Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Estratigrafia dos derrames da Província Vulcânica Paraná na região oeste do Rio Grande do Sul, Brasil, com base em sondagem, perfilagem gamaespectrométrica e geologia de campo

Laura Costa Martins, Wilson Wildner, Léo Afraneo Hartimann

Pesquisas em Geociências, 38 (1): 15-27, jan./abr., 2011.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/23833>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - jan./abr., 2011.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Estratigrafia dos derrames da Província Vulcânica Paraná na região oeste do Rio Grande do Sul, Brasil, com base em sondagem, perfilagem gama-espectrométrica e geologia de campo

Laura Costa MARTINS¹, Wilson WILDNER² & Léo Afraneo HARTMANN¹

1. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: laura.martins@brturbo.com.br; leo.hartmann@ufrgs.br.

2. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Rua Banco da Província 105, CEP: 90840-030, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: wwildner@pa.cprm.gov.br.

Recebido em 03/2010. Aceito para publicação em 02/2011.

Versão online publicada em 17/10/2011 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - A Formação Serra Geral ocupa uma área de cerca de 200 x 200 km na região oeste do Rio Grande do Sul e consiste de seis derrames de lavas toleíticas, que constituem a fácies Alegrete. Esse número de derrames foi constatado em mapeamento geológico, integrado com a descrição geológica e com a perfilagem cintilométrica de 19 furos de sonda efetuados para água subterrânea pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) nos anos 1983-1986. A espessura média da fácies Alegrete é inferior a 100 m, atingindo até 300 m no furo UR-13. As dunas da Formação Botucatu foram parcialmente soterradas pelo derrame Mata Olho (basalto), seguido pelos derrames Catalán (andesito), Cordillera, Muralha, UR-13 e Coxilha (andesitos basálticos). As medidas cintilométricas são típicas de cada derrame, variando entre 45-120 cps, e servem como guia estratigráfico, especialmente com o uso integrado com as observações de campo e litoquímica. Este estudo apresenta uma forma de abordagem integrada entre diferentes ferramentas geológicas aplicadas à estratigrafia de basaltos, possibilitando o mapeamento geológico sistemático de cada derrame em escala regional, com grande significado para o entendimento da geologia da Formação Serra Geral.

Palavras-chave - Estratigrafia vulcânica, Formação Serra Geral, fácies Alegrete.

Abstract - STRATIGRAPHY OF PARANÁ VOLCANIC PROVINCE FLOWS IN WESTERN RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL, BASED ON BOREHOLES, GAMMA SPECTROMETRIC LOGGING AND FIELD GEOLOGY. The Serra Geral Formation has a wide distribution in the western region of Rio Grande do Sul (200 x 200 km) and consists of six tholeiitic lava flows which constitute the Alegrete facies. This number of lava flows was evidenced through geological mapping integrated with lithological and scintillometric description of 19 boreholes drilled for groundwater by the Geological Survey of Brazil (CPRM) in the years 1983-1986. The general thickness of the Alegrete facies is <100 m, locally reaching 300 m in the borehole UR-13. The Botucatu desert dunes were partially buried by the Mata Olho (basalt) flow, followed by the Catalán (andesite), Cordillera, Muralha, UR-13 and Coxilha (basaltic andesites) flows. The scintillometric measurements are typical for each one of lava flows, varying between 45-120 cps and act as a stratigraphic guide, specially when integrated with field work and lithochemistry. This study enables the systematic geological mapping of each lava flow on a regional scale, with great significance for the comprehension of the geology of the Serra Geral Formation.

Keywords - Volcanic stratigraphy, Serra Geral Formation, Alegrete facies.

1. Introdução

As sondagens realizadas em poços tubulares e os seus perfis cintilométricos (gama-espectrométricos) fornecem dados de grande importância para o estudo de seqüências vulcânicas, como as lavas da Província Vulcânica Paraná (Fig. 1), uma vez que possibilita a identificação do número de derrames, suas relações estratigráficas e a presença de intercalações de sedimentos intertrápicos. As rochas possuem características físicas

peculiares, como por exemplo, a radiação gama natural, que pode ser medida através de sondagem e seus respectivos perfis geofísicos. A utilização desse recurso é de singular interesse, pois minimiza a dificuldade de visualização e identificação de diferentes unidades basálticas em campo, dando suporte ao entendimento estratigráfico de seqüências vulcano-sedimentares espessas. O estabelecimento da estratigrafia dos derrames na Bacia do Paraná é essencial para a compreensão da evolução geológica da Província Vulcânica Paraná.

Figura 1. Mapa geológico da Formação Serra Geral, com a área de estudo indicada (modificado de Gil *et al.*, 2003).

O objetivo do presente trabalho é definir a sucessão vulcânica da fácies Alegrete, pertencente à Formação Serra Geral, aflorante no oeste do estado do Rio Grande do Sul (Fig. 2), baseado em sondagem em poços para captação de água subterrânea

com descrições das litologias associadas, realizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 1983-1986), integrado à perfilagem cintilométrica, com auxílio de análises litoquímicas, mapeamento geológico e imagens de satélite.

Figura 2. Mapa geológico do oeste do Rio Grande do Sul com localização dos furos de sondagem e seção A-B indicada (ver Fig. 6).

2. Geologia

As províncias basálticas continentais são formadas por eventos magmáticos responsáveis por extenso extravasamento de lavas, gerando grande volume de rochas basálticas, em ambiente continental, predominantemente de afinidade toleítica (White, 1908). A Província Vulcânica Paraná-Etendeka destaca-se entre as maiores LIP's (*Large Igneous Provinces*) conhecidas, abrangendo uma extensa área no Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina, e recobre rochas sedimentares da Bacia do Paraná, principalmente de idade mesozóica (Melfi & Piccirillo, 1988). Segundo Milner *et al.* (1995), cerca de 95% da Província Vulcânica Paraná concentra-se no continente americano, enquanto 5%

fazem parte da porção africana (Etendeka). No Brasil, essa província é referida como Formação Serra Geral e é constituída por rochas vulcânicas, predominantemente basálticas e subordinadamente riodacíticas e riolíticas (Nardy *et al.*, 2002).

O magmatismo que deu origem às rochas da Formação Serra Geral é de natureza fissural, intracratônico, e está relacionado à ruptura do supercontinente Gondwana e à abertura do Oceano Atlântico Sul durante o Cretáceo inferior (Zalán *et al.*, 1987). Há diferentes propostas para a origem da atividade ígnea ocorrida na Bacia do Paraná. De acordo com alguns modelos, as cadeias submarinas Rio Grande Rise e Walvis Ridge são evidências de que a pluma mantélica de Tristão da Cunha (O'Connor & Duncan, 1990) teve participação dire-

ta na geração dos basaltos continentais da Bacia do Paraná. Estes autores relacionam as exposições de lavas basálticas da Bacia do Paraná e Etendeka, respectivamente, à atividade magmática atual da pluma encontrada nas ilhas do grupo Tristão da Cunha e Gough (Gibson *et al.*, 1995 e 1999). Já outros autores propõem que o material da pluma foi contaminado pelo manto litosférico, ou ainda, que a pluma contribuiu somente como fonte de calor para o magmatismo através da fusão de manto litosférico subcontinental (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1997; Peate *et al.*, 1999; Hawkesworth *et al.*, 2000).

Diferentes tipos de rochas são atribuídos à Formação Serra Geral, sendo cerca de 97% basaltos e andesitos basálticos toleíticos e 3% riolitos (Bellieni *et al.*, 1986). Os basaltos toleíticos são subdivididos em dois principais grupos (Bellieni *et al.*, 1986; Peate, 1992) com base em seu teor de TiO_2 : respectivamente alto-Ti ($\text{TiO}_2 > 2\%$ em peso) e baixo-Ti ($\text{TiO}_2 < 2\%$ em peso). Os basaltos alto TiO_2 são dos tipos Urubici, Paranapanema, Ribeira e Pitanga, enquanto que os baixo TiO_2 são dos tipos Gramado e Esmeralda (Turner *et al.*, 1999). A Bacia do Paraná apresenta estruturas regionais (arcos, flexuras, lineamentos e áreas de maior subsidência) cuja atuação no decorrer do tempo teve grande influência em seu desenvolvimento tectono-sedimentar e na sua compartimentação da bacia (Almeida, 1981). Segundo Wildner *et al.* (2007), a Bacia do Paraná foi soerguida localmente por amplos arcos, orientados N40-50W e que se estendem por até 800 km; exemplos são o arco de Ponta Grossa (Paraná) e o arco do Rio Grande (na área estudada). Na estratigrafia da bacia, a Formação Serra Geral está sobreposta aos arenitos desérticos da Formação Botucatu (Scherer, 2002) e é superposta pelas rochas sedimentares de ambiente árido do Grupo Bauru. Na região de Quaraí e Santana do Livramento, os derrames são praticamente horizontais, embora no distrito gemológico Los Catalanes (Formação Arapey, Uruguai) os derrames possuam mergulho de aproximadamente 3° para norte.

Os derrames ocorreram inicialmente sobre as dunas que formavam o então ativo deserto Botucatu (Waichel *et al.*, 2008) preenchendo também as interdunas e marcando a paleotopografia na região. O contato da lava sobre a areia do deserto foi observado em alguns locais ao longo da rodovia BR-293.

Os derrames de basalto, andesito basáltico e andesito da região oeste do Rio Grande do Sul foram incluídos na fácies Alegrete por Wildner *et al.* (2003), contendo estruturas de fluxo magmático e autobrechas no topo e na base dos derrames.

3. Materiais e Métodos

Perfis cintilométricos em poços tubulares e a descrição detalhada dos testemunhos de sondagem realizados pela CPRM (1983-1986), como parte do Projeto Poços Tubulares para Água Subterrânea na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, foram a ferramenta essencial para o presente estudo. Esses dados, somados aos perfis gama-espectrométricos gerados em campo, possibilitaram a interpretação de informações geológicas como litologia, espessura de derrames e limite de camadas. Raios gama são emitidos por certos átomos de elementos, que são inerentemente instáveis e decaem espontaneamente com uma meia-vida característica. O registro do perfil de emissão total de raios gama mostra a variação da intensidade da radiação gama natural das diferentes rochas atravessadas pela sondagem e foi efetuado por um cintilômetro portátil (Cintilômetro Exploranium GR 110G/E, da CPRM), instrumento sensível a tal radiação, emitida principalmente pelos elementos naturais radioativos U, Th e K. A radiação é emitida pelos filhos das duas cadeias de decaimento, principalmente pelo ^{238}U e ^{232}Th . O detector interno é de iodeto de sódio. A duração foi de 10 segundos para cada medida. Foram utilizadas sondas Failing (1250 e 1500) e CP-15. Os furos possuem diâmetro mínimo de 12 e máximo de 16", com profundidade variável de 86 a 374 m (poço UR-13), em um total de 19 furos analisados.

Trabalhos de campo foram realizados com ênfase em exposições ao longo da rodovia BR-293 e áreas adjacentes, entre os municípios de Quaraí e Santana do Livramento, quando foram obtidos valores de cintilometria diretamente em rochas, com as descrições de campo, localização dos pontos sobre os perfis e posterior análise litoquímica realizadas pelo laboratório comercial ACME (Canadá). Os dados litoquímicos são utilizados de forma a embasar as considerações estratigráficas do presente trabalho (Tab. 1) e constam integralmente do trabalho de Duarte *et al.* (2009).

Tabela 1. Composição química de amostras dos 6 derrames da fácies Alegrete da Formação Serra Geral (modificado de Hartmann *et al.*, 2011). <LD = abaixo do limite de detecção; (-) = não analisado; Fe₂O₃ = ferro total; PF = perda ao fogo; elementos maiores em peso%, elementos traços em ppm.

Lava	1	2	3	4	5	6
Derrame	Mata Olho	Catalán	Cordillera	Muralha	UR-13	Coxilha
SiO ₂	50,88	57,55	52,97	54,89	52,66	53,66
TiO ₂	0,91	1,81	1,09	1,51	1,32	1,71
Al ₂ O ₃	14,38	12,36	13,77	13,06	13,56	12,97
Fe ₂ O ₃	10,56	13,79	11,37	13,02	12,21	14,31
MgO	6,87	2,02	6,19	3,23	5,20	3,49
CaO	10,92	5,78	9,92	7,19	8,83	7,52
Na ₂ O	2,20	2,82	2,38	2,79	2,52	2,84
K ₂ O	0,67	2,50	1,05	2,22	0,95	1,77
P ₂ O ₅	0,11	0,24	0,13	0,21	0,19	0,29
MnO	0,15	0,18	0,20	0,18	0,22	0,22
Cr ₂ O ₃	0,01	<LD	?	<LD	<LD	<LD
PF	2,1	0,7	1,1	1,4	2,1	1,0
Total	99,75	99,75	100,13	99,73	99,77	99,74
Ni	20		118	19	123	11
Sc	40	32	40	37	36	37
Ba	152	514	197	408	332	392
Co	42	38	41	40	39	41
Cs	0,3	3,1	0,8	2,5	1,9	2,4
Ga	15,6	22	18,4	20	19	22
Hf	2,1	6,1	2,7	4,8	3,8	4,7
Nb	4,4	16,4	6,9	14,0	11,4	15,7
Rb	15	97	34,9	81	36	61
Sr	192	204	187	208	212	238
Ta	0,3	1,1	0,4	1,0	0,7	1,0
Th	2,7	9,0	2,5	7,0	4,0	5,9
U	0,8	2,4	0,6	2,2	0,9	1,5
V	289	426	306	399	320	390
Zr	71	215	98	172	140	185
Y	18	40	22,5	39	29	35
La	9,6	33,4	14,6	26,9	27,5	25,2
Ce	20	70	30,0	58	53	53
Pr	2,7	8,9	3,78	7,2	6,4	6,8
Nd	11	35	16,1	31	26	28
Sm	2,7	7,6	4,00	6,4	5,9	6,4
Eu	0,9	1,8	1,28	1,6	1,7	1,7
Gd	3,2	7,3	4,26	6,6	6,1	6,7
Tb	0,54	1,26	0,78	1,16	1,03	1,13
Dy	3,10	7,00	4,54	6,68	6,00	6,65
Ho	0,63	1,40	0,87	1,39	1,16	1,34
Er	1,90	3,96	2,63	4,11	3,52	3,72
Tm	0,27	0,60	0,39	0,59	0,51	0,58
Yb	1,86	3,78	2,32	3,56	3,10	3,43
Lu	0,24	0,56	0,32	0,54	0,43	0,52
Cu	71	57	142	71	153	129

4. Resultados

A variação geoquímica de alguns elementos que compõem estas rochas gera uma resposta direta nos resultados de cintilometria, e o estudo integrado desses dois parâmetros possibilitou o entendimento da estratigrafia do vulcanismo na área de estudo. A geoquímica das rochas, o levantamento gama-espectrométrico em campo e o mapeamento geológico na região de Quaraí, quando comparados aos perfis de cintilometria e descrições litológicas dos testemunhos oriundos dos furos de sondagem, permitiram estabelecer a estratigrafia vulcânica. Seis derrames foram identificados na região (Fig. 3), dos quais 5 foram reconhecidos em campo e um

foi identificado primeiramente no furo UR-13 (Fig. 4), próximo a Uruguaiana. Da base para o topo, os derrames estão assim posicionados: derrame Mata Olho, Catalán, Cordillera, Muralha, UR-13 e Coxilha. O conteúdo de sílica de cada uma das rochas identificadas e a taxa de emissão gama, em cps (contagens por segundo), constam da Tabela 2. O valor da taxa de emissão gama revela principalmente o conteúdo de K_2O da rocha, com a contribuição secundária de Th e U. Isso é devido ao teor mais alto de K_2O (1-2% em peso) e baixo de U (2 ppm) e Th (4 ppm). As rochas foram classificadas quanto ao teor de sílica através de amostras com PF (perda ao fogo) < 2% em peso.

Figura 3. Estratigrafia da fácies Alegrete da Formação Serra Geral.

Figura 4. Registro litológico e gama-espectrométrico do furo UR-13 (CPRM, 1983-1986). Os seis derrames da fácies Alegrete foram encontrados neste furo.

Tabela 2. Posição estratigráfica (Número), nome, classificação, dados geoquímicos e taxas de emissão gama (cps = contagens por segundo) dos derrames da fácies Alegrete da Formação Serra Geral. Perda ao fogo < 2%; <LD = abaixo do limite de detecção; Class. = classificação.

Nº	Nome	Class.	SiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	cps
6	Coxilha	Andesito basáltico	54,5	3,5	7,3	1,85	<LD	1,7	0,26	85
5	UR-13	Andesito basáltico	53,0	4,8	8,8	1,05	<LD	1,3	0,23	45
4	Muralha	Andesito basáltico	56,0	3,5	7,0	2,20	<LD	1,5	0,22	100
3	Cordillera	Andesito basáltico	52,50	6,0	10,0	0,90	0,012	1,1	0,15	70
2	Catalán	Andesito	57,5	2,5	6,0	2,20	<LD	1,8	0,25	130
1	Mata Olho	Basalto	51,0	7,3	11,0	0,7	0,013	0,9	0,10	45

Peate *et al.*, (1992), na tentativa de separar os diferentes grupos composicionais de lavas da Província Vulcânica do Paraná, com base na estratigrafia interna da província e da modelagem petrogenética, estabeleceram seis magmas-tipo. Os mag-

mas são distintos com base na abundância e razão dos elementos maiores e traço. Nessa classificação, os seis derrames da fácies Alegrete são constituídos por rochas do tipo Gramado (Fig. 5).

Figura 5. Diagrama MgO vs. TiO_2 , indicando o tipo composicional baixo- TiO_2 dos derrames.

Trabalhos de campo na região de Quaraí e Santana do Livramento, associados a estudos previamente feitos no Uruguai, revelaram que o derrame mais extenso da região é o Catalán. Também é possível estimar a área que as lavas alcançaram, uma vez que três delas ao menos podem ser distinguidas quando vistas em imagens de satélite, por possuírem diferentes tonalidades. O derrame Catalán abrange uma área de cerca de 50 x 50 km no Brasil. Na observação dos testemunhos de sondagem (Tab. 3), a seqüência vulcânica completa da fácies Alegrete está presente no furo UR-13, e registros parciais estão presentes nos demais furos. Entre os municípios de Itaqui e Alegrete, foi traçado um perfil estratigráfico (Fig. 6), associando-se a litologia e dados de cintilometria de 9 furos, dispostos numa extensão de 117 km. Os dois derrames do topo da seqüência (derrames UR-13 e Coxilha) não foram registrados nestes furos, pois devem ter sido erodidos.

A análise dos registros dos furos de sondagem mostra que a espessura mínima encontrada da Formação Botucatu é de 11 e a máxima de 84m. Os arenitos dessa formação descritos, pela CPRM (1983-1986) são predominantemente quartzosos, de granulometria fina a muito fina, com raros grãos médios e com coloração variando entre cores claras e escuras, principalmente cinza claro e castanho-avermelhado. Camadas de arenito silicificado, com espessuras entre 0,2 e 0,5 m, aparecem frequentemente no topo de cada derrame. A Formação Guarú (Scherer & Lavina, 2005), que está abaixo da Formação Botucatu, alcança espessuras entre

5 e 68 m, e não foi atingida em alguns furos. É composta por arenito fino intercalado com siltitos argilosos de origem flúvio-lacustre. As rochas sedimentares da Formação Botucatu e da Formação Guarú constituem o Aquífero Guarani, o maior reservatório de água doce do mundo.

A espessura total dos seis derrames em grande parte da região é de 100 a 150 m, mas no furo UR-13 há quase 300 m de rochas vulcânicas. Outro aspecto importante registrado nesse furo é a presença de pirita e calcopirita no preenchimento da brecha que ocorre em profundidade superior a 200 m, sendo informação relevante no estudo da metalogenia na região. Os derrames Catalán e Cordillera são mineralizados no Uruguai, contendo geodos gigantes (Gilg *et al.*, 2003; Morteani *et al.*, 2010) preenchidos por ametista (Hartmann *et al.*, 2011) e ágata, que chegam a 4 m de altura, e possivelmente depósitos semelhantes ocorram no lado brasileiro ao longo do Rio Quaraí. O Garimpo do Vivi, município de Santana do Livramento, produz geodos de ágata e iniciou recentemente a produção de geodos de ametista de grande porte; o minério está contido no derrame Catalán.

O derrame Mata Olho foi descoberto através dos furos de sondagem e posteriormente visto em campo; recobre diretamente os arenitos da Formação Botucatu, embora em alguns locais os derrames Catalán e Cordillera encontrem-se em contato direto com essas rochas sedimentares. O derrame está presente em 4 furos de sondagem como a unidade basal nas regiões de Itaqui e Alegrete. A sua espessura varia de 10 a 15 m. Nas proximidades da

rodovia BR-293, foi visto em campo às margens do Arroio Mata Olho, sendo recoberto pelo derrame Cordillera. Portanto, o derrame Catalán não ocorre nesse local. A rocha é um basalto com 51% de SiO_2 e valores cintilométricos estão entre 49 e 54 cps. O derrame Catalán contrasta com as outras lavas por sua composição andesítica (57,5% em peso de SiO_2) e taxas de emissão gama alta (115-125 cps). Possui estrutura de lava a'a', com uma crosta basal, um núcleo maciço e uma crosta superior com bandamento ígneo contorcido, visível em vários afloramentos, seguido de uma camada superior com autobrecha, com 1-3 m de espessura. Em porções mais espessas do derrame, o núcleo maciço possui disjunção colunar. O derrame Cordillera (20-50 m de espessura) é um andesito basáltico com 52,5% em

peso de SiO_2 e 62-67 cps. A estrutura interna apresenta o núcleo dividido em duas porções, uma não mineralizada e com disjunção colunar, e a outra com mineralizações e sem disjunção colunar, mais as bordas de resfriamento inferior e superior do derrame. O derrame Muralha tem de 30 a 60 m de espessura, topo e base amigdalóides e núcleo maciço, com 56% em peso de SiO_2 (andesito basáltico) e taxas de emissão entre 90 e 94. O derrame UR-13 possui 53% em peso de SiO_2 , 45 cps e tem espessura de quase 60 m. O derrame Coxilha, que foi pouco estudado devido à sua ocorrência apenas em um morro ao norte da região de Santana do Livramento e em furos de sondagem, tem 54,5% em peso de SiO_2 e 85 cps, com espessura de aproximadamente 30 m.

Tabela 3. Descrição dos testemunhos de sondagem realizados pela CPRM (1983-1986) na região estudada. Derrames: 1 = Mata Olho, 2 = Catalán, 3 = Cordillera, 4 = Muralha, 5 = UR-13, 6 = Coxilha. Datum Córrego Alegre para as coordenadas; (-) = ausente.

Furo	Coordenadas UTM (Fuso 22)	Formações sedimentares na base do furo	Derrames presentes	Espessura total de derrames (m)	Arenito intercalado
AL-1	6688750 m N/599500 m E	Guará e Botucatu	1	69	presente
AL-2	6737100 m N/592750 m E	Guará e Botucatu	2, 3, 4	126	presente
AL-3	6726000 m N/602100 m E	Botucatu	2, 3, 4	154	-
AL-4	6696500 m N/602000 m E	Guará e Botucatu	1, 2, 3	99	presente
AL-5	6702300 m N/598250 m E	Botucatu	2, 3, 4	146	presente
IT-1	6755900 m N/555600 m E	Botucatu	2,3	110	-
IT-2	6755000 m N/554400 m E	Botucatu	3	95	presente
IT-3	6773800 m N/544100 m E	Botucatu	2, 3	110	presente
IT-4	6759300 m N/539750 m E	Botucatu	-	-	-
IT-5	6760050 m N/560000 m E	Guará e Botucatu	1	24	-
IT-6	6759100 m N/556800 m E	Guará e Botucatu	1	9	-
IT-7	6768500 m N/548750 m E	Guará e Botucatu	1	80	-
IT-8	6770456 m N/546789 m E	Botucatu	1	12	-
IT-10	6760800 m N/574700 m E	Botucatu	2, 3, 4	160	presente
UR-1	6716250 m N/534800 m E	Guará e Botucatu	2	54	-
UR-2	6716250 m N/352250 m E	Guará e Botucatu	1	86	-
UR-13	6687000 m N/536200 m E	Botucatu	1, 2, 3, 4, 5, 6	290	presente
UR-14	6694000 m N/512500 m E	Guará e Botucatu	1, 2	81	presente
UR-15	6687350 m N/489050 m E	Botucatu	1, 2, 3	256	presente

Figura 6. Perfil estratigráfico A-B entre Itaqui e Alegrete e os registros litológicos e gama-espectrométricos dos furos de sondagem (CPRM, 1983-1986). Topografia atual.

5. Conclusões

Analisar o vulcanismo de uma região através da utilização de furos de sondagem (Fig. 7), integrados a dados litoquímicos e geofísicos, é uma ferramenta pouco utilizada, até o momento, na Província Vulcânica do Paraná, apesar da grande eficiência e da importância dos dados obtidos. A sucessão estratigráfica correspondente à fácies Alegrete da Formação Serra Geral, foi estabelecida com base em geoquímica, aliada a geologia de campo e confirmada através dos furos de sondagem com perfis gama-espectrométricos.

Cada derrame, e principalmente o Catalán - que tem características geoquímicas e geofísicas

peculiares - funciona como guia estratigráfico.

A utilização de furos de sondagem foi fundamental para o entendimento da estratigrafia vulcânica na região oeste do Rio Grande do Sul, mostrando que a fácies Alegrete da Formação Serra Geral, é constituída por seis derrames. A assinatura cintilométrica das rochas é consequência direta da composição química, evidenciada em cada unidade aqui analisada. A variação química das rochas vulcânicas está entre 51-57,5% em peso de SiO_2 . As rochas com maior teor de sílica (andesitos Catalán) possuem maiores taxas de emissão gama; os andesitos basálticos têm valores intermediários, enquanto que as rochas mais básicas (basaltos do derrame Mata Olho) possuem os menores valores.

Figura 7. Alguns furos selecionados na região oeste do Rio Grande do Sul, com litologias e gama-espectrometrias associadas (CPRM, 1983-1986). A escala vertical indica a profundidade abaixo da superfície. A altitude (elevação acima do nível do mar) está mostrada no topo de cada furo. O número do furo está indicado abaixo de cada registro. Taxa de emissão gama em cps.

Agradecimentos - O trabalho foi financiado pelo projeto PRONEX-FAPERGS/CNPq sobre “Minerais estratégicos do sul do Brasil”, coordenado por Léo A. Hartmann. O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ofereceu apoio de campo e escritório. A primeira autora recebeu bolsa de iniciação científica PIBIC-CNPq.

Referências

- Almeida, F.F.M. 1981. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. In: II SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., São Paulo. Atas do... São Paulo, SBG, v.1, p.1-20
- Bellieni G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A. & Stolf, D. 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná Plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology*, 27(4): 915-944.
- Comin-Chiaramonti, P., Cundari, A., Piccirillo, E.M., Gomes, C.B., Castorina, F., Censi, P., De Min, A., Marzoli, A., Speziale, S. & Velasquez, V.F. 1997. Potassic and sodic igneous rocks from eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationships with associated Paraná flood tholeiites. *Journal of Petrology*, 38(4): 495-528.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1983-1986. *Perfis de Sondagem (Projeto Poços Tubulares para Água Subterrânea na Fronteira Oeste do RS - Alegrete, Uruguaiana, Itaqui)*.
- Duarte, L.C., Hartmann, L.A., Vasconcellos, M.A.Z., Medeiros, J.T.N. & Theye, T. 2009. Epigenetic formation of

- amethyst-bearing geodes from Los Catalanes gemological district, Artigas, Uruguay, southern Paraná Magmatic Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184: 427-436.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Dickin, A.P. & Leonardos, O.H. 1995. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 136: 149-165.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P. & Mitchell, J.G. 1999. The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood-basalt genesis: geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137: 147-169.
- Gilg, H. A., Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C., Gatter, I. & Strieder, A. J. 2003. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon and Sr isotope study on basalt, quartz and calcite. *Mineralium Deposita*, 38: 1009-1025.
- Hartmann, L.A., Duarte L.C., Massonne, H.-J., Michelin, C., Rosenstengel, L.M., Bergmann, M., Theye, T., Pertille, J., Arena, K.R., Duarte, S.K., Pinto, V.M., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C. & Wildner, W. 2011. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdaloids and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. *International Geological Review* (published on Internet, doi: 10.1080/00206814.2010.496253).
- Hartmann, L.A., Wildner, W., Duarte, L.C., Duarte, S.K., Pertille, J., Arena, K.R., Martins, L.C. & Dias, N.L. 2010. Geochemical and scintillometric characterization and correlation of amethyst geode-bearing Paraná lavas from the Quaraí and Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. *Geological Magazine*, 147: 954-970.
- Milner, S.C., Duncan, A.R., Whittingham, A.M. & Ewart, A. 1995. Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic units within the Paraná-Etendeka igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69: 137-157.
- Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C. & Gilg, H. A. 2010. The genesis of the amethyst geodes at Artigas (Uruguay) and the paleohydrology of the Guaraní aquifer: structural, geochemical, oxygen, carbon, strontium isotope and fluid inclusion study. *International Journal of Geological Sciences*, 99: 927-947.
- Nardy, A.J.R., Oliveira, M.A.F., Betancourt, R.H.S., Verdugo, D.R.H. & Machado, F.B. 2002. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. *Geociências*, 21(1/2): 15-32.
- O'Connor, J.M. & Duncan, R.A. 1990. Evolution of the Walvis Ridge - Rio Grande Rise hot spot system: implications for African and South American plate motions over plumes. *Journal of Geophysical Research*, 95(11): 17475-17502.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J. & Mantovani M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55: 119-139.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani M.S.M., Rogers N.W. & Turner, S.P. 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/U 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*, 40: 451-473.
- Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. IAG-USP, in press.
- Scherer, C.M.S. 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of Paraná Basin, Southern Brazil. *Sedimentology*, 49: 97-116.
- Scherer, C.M.S. & Lavina, E.L.C. 2005. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian-fluvial strata of the Upper Jurassic Guará Formation, Southern Brazil. *Sedimentology*, 52: 1323-1341.
- Turner, S.P., Peate, D.W., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M. 1999. Chemical stratigraphy of the Paraná basalt succession in western Uruguay: further evidence for the diachronous nature of the Paraná magma types. *Journal of Geodynamics*, 28: 459-469.
- Waichel, B.L., Scherer, C. M. S. & Frank, H.T. 2008. Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: features and emplacement aspects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 171: 59-72.
- White, I.C. 1908. *Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil*. Rio de Janeiro, DNPM, 316p.
- Wildner, W., Lopes, R.C., Romanini, S. & Camozzato, E. 2003. Contribuição à estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná. In: I ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDO E BACIAS, 2003, Porto Alegre. Hartmann, L.A. (ed.), p. 204-210.
- Wildner, W., Hartmann, L.A. & Lopes, R.C. 2007. Serra Geral Magmatism in the Paraná Basin - a new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. In: I WORKSHOP PROBLEMS IN THE WESTERN GONDWANA GEOLOGY, 2007, Gramado, v.1, p. 189-197.

Zalán, P.V., Conceição, J.C.J., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T. & Zanotto, A.O. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO

DE GEOLOGIA, 3. 1987. Curitiba, *Atas...* Curitiba, SBG, v.1, p. 441-477.