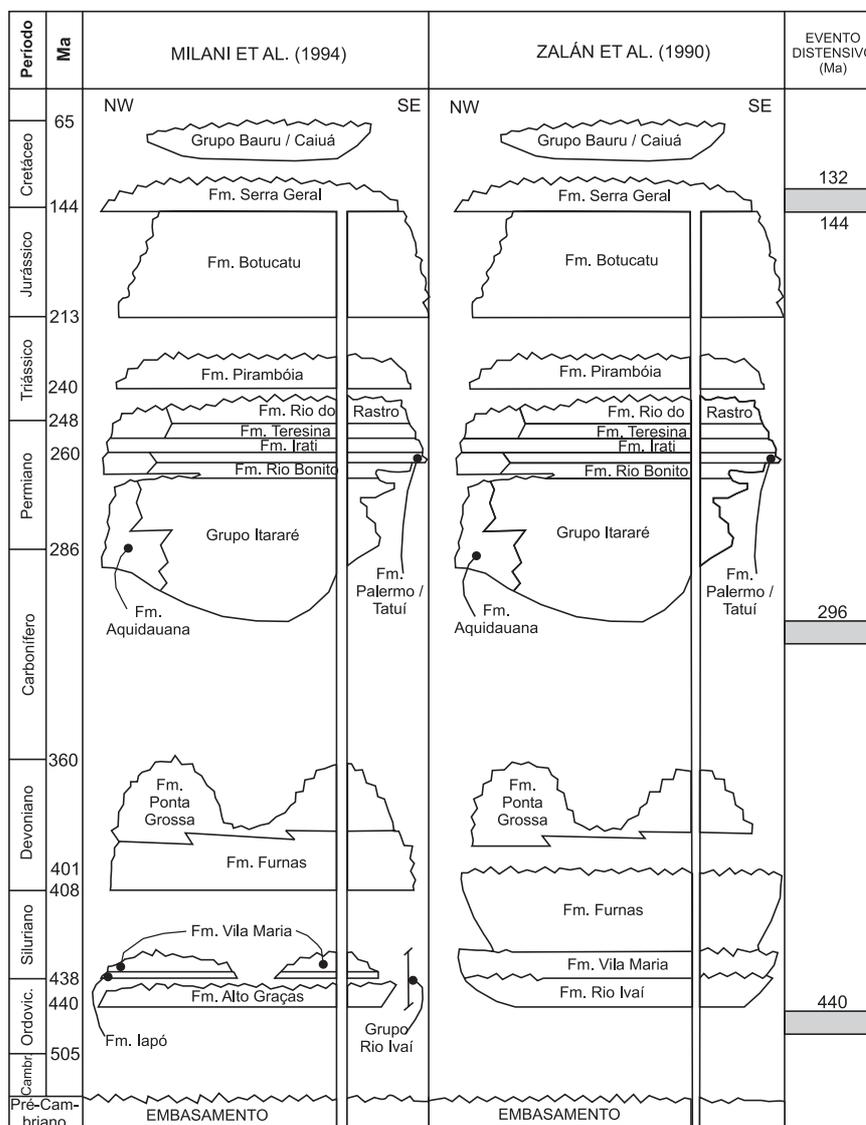


FIGURA 2. Principais colunas estratigráficas da Bacia do Paraná, segundo Milani et al. (1994) e Zalán et al. (1990). A última coluna da direita indica as idades (Ma) dos eventos distensivos (Quintas et al., 1997).

A primeira seqüência se estende do Meso-Ordoviciano até o Neo-Siluriano, a segunda é restrita ao Devoniano, a terceira se inicia no Eocarbonífero até a transição do Grupo Passa Dois, a partir daí se inicia a quarta seqüência, que segue até o início do Jurássico, quando tem início a quinta seqüência.

O evento magmático Serra Geral é parte da quinta seqüência da evolução da Bacia do Paraná, eocretácica, sendo caracterizado por sua natureza básica e caráter toleítico. Termos mais diferenciados, de composição ácida-intermediária também estão presentes, sem, entretanto, atingir 3% do volume total de rochas vulcânicas.

Na estratigrafia da bacia, a Formação Serra Geral sobrepõe-se aos arenitos desérticos da Formação Botucatu e aos arenitos flúvio-lacustres com influência eólica da Formação Pirambóia. No topo é limitada pelas fácies do Grupo Bauru, cuja característica principal é a presença de bancos de arenitos alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos exibindo níveis conglomeráticos e calcários na parte superior.

As rochas intrusivas associadas ao vulcanismo Serra Geral são caracterizadas por diabásios de afinidade toleítica, que afloram preferencialmente na parte norte da Província Magmática do Paraná, especialmente na porção oriental do Estado de São Paulo.

A área aqui estudada corresponde a um polígono em cujos vértices se encontram as cidades de Ribeirão Preto, Cajuru, Aguaí, Campinas, Piracicaba e São Carlos, localizadas entre 21°00' e 23°00' de latitude S e 47°00' e 48°00' de longitude W, como mostra o mapa geológico da Figura 3. Pela distribuição geográfica dos *sills* na região, e com o intuito de facilitar a abordagem petrográfica e geoquímica, estes corpos foram divididos em quatro grupos denominados de Cajuru (GSC), Leme (GSL), Iracemápolis (GSI) e Paulínia (GSP), não significando porém constituírem corpos intrusivos únicos.

Na região estudada, as rochas intrusivas na forma de *sills* e diques estão preferencialmente encaixadas nos arenitos, diamictitos, siltitos e argilitos do Supergrupo Tubarão (Carbonífero-Permiano) na porção mais oriental da bacia. Contudo, também foram observados *sills* e diques encaixados nos folhelhos negros da Formação Irati (Permiano), nos siltitos, argilitos, e folhelhos cinzentos com lentes e bancos de calcários da Formação Corumbataí (Permiano), como mostra a Foto 1, bem como nos arenitos siltico-argilosos da Formação Pirambóia (Triássico). Deve-se ressaltar também que foram observados diques intrudidos em *sills* de diabásio, como mostra a Foto 2.

Quanto às espessuras dos *sills* desta região, obtidos através de dados geofísicos, mostram valores da ordem de 250 m em Cajuru, 100 a 200 m em Cachoeira

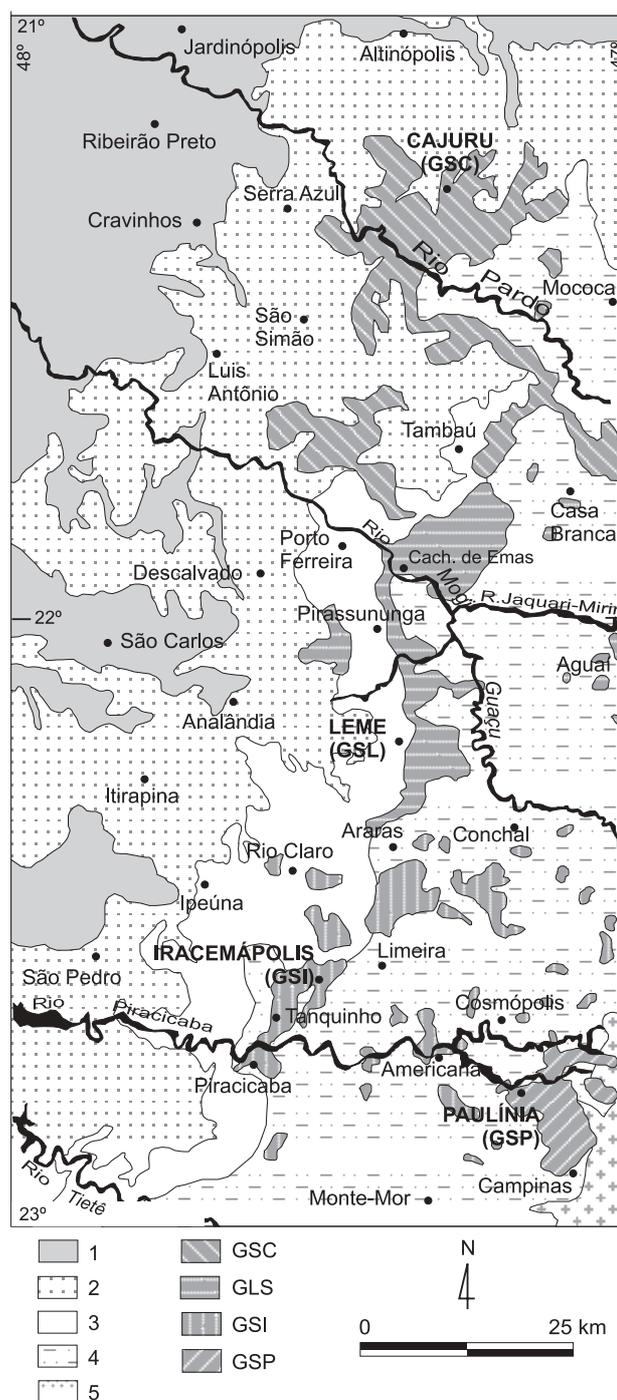


FIGURA 3. Mapa geológico da área de estudo, com a localização dos quatro grupos de ocorrências de *sills*, sendo eles: Cajuru (GSC), Leme (GSL), Iracemápolis (GSI) e Paulínia (GSP). Modificado de IPT (1981). 1: Grupo Bauru. 2: derrames da Formação Serra Geral. 3: Formações Corumbataí e Irati. 4: Supergrupo Tubarão. 5: embasamento cristalino.

de Emas, 120 m em Pirassununga, cerca de 80 m em Iracemápolis, 230 m em Cosmópolis e 280 m em Paulínia (Soares, 1985), 300 m em Tambaú (Davino et al., 1982) e 73 m em Tanquinho (Monteiro, 1986).



FOTO 1. *Sill* de diabásio localizado próximo a Ipeúna, na Pedreira Paviobras, encaixado nos siltitos argilosos da Formação Corumbataí.



FOTO 2. Dique de diabásio (rocha mais escura), cortando *sill* (rocha mais clara), localizado próximo a Ipeúna, na Pedreira Paviobras.

ASPECTOS PETROGRÁFICOS

Os diabásios estudados possuem coloração variando de cinza até negra, com tons mais ou menos esverdeados, predominantemente mesocráticos, embora também ocorram termos mais leucocráticos, como é o caso do diabásio encontrado nas pedreiras Cavinato e Basalto 4, em Limeira.

A granulação destas rochas varia de fina a grossa. A textura predominante é intergranular (Foto 3), não sendo raras a ofítica (Foto 4), subofítica (Foto 5), granofítica (Foto 6) e intersertal (Foto 7). Menos comuns são as texturas pilotaxítica, hialofítica e poiquilítica.

A composição mineralógica dos corpos intrusivos estudados envolve essencialmente plagioclásio, piro-

xênios (augita e pigeonita), minerais opacos (magnetita, ilmenita e sulfetos) e olivina. A mesóstase está sempre presente, podendo ser microgranular, micrográfica ou vítrea. Os cristais de plagioclásio possuem formas variadas, como prismáticas, ripiformes, aciculares, e mesmo de microcristais presentes na mesóstase. Mostram-se como cristais bem zonados, com núcleos chegando a labradorita nos litotipos mais básicos, e naqueles mais ácidos as bordas chegam a oligoclásio. Constituem de 25% até 50% do volume das rochas nos corpos amostrados. São comuns as geminações do tipo albita, ocorrendo também as do tipo Carlsbad e do periclínio.

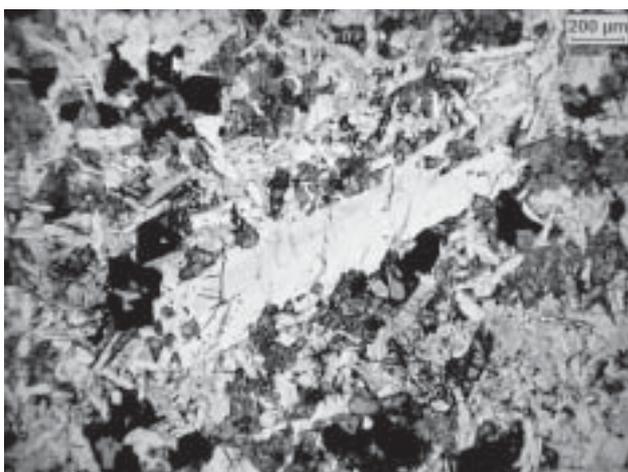


FOTO 3. Fotomicrografia de diabásio com textura intergranular e microporfírica em amostra coletada em *sill* próximo a Ipeúna, onde os cristais ripiformes de plagioclásio (cor branca) contêm grãos intersticiais de piroxênio (cor cinza) e minerais opacos (cor preta). Nicóis paralelos.

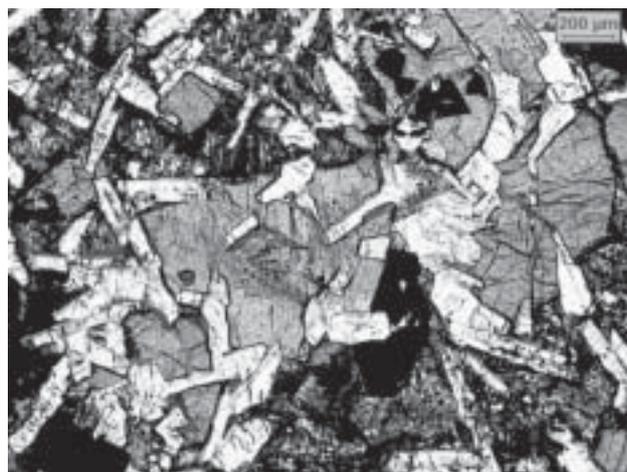


FOTO 4. Fotomicrografia de diabásio com textura ofítica em amostra coletada em *sill* próximo a Limeira, onde cristais de plagioclásio ripiformes (cor branca) se encontram engolfados por cristal de piroxênio (cor cinza). Os cristais de coloração preta são minerais opacos. Nicóis paralelos.

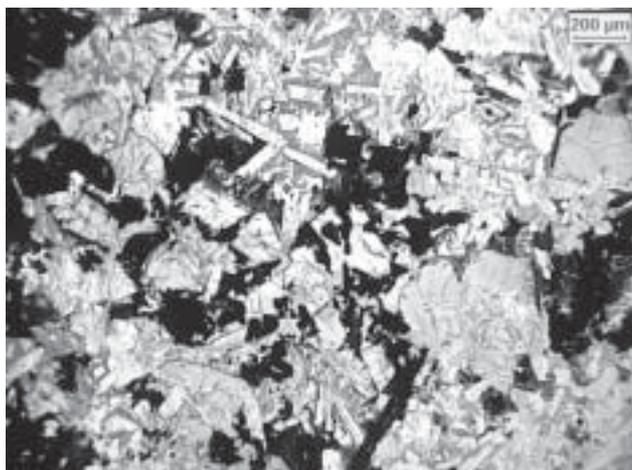


FOTO 5. Fotomicrografia de diabásio coletado em *sill* próximo a Rio Claro, exibindo localmente a textura subofítica. Os cristais de piroxênio (cor cinza) englobam parcialmente cristais ripiformes de plagioclásio (cor branca) e minerais opacos (cor preta). Nicóis paralelos.



FOTO 6. Fotomicrografia de diabásio coletado em dique próximo a Rio Claro, exibindo textura micrográfica, com material de composição quartzo-feldspática no centro da foto (cor branca). Ocorrem também minerais opacos (cor preta), mesóstase microgranular (cor cinza) e cristais prismáticos de plagioclásio (cor branca). Nicóis cruzados.

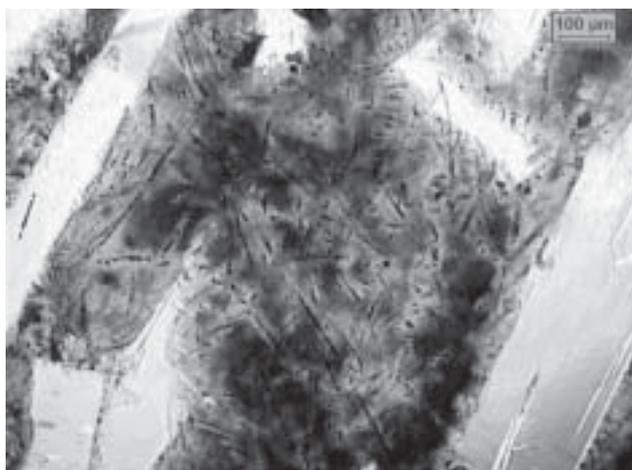


FOTO 7. Fotomicrografia mostrando textura intersertal em amostra coletada próximo a Iracemápolis. O material vítreo, rico em cristalitos, ocupa os interstícios dos cristais de plagioclásio (cor branca). Nicóis paralelos.

Já os piroxênios são representados principalmente por augita, com concentração variando de 3 a 39% do volume da rocha, com formas prismáticas a granulares. O tamanho dos cristais varia de micrométricos até próximos a 2 mm nas rochas de granulação grossa. Nos *sills* do GSC e GSP são bastante comuns os cristais de augita englobarem parcialmente pseudomorfos de olivina. Já no GSI, é mais freqüente a substituição da pigeonita pela augita.

A pigeonita é outro piroxênio presente nestas rochas. Ocorre sempre em menor volume que a augita, com porcentagem variando de 0 a 10%. O hábito é granular, amebóide e até prismático. Próximo à Limeira

(GSI), as concentrações deste mineral em um *sill* chegam até 10%, talvez relacionado a um processo de diferenciação magmática localizado.

Os minerais opacos representam de 4 a 20% do volume das rochas estudadas, com hábito variando de cúbico, octaédrico, prismático, retangular, tabular, acicular, amebóide e esqueletiforme (Foto 8), sendo representados por magnetita, ilmenita e sulfetos. Foi possível verificar que os minerais opacos com forma acicular são predominantes em rochas com características de resfriamento rápido, com a presença de mesóstase vítrea e cristais de plagioclásio mal formados.

A olivina é mais comum na forma de pseudomorfos de filossilicatos de coloração esverdeada. Constituem cristais subedrais a anedrais, e representam de 0 até 5% do volume da rocha, com dimensões submilimétricas. Frequentemente estão inclusas na augita, aparentando ser substituída por esta.

A mesóstase ocorre na forma microgranular e vítrea. No primeiro caso, é constituída de maneira geral por cristalitos e microcristais de clinopiroxênios, apatita e plagioclásio, chegando a representar de 0 a 40% do volume das rochas estudadas.

A mesóstase vítrea é comum nos diques e *sills* poucos espessos, encontrados principalmente no GSI, tendo em vista o rápido resfriamento da rocha em contato com o litotipo encaixante. De maneira geral, podem chegar até 60% do volume da rocha e apresentam coloração amarronzada a negra; quando alteradas, adquirem tons mais esverdeados.

Quando observada, a textura micrográfica é



FOTO 8. Fotomicrografia de amostra de diabásio de um dique próximo a Ipeúna, com textura intergranular (plagioclásio de cor branca e piroxênio acinzentado), e cristais de minerais opacos (cor preta), retangulares e com aspecto esquelético (centro da foto). Nicóis paralelos.

comum e formada principalmente por microcristais de quartzo anedrais e feldspato alcalino, dispostos entre plagioclásios e piroxênios. Nos corpos intrusivos mais diferenciados chega a atingir 10% do volume da rocha, como é o caso de alguns afloramentos do GSI. Contudo, a textura micrográfica não é tão comum como a intergranular, que ocorre praticamente em todas as intrusivas estudadas.

A apatita ocorre como prismas eudrais ou subedrais e até mesmo aciculares, presentes principalmente na mesóstase microgranular. Em volume podem chegar até 3% da rocha. As vesículas são normalmente preenchidas por quartzo, calcita, zeólitas

ou argilomineral esverdeado. Ocorrem nos limites dos *sills* (mais frequente no topo) e nos diques poucos espessos, como é o caso de um dique próximo a Ipeúna (GSI), onde estão preenchidas por material vítreo e os seus limites bordejados tangencialmente por microcristais de plagioclásios (Foto 9), indicando que, no momento da formação das vesículas, o processo de cristalização dos minerais e a consolidação do material vítreo ainda estava em marcha.

Como minerais acessórios ocorrem apatita, quartzo, carbonato, clorita, titanita e epidoto e, como minerais de alteração, biotita, hornblenda, além de um argilomineral de coloração esverdeada, provavelmente celadonita.

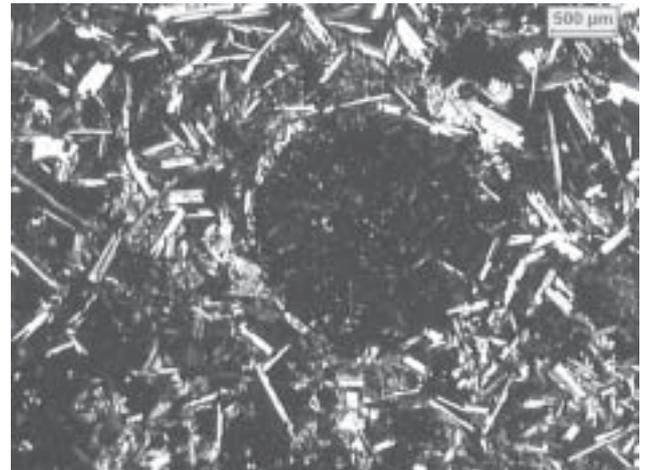


FOTO 9. Fotomicrografia de diabásio coletado em dique próximo a Ipeúna, com vesícula (centro da foto) preenchida pelo próprio material vítreo (massa de cor preta) e seus limites bordejados tangencialmente por microcristais de plagioclásio aciculados (cor branca). Nicóis cruzados.

ASPECTOS GEOQUÍMICOS

GEOQUÍMICA DOS BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

As rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral podem ser distribuídas em dois grandes grupos denominados alto titânio (ATi, $\text{TiO}_2 \geq 2\%$) e baixo titânio (BTi, $\text{TiO}_2 < 2\%$). As rochas do primeiro grupo em relação às do segundo (ATi / BTi) mostram-se enriquecidas em Ba (1,88), K_2O (1,38), U (1,20), Sr (2,41) La (2,05), Ce (1,92), Ta (2,43), P_2O_5 (2,54), Hf (1,70), Zr (2,25), TiO_2 (2,46) e empobrecidas em Cs (0,65) e Rb (0,8). Figura 4.

Estudos geoquímicos mais detalhados destas rochas mostraram a possibilidade de subdividir estes dois grupos de rochas em seis unidades geoquímicas distintas denominadas de magmas-tipo Urubici ($\text{TiO}_2 > 3,3\%$, Sr > 550 ppm, Ti/Y > 500, Zr/Y > 6,5), Pitanga

($\text{TiO}_2 > 2,9\%$, Sr > 350, Ti/Y > 500, Zr/Y > 5,5) e Paranapanema ($1,7\% < \text{TiO}_2 < 3,2\%$, 200 ppm < Sr < 450 ppm, Ti/Y > 330, $4 < \text{Zr/Y} < 7$), Gramado ($0,75\% < \text{TiO}_2 < 1,9\%$, 140 ppm < Sr < 400 ppm, Ti/Y < 300, $3,5 < \text{Zr/Y} < 6,5$), Esmeralda ($1,1\% < \text{TiO}_2 < 2,3\%$, 120 ppm < Sr < 250 ppm, Ti/Y < 330, $2 < \text{Zr/Y} < 5$) e Ribeira ($1,5\% < \text{TiO}_2 < 2,3\%$, 200 ppm < Sr < 375 ppm, Ti/Y > 300, $3,5 < \text{Zr/Y} < 7$) (Bellieni et al., 1984; Hawkesworth et al., 1992; Peate, 1997).

Além disso, a distribuição destes grupos de rochas não se faz de forma aleatória pela Província Magmática do Paraná, mas sim compartimentada conforme mostra o mapa da Figura 5. De maneira geral, o grupo alto titânio (ATi), representado pelos magmas-tipo Urubici, Pitanga e Paranapanema, ocorrem predominantemente

na porção setentrional da província, enquanto aquele baixo em titânio (BTi), representado pelos magmas-

tipo Esmeralda, Ribeira e Gramado, na sua porção centro-meridional.

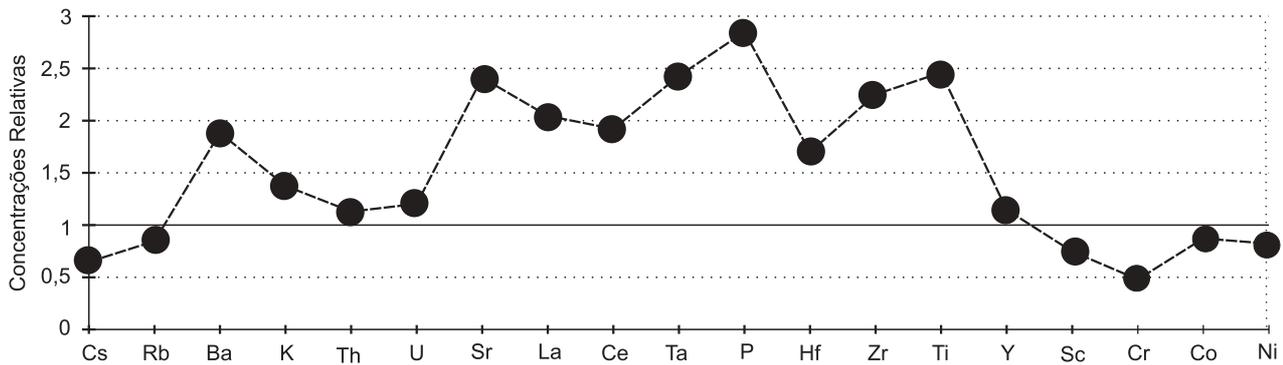


FIGURA 4. Concentrações relativas médias de elementos menores e traços das rochas básicas ATi e BTi, na região central da Bacia do Paraná (Nardy, 1995).

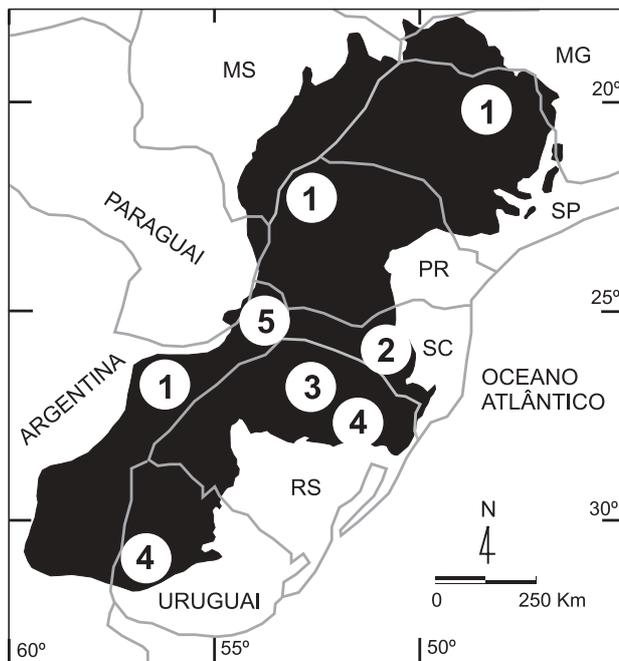


FIGURA 5. Mapa esquemático, mostrando a distribuição aproximada dos diferentes magmas-tipo de caráter básico da Formação Serra Geral. 1: Pitanga e Paranapanema. 2: Urubici. 3: Esmeralda. 4: Gramado. 5: Ribeira. Segundo Peate (1997).

GEOQUÍMICA DOS SILLS DE DIABÁSIO DA ÁREA ESTUDADA

Os trabalhos de campo realizados na região permitiram a coleta de 80 amostras, que foram prepa-

radas para análises químicas de elementos maiores, menores e traços através de espectrometria de fluorescência de raios X. A metodologia empregada nas análises de elementos maiores e menores foi a de analitos fundidos em meio borato, conforme descrito em Nardy et al. (1997). Os elementos traços foram analisados através de amostras prensadas a 30 t/cm², resultando pastilhas de 5 mm de espessura. Em média, os erros relativos na determinação de elementos maiores e menores são inferiores a 5% e para os traços, melhores que 10%.

Os resultados obtidos, lançados em um diagrama álcalis (Na₂O+K₂O) versus sílica (SiO₂) mostram que a maioria das amostras localiza-se no campo dos basaltos toleíticos, com concentrações de sílica variando de 47,77 a 51,99% e álcalis entre 3,59 e 5,27%, como mostra a Figura 6. Um outro grupo, com concentrações em sílica um pouco maiores, variando de 53,56 a 55,31% e álcalis, entre 5,31 e 6,44%, localiza-se no campo dos traquiandesito basáltico. As amostras deste grupo são mais diferenciadas que as demais e foram coletadas na Pedreira Cavianato localizada no município de Limeira, pertencente ao grupo de *sills* de Iracemápolis (GSI).

De qualquer forma, a natureza subalcalina e toleítica destas amostras é bem caracterizada através do diagrama A (Na₂O+K₂O)-F (Fe₂O₃t)-M (MgO), onde todas elas estão localizadas no campo toleítico, acima da linha de Irvine & Baragar (1971) (Figura 7). Tal tendência também é confirmada pela composição mineralógica modal, através da presença de dois piroxênios (augita e pigeonita) e pela presença de quartzo normativo (Tabela 1). Observa-se também

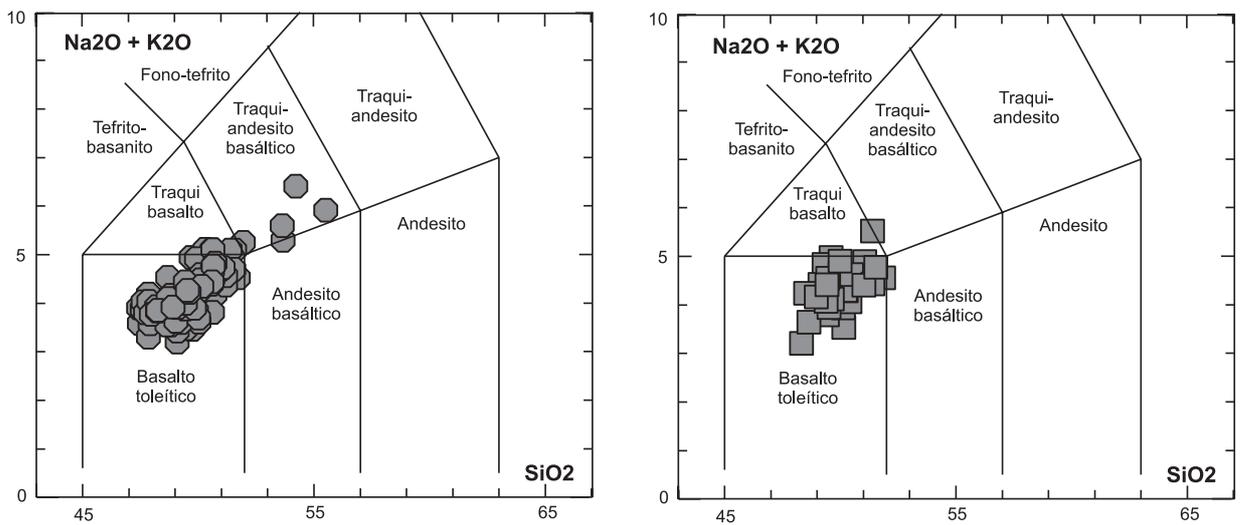


FIGURA 6. Diagrama de nomenclatura dos corpos básicos estudados segundo o esquema TAS. Quadrados: derrames. Círculos: *sills* e diques. Le Bas et al. (1986) e Zanettin (1984).

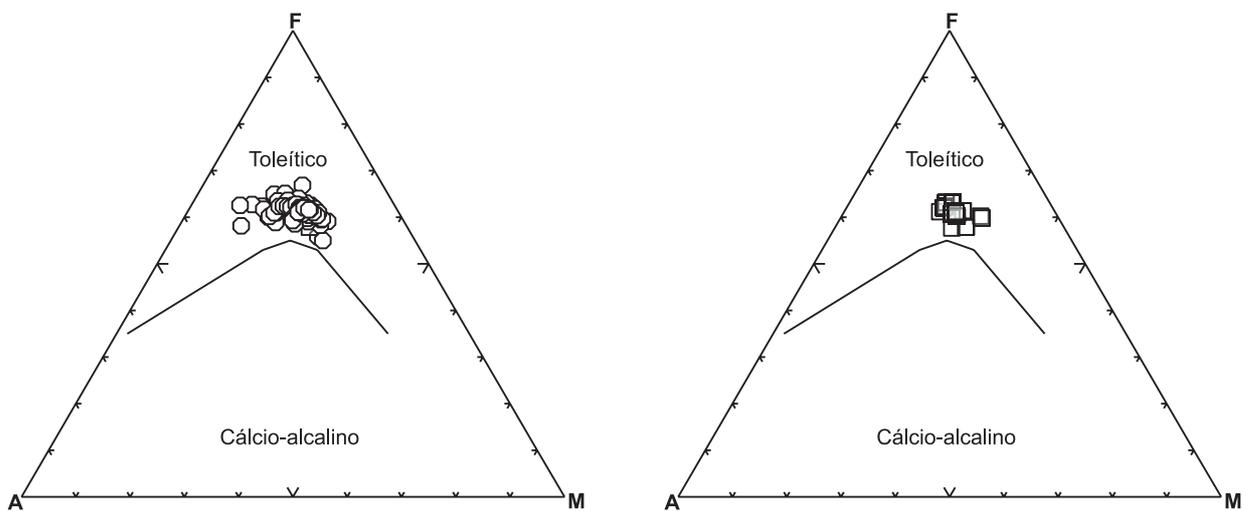


FIGURA 7. Diagrama do tipo A ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)-F ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$)-M (MgO) dos corpos básicos estudados, com linha divisória entre os campos segundo Irvine & Baragar (1971). Quadrados: derrames. Círculos: *sills* e diques.

nesta última figura, que as amostras mais diferenciadas da Pedreira Cavinato estão levemente deslocadas em direção ao vértice dos álcalis.

Os dados obtidos e lançados em um diagrama do tipo $R1 \times R2$ ($R1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})$; $R2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$) segundo De La Roche et al. (1980) mostram que as amostras estudadas distribuem-se pelos campos dos andesibasaltos toleíticos e dos latíandesitos (Figura 8). Além disso, o diagrama revela também, a existência de três agrupamentos distintos. O primeiro deles, com valores de $R1$ entre 1675,86 até 1816,95, destaca-se em relação aos demais pelos maiores

valores de $R2$ (1.543,44 a 1.712,75), estando localizado no campo dos andesibasaltos toleíticos, correspondendo às amostras dos *sills* da região de Campinas-Paulínia (GSP). Ainda no campo dos andesibasaltos toleíticos, observa-se a presença de um segundo grupo, bem mais numeroso, com valores de $R1$ variando entre 1.304,74 e 1.653,06 e $R2$ variando de 1.173,85 a 1.523,09. Por fim, o terceiro grupo, com menores valores de $R1$ (de 1234,49 e 1454,71) e $R2$, (de 1095,41 e 917,48), acha-se disposto no campo dos latíandesitos, correspondendo a amostras mais diferenciadas da Pedreira Cavinato pertencentes ao grupo de *sills* de Iracemápolis (GSI).

TABELA 1. Resultados geoquímicos e mineralogia CIPW, de amostras representativas da área de estudo, para elementos maiores e menores (% em peso) e traços (ppm), analisadas por fluorescência de raios X.

Magma-tipo	URUBICI		PITANGA			PARANAPANEMA	
	Amostra						
	KS 598	KS 602	KS 563	KS 550	KS 534 *	KS 548	KS 547
SiO ₂	50,75	49,61	48,29	50,75	55,31	50,18	49,33
TiO ₂	3,37	3,68	3,45	3,34	2,11	3,73	2,44
Al ₂ O ₃	13,35	12,93	12,96	13,38	12,90	12,92	14,29
Fe ₂ O ₃	14,44	14,97	16,53	15,20	14,49	16,04	14,95
MnO	0,17	0,13	0,16	0,13	0,13	0,12	0,14
MgO	4,95	4,57	4,95	3,58	1,87	4,77	6,11
CaO	9,15	8,42	8,99	7,71	5,34	8,06	10,56
Na ₂ O	2,43	2,40	2,46	2,95	3,50	2,74	2,35
K ₂ O	1,39	1,67	1,31	1,74	2,43	1,51	0,85
P ₂ O ₅	0,43	0,52	0,42	0,64	0,88	0,54	0,26
LOI	0,19	1,11	0,49	0,58	1,04	0,09	0,03
Soma	100,63	100,01	100,00	100,01	100,00	100,69	101,30
Mineralogia CIPW							
Qz	0,00	2,26	2,04	3,06	7,86	3,11	5,64
Or	6,57	10,12	8,96	10,30	14,41	9,89	10,59
Ab	21,03	24,42	23,15	24,95	29,62	20,28	22,38
An	22,56	17,16	18,53	18,17	12,32	19,60	18,78
Di	20,02	15,97	15,85	14,42	8,61	16,54	14,11
Hy	19,28	17,63	19,80	17,01	16,67	17,63	16,10
Oi	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mt	2,63	2,73	2,77	2,62	2,50	2,58	2,45
Il	4,84	7,50	7,08	6,35	4,01	6,99	6,45
Ap	0,81	1,62	1,27	1,51	2,10	1,23	1,41
Elementos Traços (ppm)							
Cr	420	488	441	589	87	482	312
Ni	71	77	79	92	6	79	47
Cu	163	84	128	66	18	82	190
Ba	156	56	176	112	863	97	160
Rb	39	53	62	61	58	61	29
Sr	20	22	21	26	448	20	12
La	58	27	45	13	107	25	71
Ce	30	30	26	36	136	35	21
Zr	619	627	424	443	432	463	385
Y	35	39	35	42	58	41	28
Nb	263	286	220	283	33	248	133

* Amostra da Pedreira Cavinato

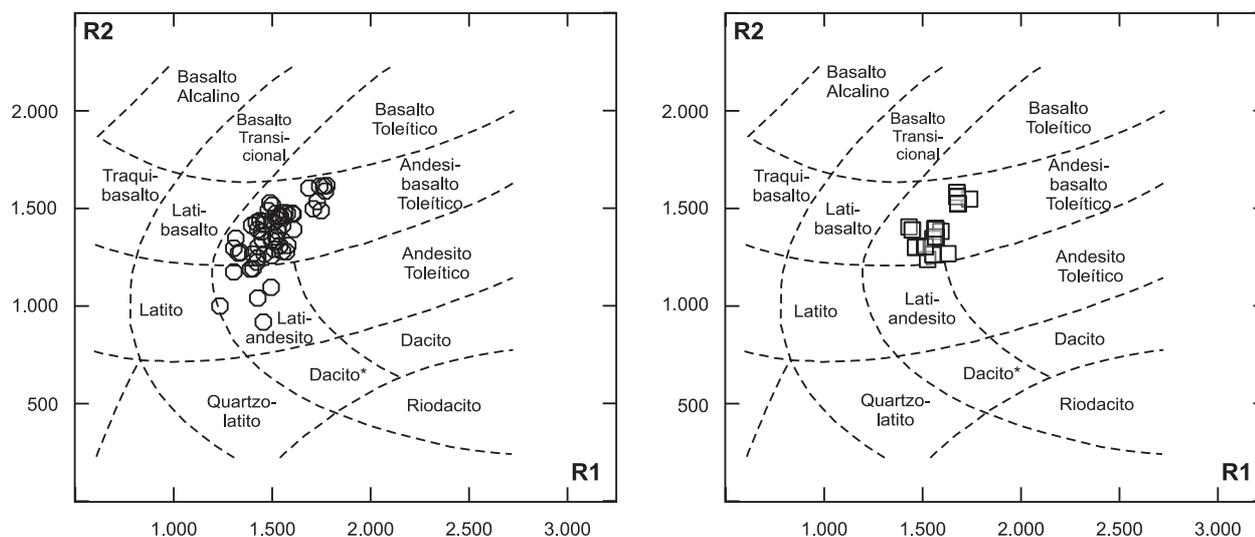


FIGURA 8. Diagrama de classificação e nomenclatura dos corpos básicos estudados segundo De La Roche et al. (1980), modificado para o campo dos basaltos por Bellieni et al. (1981). Quadrados: derrames. Círculos: sills e diques.

Magmas-tipo da Área de Estudo

Com a finalidade de classificar os magmas-tipo dos diabásios da região estudada, segundo os critérios sugeridos por Peate (1997), descritos anteriormente, foram construídos uma série de diagramas de variação, alguns deles apresentados na Figura 9. Além disso, para fins de comparação, também foram acrescentadas às amostras de diabásio coletadas, aquelas dos derrames de lavas dos basaltos associados à Formação Serra Geral presentes na região.

Nestes diagramas pode-se observar que todas as amostras analisadas possuem concentrações em TiO_2 variando entre 2,11 e 4,73% e, portanto, pertencentes ao grupo alto titânio (ATi). Ainda, as amostras se distribuem nos três campos distintos denominados de Paranapanema, Pitanga e Urubici, cujos limites foram apresentados anteriormente. De maneira geral, pode-

se destacar através destes diagramas, que as amostras dos derrames de lavas se encontram dispostas preferencialmente no campo do magma-tipo Urubici, enquanto o das rochas intrusivas, nos campos dos magmas-tipo Pitanga e Paranapanema. Além disso, as amostras pertencentes ao magma-tipo Paranapanema, correspondem àquelas provenientes do grupo de *sills* de Paulínia (GSP), destacadas no diagrama da Figura 9 por apresentarem maiores valores de R2 em relação às demais. As amostras localizadas no campo do magma-tipo Pitanga congregam os grupos de *sills* de Leme (GSL), Iracemápolis (GSI) e Cajuru (GSC), inclusive aquelas mais diferenciadas da Pedreira Cavinato (concentrações de sílica chegando até 55,31%), conforme mostram os diagramas da Figura 9. Na Tabela 1, estão reportadas amostras representativas destes grupos de *sills* e respectivos magmas-tipo.

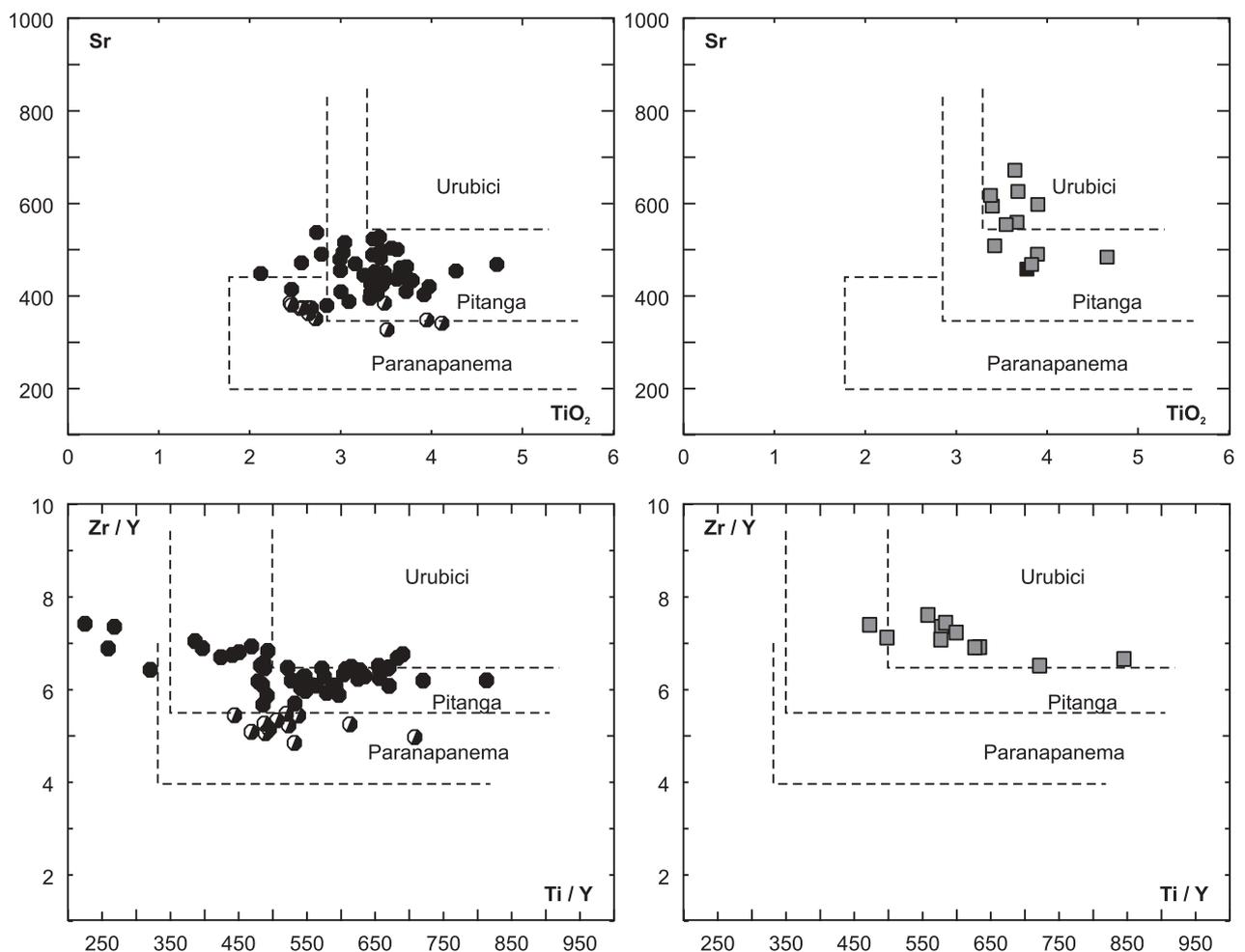


FIGURA 9. Comportamento dos corpos estudados nos diagramas discriminatórios para os tipos de magmas da Província Magmática do Paraná, segundo modelo Peate (1997) e Peate et al. (1999). Quadrados cheios: derrames. Círculos cheios: rochas intrusivas do GSC, GSL e GSI. Círculos semi-cheios: rochas intrusivas do GSP.

CONCLUSÕES

Embora os estudos acerca das rochas intrusivas na região estejam apenas se iniciando, algumas informações importantes acerca da evolução do vulcanismo Serra Geral podem ser delineadas. De maneira geral, todas as rochas coletadas dos corpos intrusivos e dos derrames de lavas apresentam forte afinidade subalcalina e toleítica, caracterizadas pela baixa relação entre álcalis e sílica, pela presença de dois piroxênios modais (augita e pigeonita) e presença de quartzo (ou olivina) e hiperstênio normativos.

Baseado na distribuição geográfica dos *sills*, foram definidos quatro grupos distintos denominados de Cajuru (GSC), Leme (GSL), Iracemápolis (GSI) e Paulínia (GSP). Os dados geoquímicos dos diabásios destes *sills* revelaram tratar-se de rochas com altas concentrações em titânio (ATi, $TiO_2 \geq 2\%$), que corresponderiam aos magmas-tipos Pitanga e Paranapanema, sendo este último exclusivo dos diabásios do grupo de *sills* de Paulínia (GSP). A composição mineralógica destes dois magmas-tipos é praticamente a mesma, constituída essencialmente, em média, por 40% de plagioclásio, 23% de augita, 4% de pigeonita, 7% de opacos e 0,5% de olivina, além de 25,5% de mesostase. De maneira geral, observou-se que as rochas do tipo Paranapanema são levemente mais enriquecidas em olivina (5%) do que as demais. As rochas com assinatura geoquímica

do magma-tipo Pitanga distribuem-se pelas regiões de Cajuru (GSC), Leme (GSL) e Iracemápolis (GSI), podendo indicar a existência de um só corpo ígneo com a extensão de algumas centenas de quilômetros. Este grande corpo, parece ter passado por processos de diferenciação magmática, como é evidenciado na Pedreira Cavinato, onde a concentração de sílica atinge até 55,31%. Estudos anteriores, realizados por Carvalho et al. (1988), mostraram que a diferenciação observada neste corpo parece ter sido a somatória de um processo de cristalização fracionada *in situ* seguida de concentração mecânica de cristais de plagioclásio, possivelmente devido ao processo de movimentação do magma durante a intrusão.

Além disso, os dados químicos referentes aos derrames de lavas que ocorrem na região em estudo, revelam que estes pertencem ao magma-tipo Urubici, onde as razões entre elementos incompatíveis, tendo como denominador um mesmo elemento, mostram que estes grupos definem *trends* caracterizados por linhas horizontais paralelas entre si, indicando que estas rochas não são cogenéticas. Pode-se considerar, desta forma, que os corpos intrusivos observados na região não representam meros apêndices dos derrames de lavas que constituem a Formação Serra Geral, mas parecem ter sido gerados em períodos e processos distintos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro através do projeto 03/10979-2, e à Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP), através do projeto 00112/2003-DFP. R.P. Melo agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – PIBIC) pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; PICCIRILO, E.M.; NARDY, A.J.R.; ROISENBERG, A. High- and low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen**, v. 150, p. 272-306, 1984.
2. BELLIENI, G.; PICCIRILO, E.M.; ZANNETIN, B. **Classification and nomenclature of basalts**. USGS, Commission on the Systematics Igneous Rocks, Circ. 34, p. 1-17, 1981.
3. CARVALHO, S.G.; NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. de; SOARES, P.C.; ZANARDO, A.; ANTONIO, M.C. Geologia e litoquímica dos diabásios dos *sills* Borda da Mata e Limeira-Cosmópolis (SP): resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1988, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, p. 1281-1292.
4. DAVINO, A.; SINELLI, O.; SOUZA, A.; CORREIA, C.T. Diabásio na região nordeste da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982, p. 293-304.
5. DE LA ROCHE, H.; LETERRIER, P.; GRANDCLAUDE, P.; MARCHAL, M. A classification of volcanic and plutonic using R1-R2 diagram and major element analysis. Its relationships with current nomenclature. **Chemical Geology**, v. 29, p. 183-210, 1980.
6. ERNESTO, M. **Determinação da curva de deriva polar aparente para o Mesozóico da América do Sul**. São Paulo, 1996. 56 p. Tese (Livre Docência em Geociências) – Instituto de Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo.
7. ERNESTO, M.; MARQUES, L.S.; PICCIRILLO, E.M.; MOLINA, E.C.; USSAMI, N.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; BELLIENI, G. Paraná Magmatic Province-Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenic considerations and alternative heat sources. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 118, p. 15-36, 2002.
8. ERNESTO, M.; RAPOSO, M.I.B.; MARQUES, L.S.; RENNE, P.R.; DIOGO, L.A.; DE MIN, A. Paleomagnetism,

- geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the North-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications. **Journal of Geodynamics**, v. 28, p. 321-340, 1999.
9. HAWKESWORTH, C.J.; GALLAGER, K.; KELLEY, S.; MANTOVANI, M.S.M.; PEATE, D.; REGELOUS, M.; ROGERS, N. Paraná magmatism and the opening of the South Atlantic. In: STOREY, B.; ALABASTER, A.; PANKHURST, R. (Editors), **Magmatism and the causes of continental break-up**. Geological Society Special Publication, 1992, v. 68, p. 221-240.
 10. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. São Paulo. **Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1: 500.000**. São Paulo: IPT, 1981, 126 p.
 11. IRVINE, T.N. & BARAGAR, W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 8, p. 523-548, 1971.
 12. LE BAS, M.J.; LE MAITRE, R.W.; STRECKEISEN, A.; ZANNETIN, B. A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagram. **Journal of Petrology**, v. 27, p. 745-750, 1986.
 13. MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.J. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 69-82, 1994.
 14. MONTEIRO, R.L. **Aspectos geológico, mineralógicos, petrológicos e geoquímicos de um corpo basáltico localizado no município de Tanquinho (SP)**. São Paulo, 1986. 158 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
 15. NARDY, A.J.R. **Geologia e petrologia do vulcanismo mesozóico da região central da Bacia do Paraná**. Rio Claro, 1995. 316 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
 16. NARDY, A.J.R.; ENZWEILER, J.; BAHIA FILHO, O.; OLIVEIRA, M.A.F. de; PENEIRO, M.A.V. Determinação de elementos maiores e menores em rochas silicáticas por espectrometria de fluorescência de raios X: resultados preliminares. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1997, Salvador (BA). **Resumos Expandidos...** Salvador, 1997, p. 346-348.
 17. NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. de; BETANCOURT, R.H.S.; VERDUGO, D.R.H.; MACHADO, F.B. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. **Geociências**, v. 21, n. 2, p. 15-32, 2001.
 18. PEATE, D. The Paraná-Étendeka Province. In: MAHONEY, J.J. & COFFIN (Editors), **Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism**. Geophysical Monograph Series, 1997, v. 100, p. 217-245.
 19. PEATE, D.W.; HAWKESWORTH, C.J.; MANTOVANI, M.S.M.; ROGERS, N.W.; TURNER, A.P. Petrogenesis and stratigraphy of the high Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood basalt Province and implications for the nature of “Dupal”-type mantle in the South Atlantic region. **Journal of Petrology**, v. 40, n. 3, p. 451-473, 1999.
 20. QUINTAS, M.C.L.; MANTOVANI, M.S.M.; ZALÁN, P.V. Contribuição ao estudo da evolução mecânica da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 2, p. 217-226, 1997.
 21. RAPOSO, M.I.B.; ERNESTO, M.; RENNE, P.R. Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Early Cretaceous Florianópolis dike swarm (Santa Catarina Island), Southern Brazil. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, n. 108, p. 257-290, 1998.
 22. RENNE, P.R.; DECKART, K.; ERNESTO, M.; FÉRAUD, G.; PICCIRILLO, E.M. Age of the Ponta Grossa Dike Swarm (Brazil), and implications to the Paraná Flood Volcanism. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 144, p. 199-211, 1996.
 23. RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; GLEN, J.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. The Age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. **Science**, v. 253, p. 975-979, 1992.
 24. RICHARDS, M.A.; DUNCAN, R.A.; COURTILLOT, V.E. Flood basalts and hot spot tracks: plume heads and tails. **Science**, n. 246, p. 103-107, 1989.
 25. SOARES, P.C. **Informações sobre sills de diabásio da Bacia do Paraná**. Curitiba: DOCEGEO, 1985, 20 p. (Relatório).
 26. TURNER, S.P.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M.S.M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, p. 333-348, 1994.
 27. WHITE, R. & MCKENZIE, D.J. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. B6, p. 7685-7729, 1989.
 28. WHITE, R. & MCKENZIE, D.J. Mantle plumes and flood basalts. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 17543-17585, 1995.
 29. ZALÁN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. Bacia do Paraná. In: RAJA-GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. (Coordenadores), **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro, 1990, 415 p.
 30. ZANETTIN, B. Proposed new chemical classification of volcanic rocks. **Episodes**, v. 7, p. 19-20, 1984.

