

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTRATIGRAFIA DE BASALTOS NA REGIÃO DE  
SANTA CRUZ DO RIO PARDO (SP): UMA ABORDAGEM  
GEOQUÍMICA**

**Filipe Aita Isquierdo**

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi  
Co-orientador: Dr. Francisco de Assis Negri

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF/08/21)

TF  
A311  
F.e

SÃO PAULO  
2008



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTRATIGRAFIA DE BASALTOS NA REGIÃO DE SANTA CRUZ DO  
RIO PARDO (SP): UMA ABORDAGEM GEOQUIMÍCA

Filipe Aita Isquierdo



Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi  
Co-orientador: Dr. Francisco de Assis Negri  
(TF- 2008/21)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900025600

SÃO PAULO  
2008

SÃO PAULO  
2008

TF  
A311  
F.e

ОБЩАСТВО ЗА ОДИВЯНИЕ  
БЪЛГАРСКОТО ОДИВИЧЕ

ОДИВИЧЕ ВЪЗМОЖНОСТИ СЪВЪДИ  
БЪЛГАРСКА ОДИВИЧА СР



БЪЛГАРСКА ОДИВИЧА СР

БЪЛГАРСКА ОДИВИЧА СР  
БЪЛГАРСКА ОДИВИЧА СР  
БЪЛГАРСКА ОДИВИЧА СР  
(1992-1993)

БЪЛГАРСКА  
ОДИВИЧА СР

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTRATIGRAFIA DE BASALTOS NA REGIÃO DE SANTA CRUZ DO  
RIO PARDO (SP): UMA ABORDAGEM GEOQUIMÍCA  
(TF- 2008/21)

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi Valdecir de Assis Janasi.  
Aluno: Filipe Aita Isquierdo Filipe A. Isquierdo

SÃO PAULO  
2008

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente meus pais e as minhas irmãs que me deram todo o apoio, carinho, educação durante estes anos e que me propiciaram estar aqui neste momento. Obrigado Pai e Mãe, Má e Me. Agradeço a Bubu pelo apoio nos momentos de alegria e stress, obrigado linda.

Agradeço ao professor Valdecir que me ajudou e muito em vários aspectos, seja na correção, seja em dicas ou observações, fazendo com que eu tenha aprendido muito durante a realização deste relatório.

Agradeço ao Chicão do Instituto Geológico que me ajudou com os mapas, ao Paulo do LTA que tantas vezes teve que me aturar processando as infinitas amostras para as análises geoquímicas, agradeço ao Paulo Mori pela ajuda para a elaboração das pastilhas fundidas e ao Silvio Luis pelos toques nas preparações das amostras.

Agradeço a Dona Amélia com seus 87 anos de vida e mais de 30 deles dedicados a cuidar de quem passa pela República Covil Das Virgens. Republica esta que me acolheu quando eu precisava de verdade de um cantinho para morar. Agradeço aos amigos já formados que me receberam no Covil, o Manolo, Mikuin, 24, Krust, Coisinha, Guri e tantos outros que passaram pela Rep. e também aos que ainda moram lá, Titica, Iscória, Rabikó, Fyona, Dé e Rabão.

Agradeço aos amigos que junto comigo integravam o grupo da Morte (Pulga, Iscória, Hemorróida) pelos momentos de desespero com relatórios e também de alegria tomando uma cervejinha no final do dia, ao Carrapato, Brenda, Funga, Barriga, Infiadinho e todos os demais da tchurma não foram citados. Agradeço a todos os funcionários e professores durante estes anos e também a todos os amigos que fiz durante o curso que são muitos e me ajudaram diretamente ou indiretamente. De coração, obrigado. Valeu!

## RESUMO

Os derrames basálticos da Formação Serra Geral (Província Magmática Paraná-Etendeka) apresentam-se em campo muito semelhantes, muitas vezes sem marcadores estratigráficos e com afloramentos restritos, tornando sua delimitação em mapa complicada. Este trabalho teve por objetivo identificar a estratigrafia da seqüência de derrames basálticos que afloram na região centro-oeste do Estado de São Paulo, entre as cidades de Santa Cruz do Rio Pardo e Águas de Santa Bárbara, a partir de mapeamento em escala 1:25.000 uma área de aproximadamente 60 km<sup>2</sup>. Foram separados 3 derrames com base em critérios estruturais, como a zonalidade dos derrames, a presença de arenitos "intertrapp" e de estruturas de interação magma-sedimentos ("peperitos"). Trabalhos anteriores revelam que existe uma variação regional bem evidente nos conteúdos de óxidos, elementos traço e razões entre elementos, mostrando-se viável na área selecionada um ensaio do uso da geoquímica como ferramenta estratigráfica. Os diferentes derrames identificados foram correlacionados com critérios petrográficos e geoquímicos, apresentando diferenças texturais expressivas; constatou-se também que possuem significativa diferença nas quantidades de elementos menores e traço, em especial teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de Zr, que criaram possibilidade de separá-los em grupos distintos, correspondendo aos mesmos derrames separados em campo. Foi feita correlação dos derrames separados na área de detalhe com as ocorrências regionais em uma área de aproximadamente 350 km<sup>2</sup>, a leste da área estudada em detalhe, ao longo do vale do Rio Pardo.

## ABSTRACT

The basalt flows of the Serra Geral Formation (Paraná-Etendeka Magmatic Province) are too similar in the field, often without stratigraphic markers and poorly exposed, what difficults their separation in map. This work tried to identify the stratigraphy of a sequence of basaltic flows in the region of Santa Cruz do Rio Pardo - Águas de Santa Bárbara (State of São Paulo) in a ~60 km<sup>2</sup> area that was mapped at the 1:25,000 scale. Three flows were separated based on structural criteria, such as flow zoning, the presence of "intertrapp" sandstone and of structures formed by magma-sediment interaction ("peperites"). Previous works have shown that there is a well-marked regional variation in the contents of oxides, trace elements and element ratios, so that the area may be adequate for an essay of the use of geochemistry as a stratigraphic tool. The different flows were correlated based on petrographic and geochemical criteria, showing textural and geochemical identity, mostly using the contents of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Zr, which are characteristic of each flow. A tentative evaluation of the distribution of the flows identified in the mapped area along an E-W area of 350 km<sup>2</sup> along the Rio Pardo Valley was made to test for the regional implications of this work.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
<b>3.1 A PROVÍNCIA MAGMÁTICA PARANÁ-ETENDEKA .....</b>	<b>2</b>
<b>3.2 O USO DA GEOQUÍMICA NA ESTRATIGRAFIA DE BASALTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3.3 GEOLOGIA REGIONAL.....</b>	<b>5</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1 LEVANTAMENTOS DE CAMPO .....</b>	<b>8</b>
<b>4.2 ANÁLISES PETROGRÁFICAS .....</b>	<b>9</b>
<b>4.3 ANÁLISES QUÍMICAS.....</b>	<b>9</b>
<b>5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>	<b>10</b>
<b>5.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS .....</b>	<b>10</b>
<b>5.2 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>6. RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>10</b>
<b>6.1 MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE DETALHE .....</b>	<b>10</b>
<b>6.2 ANÁLISES PETROGRÁFICAS .....</b>	<b>15</b>
<b>6.3 GEOQUÍMICA .....</b>	<b>23</b>
<b>6.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS E TIPOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
<b>6.3.2 ESTRATIGRAFIA QUÍMICA.....</b>	<b>24</b>
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>26</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>27</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Os derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Província Magmática Paraná-Etendeka), PMPE, no campo, se mostram muito semelhantes, muitas vezes sem marcadores estratigráficos confiáveis e/ou com afloramentos descontínuos, tornando sua estratigrafia uma tarefa difícil e sua delimitação em mapa, complicada.

No entanto, em outras províncias continentais semelhantes, como no Deccan (Cox & Hawkesworth, 1985) na Índia, em que uma detalhada estratigrafia baseada na geoquímica é apresentada para uma sequência de 1200 m de derrames de basaltos em uma escarpa próximo a Mahabaleshwar, e em Columbia River (Mangan *et al.* 1986) no oeste dos EUA, que possui também estratigrafia geoquímica apresentada para todo o Grupo de basaltos Columbia River, contrastes geoquímicos têm sido utilizados para correlação estratigráfica de pilhas vulcânicas (cf. Peate *et al.* 1992).

Trabalhos anteriores foram realizados na região entre Piraju e Ourinhos (Janasi *et al.* 2007, Negri *et al.* 2008) revelando variações geoquímicas importantes entre os derrames basálticos. Resultados obtidos por Negri *et al.* (2008) demonstram que os derrames basálticos apresentam regionalmente, importantes variações nos conteúdos de óxidos como MgO (6-3,8%), TiO<sub>2</sub> (2-4%) e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,2-0,75%), em elementos traço como Zr (130-320ppm) e Sr (250-650 ppm) e em razões entre elementos incompatíveis como Zr/Y (4,4-8,2) e Ti/Y (350-680). Com base nessas variações significativas, mostrou-se viável realizar nesta região um ensaio de uso da geoquímica como ferramenta estratigráfica nos basaltos da PMPE, sustentado por trabalhos de campo e análises petrográficas, detalhados em seções geológicas ao longo do vale do Rio Pardo.

## **2. OBJETIVOS**

O trabalho tem por objetivo o estudo da estratigrafia da seqüência de derrames basálticos da região de Santa Cruz do Rio Pardo, SP, combinando um controle geológico obtido a partir da coleta de dados em campo, para a realização de mapa em escala 1:25.000 e de perfil de detalhe, com o estudo da petrografia e geoquímica dos basaltos.

Os trabalhos anteriores realizados na área, em escala 1:100.000, não fizeram a separação dos diferentes derrames, dadas as dificuldades de correlação relacionadas à carência de marcadores estratigráficos e devido ao fato de não haver boas exposições dos basaltos na região.

O projeto maior em que se insere esta pesquisa tem como objetivo principal a prospecção de material para uso na indústria do cimento (pozolana), que demanda a identificação dos diferentes derrames e sua zonalidade.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 A PROVÍNCIA MAGMÁTICA PARANÁ-ETENDEKA**

A Província Magmática Paraná-Etendeka estende-se por aproximadamente 1.200.000 km<sup>2</sup> nos estados do centro sul do Brasil e áreas de fronteira com Uruguai, Paraguai e Argentina; Etendeka na Namíbia representa a continuidade da ocorrência na África. Este enorme evento vulcânico está associado com a abertura do Oceano Atlântico e tem idade eocretácea (138-127 Ma), sendo seu volume estimado em 800.000 km<sup>3</sup> de lavas, podendo alcançar espessuras de até 1.700m no eixo central na Bacia do Paraná (Stewart *et al.* 1996).

Os derrames associados à PMPE estão dispostos sobretudo na porção sudeste do continente sul-americano e se depositaram não só sobre a Bacia Sedimentar do Paraná, mas também nas áreas adjacentes, envolvendo o embasamento cristalino e as bacias marginais no Oceano Atlântico (Figura 1).

O magmatismo ocorrido na Província Paraná-Etendeka é bimodal, mas a pilha de lavas é amplamente dominada por basaltos toleíticos (>90%), enquanto significativos volumes de lavas ácidas (dacitos e riolitos) são encontrados no Estado do Rio Grande do Sul e em Etendeka.

O magmatismo ocorrido na Bacia do Paraná é essencialmente de natureza básica e caráter toleítico, sendo que termos mais diferenciados, de composição ácida-intermediária também estão presentes, porém não atingem 3% do volume total de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Nardy *et al.* 2002). Na Bacia do Paraná, a Província é caracterizada predominantemente pelos derrames da Formação Serra Geral, pertencentes ao Grupo São Bento. Além da extensa área de derrames, podem-se destacar as muitas ocorrências de rochas intrusivas na forma de sills e diques que também estão ligadas ao vulcanismo Serra Geral, cuja área se estende praticamente por todos os limites da província (Machado *et al.* 2007).

Rochas vulcânicas intermediárias a ácidas são mais comuns na porção SE da Bacia do Paraná onde predomina uma variedade descrita como tipo Palmas, que possui afinidade com os basaltos de baixo Ti, e outras ocorrências menores na porção centro-norte da Bacia que são descritas como sendo um segundo tipo, chamado de Chapecó que mostra afinidades geoquímicas e isotópicas com os basaltos de alto Ti (Nardy *et al.*, 2002).

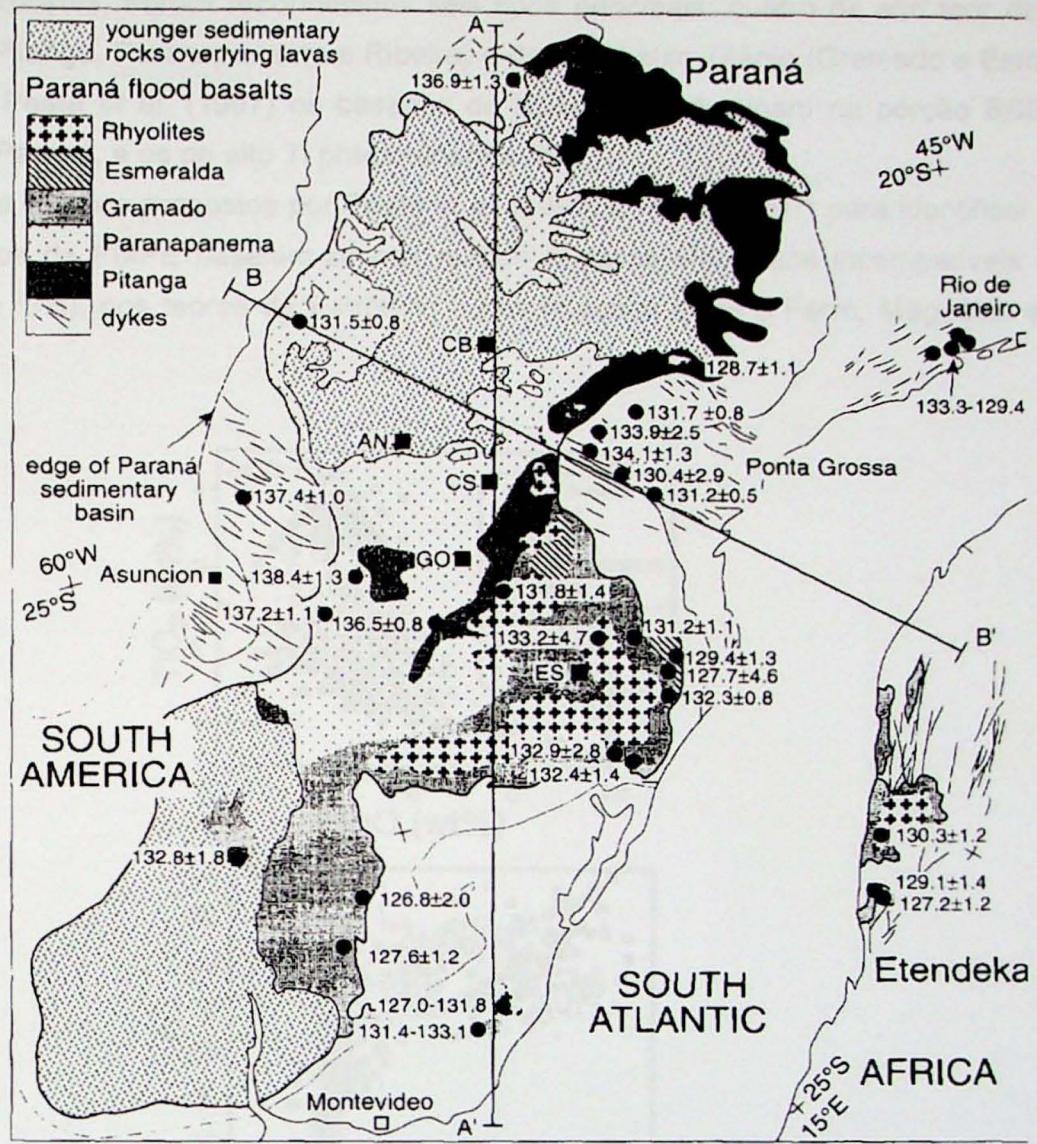


Figura 1. Mapa pré-drift da América do Sul e África, mostrando a extensão do magmatismo Paraná-Etendeka, e da Bacia sedimentar do Paraná, a localização da Formação Serra Geral e do enxame de diques de Ponta Grossa. Extraído de Stewart *et al.*, (1996).

### 3.2 O USO DA GEOQUÍMICA NA ESTRATIGRAFIA DE BASALTOS

Estudos detalhados da geoquímica de rochas têm se mostrado ferramenta fundamental para a geologia das províncias basálticas continentais. Nas Províncias do Rio Columbia nos EUA (Mangan *et al.* 1986) e no Deccan (Cox & Hawkesworth, 1985) na Índia, estudos obtiveram sucesso na correlação dos derrames e na estratigrafia química.

Estes autores trabalham principalmente com variações de elementos maiores como os óxidos de Magnésio, Titânio e Fósforo, que apesar de variarem pouco, são muito significativas para a diferenciação dos derrames.

Peate *et al.* (1992) propuseram uma subdivisão dos basaltos da PMPE, baseada na geoquímica de um grande conjunto de amostras obtidas em furos de sondagem e perfis em

seções expostas. Foram reconhecidos seis tipos principais: quatro de alto teor de Titânio (Urubici, Pitanga, Paranapanema e Ribeira) e dois de baixo Titânio (Gramado e Esmeralda). Segundo Peate *et al.* (1997) os basaltos de baixo Ti predominam na porção SSE sul da Bacia do Paraná, e os de alto Ti predominam a NW.

Os critérios propostos por Peate *et al.* (1992) e Peate (1997) para identificar os tipos de basaltos da PMPE baseiam-se nas razões entre os elementos incompatíveis (Titânio, Zircônio e Ítrio), nos teores de Estrôncio e nas relações entre o Ferro, Magnésio e Titânio (Figura 2).

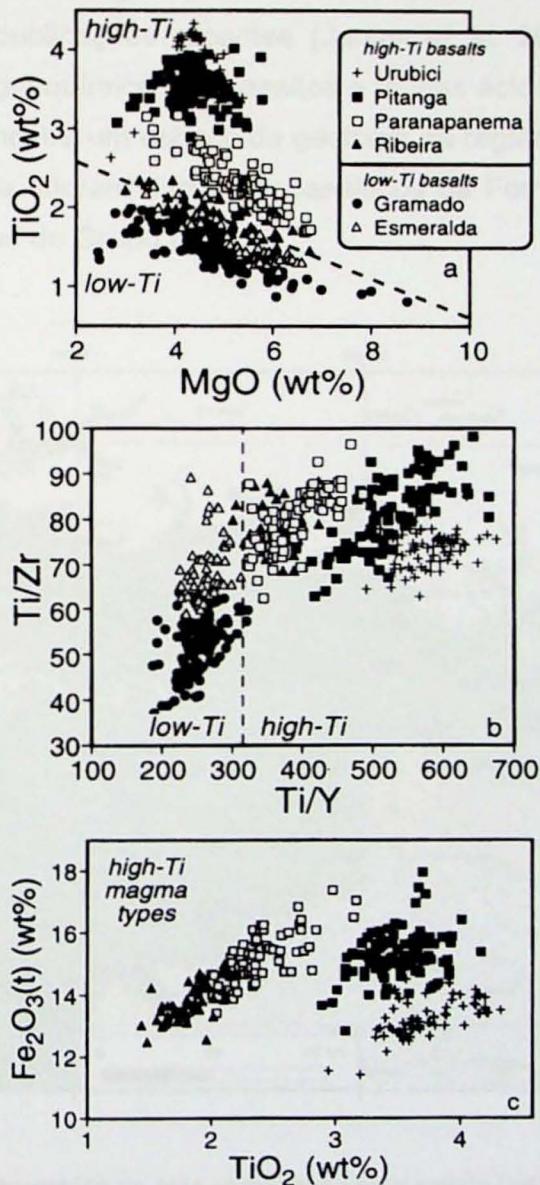


Figura 2. a) MgO vs  $\text{TiO}_2$ : A linha tracejada marca a divisão aproximada entre os magmas do tipo Alto Ti e Baixo Ti. b) Ti/Y vs Ti/Zr: Magmas do tipo Baixo Ti (Gramado e Esmeralda) são distinguíveis do magma do tipo Alto Ti (Urubici, Pitanga, Paranapanema, Ribeira), pelo baixo Ti/Y ( $<310$ ); magma Esmeralda tem maior Ti/Zr ( $>60$ ) do que magmas Gramado. c)  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t})$ , mostrando a diferença entre os magmas do tipo Alto Ti. Extraído de Peate (1997).

### 3.3 GEOLOGIA REGIONAL

Foi escolhida para ensaio de correlação geoquímica de derrames basálticos, uma faixa de 10 por 42 km ao longo do vale do Rio Pardo que se estende a leste da cidade de São José do Rio Pardo, até os arredores de Águas de Santa Bárbara, no centro-oeste do Estado de São Paulo. Esta região está sendo alvo de trabalhos de mapeamento em escala de semi-detalhe por pesquisadores do Instituto de Geociências da USP (Valdecir de Assis Janasi) e do Instituto Geológico (Tarcísio José Montanheiro, Francisco de Assis Negri), que geraram algumas publicações recentes (Janasi *et al.* 2007; Negri *et al.* 2008) versando sobre a geologia e geoquímica dos basaltos e rochas ácidas.

A Figura 3 mostra um esboço da geologia da região, no qual pode ser observado que na área selecionada afloram derrames basálticos da Formação Serra Geral recobertos em parte por sedimentos do Grupo Bauru.

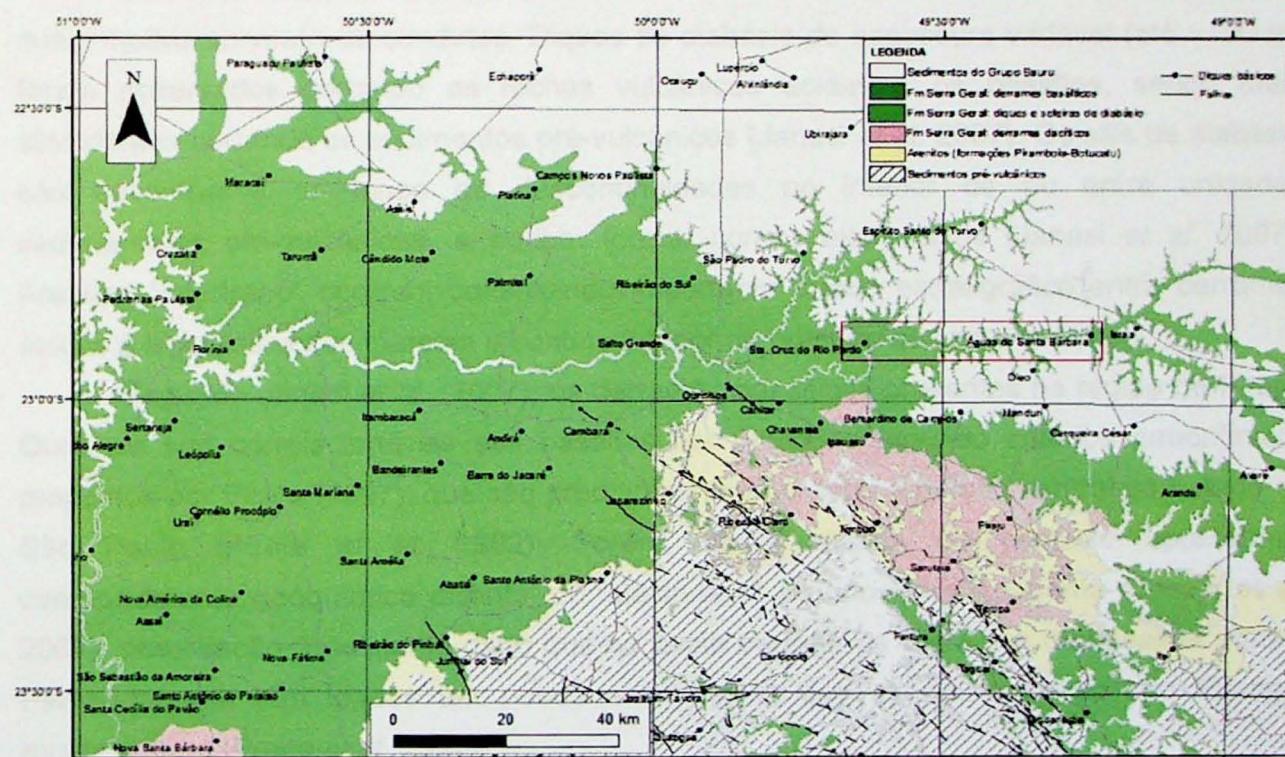


Figura 3. Localização Geográfica da área selecionada para estudo (retângulo vermelho) em mapa geológico simplificado regional. Extraído de Negri *et al.* (2006).

As rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral compreendem regionalmente, um conjunto de derrames de basaltos toleíticos, com pacotes de lavas assentando-se sobre os arenitos da Formação Botucatu em contato concordante e abrupto,

gerando muitas vezes corpos de arenito "intertrapp", cuja origem parece estar relacionada a pausas no evento vulcânico (Machado *et al.* 2007).

Na região SW do Estado de São Paulo os derrames basálticos se sobreponem a derrames ácidos de composição traquidacítica, que constituem a base da pilha vulcânica, assim como sobre os arenitos da Formação Botucatu, e são capeados em discordância erosiva por sedimentos arenosos do Grupo Bauru (Janasi *et al.* 2007).

Os derrames basálticos são formados por uma rocha de cor cinza escura a negra, afanítica, com espessuras variáveis, desde poucos metros a dezenas de metros. Nos derrames mais espessos, a zona central é maciça, microcristalina, com fraturas por juntas subverticais de contração, dividindo a rocha em colunas. A parte superior do derrame tem aspecto vesicular, aparecendo vesículas e amígdalas, com muita matéria vítreia. Essas amígdalas são parcialmente ou inteiramente preenchidas por minerais como calcedônia, quartzo, calcita e/ou zeólitas. Na zona basal dos derrames são observados aspectos semelhantes à parte superior do derrame, porém em espessura e abundância mais reduzidas.

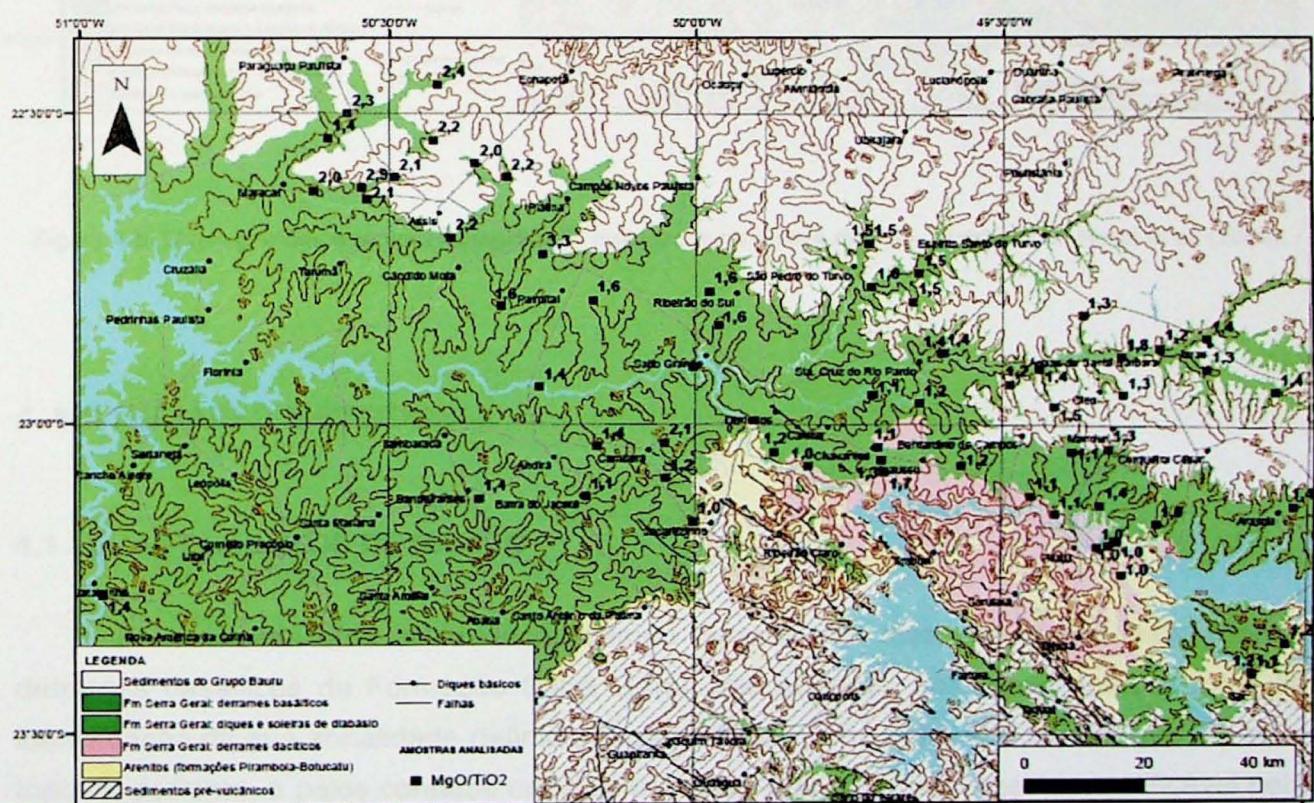
Numerosos diques acompanharam, em sua formação, as efusões das lavas, para as quais muitos serviram de condutos. Diques de diabásio de espessura variável (até >100 m) foram observados cortando as rochas vulcânicas ácidas e os basaltos, sendo mais abundantes cortando os sedimentos pré-vulcânicos (Janasi *et al.* 2007). Os sills de diabásio são encontrados ao longo de descontinuidades no interior de ou entre unidades sedimentares pré-vulcânicas, e podem formar corpos expressivos (Janasi *et al.* 2007). Arenitos "intertrapp" ocorrem constituindo importante marco estratigráfico entre derrames ácidos e algumas vezes marcam o contato inferior do primeiro derrame basáltico.

Segundo Janasi *et al.* (2007), os derrames basálticos presentes na região de Piraju-Ourinhos são correlacionáveis aos basaltos tipo Pitanga, segundo critérios geoquímicos propostos por Peate (1997), que são predominantes por toda a porção central do Estado de São Paulo (Peate *et al.* 1992). Porém, vários diques de diabásio apresentam comportamento geoquímico distinto, correlacionável ao tipo Paranapanema (Janasi *et al.* 2007), observação consistente dado que no oeste paulista os derrames de basaltos do tipo Paranapanema têm idades um pouco mais jovens que os derrames do tipo Pitanga, recobrindo-os (Peate *et al.* 1992).

Os resultados das análises químicas para as amostras de derrames basálticos obtidos por Negri *et al.* (2008) mostram uma importante variação no conteúdo de óxidos, como MgO (6,0-3,8%), TiO<sub>2</sub> (2,0-4,0%) e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,2-0,75%), elementos traço como Zr (130-320 ppm) e Sr (250-650 ppm), e razões entre elementos incompatíveis, como Zr/Y (4,4-8,2) e Ti/Y (350-680). Essas variações são indicativas de que os derrames se formaram a partir de uma diversidade de magmas, uma vez que, tendo em vista a típica espessura observada

em campo (até 20 m), não se espera a atuação expressiva de processos de fracionamento “in situ” (Negri *et al.* 2008).

Em escala regional, pode-se observar que os derrames iniciais, aflorantes a sudeste da região entre Piraju e Ourinhos são os mais diferenciados, como indicado pelas razões MgO/TiO<sub>2</sub> da ordem de 1,0 e teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da ordem de 0,6%. Em direção a oeste e a norte observa-se que os derrames tornam-se menos diferenciados alcançando teores baixos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,25-0,30%), TiO<sub>2</sub> (2,0-2,5%) e baixas razões Ti/Y (360-400) e Zr/Y (4,4-5,4), na região de Assis (Figuras 4a e 4b). Estes basaltos mais a noroeste apresentam geoquímica equivalente ao magma-tipo Paranapanema, e correlacionável a parte dos diques da região de Fartura-Ribeirão Claro (Janasi *et al.* 2007), que devem ter sido seus alimentadores, enquanto que os basaltos aflorantes a sudeste têm afinidade geoquímica com o magma-tipo Pitanga. Esta observação é coerente com trabalhos regionais anteriores (Machado *et al.* 2007; Peate *et al.* 1997).



**Figura 4 a.** Mapa geológico regional simplificado mostrando as razões MgO/TiO<sub>2</sub>. Extraído de Negri et al. (2008).

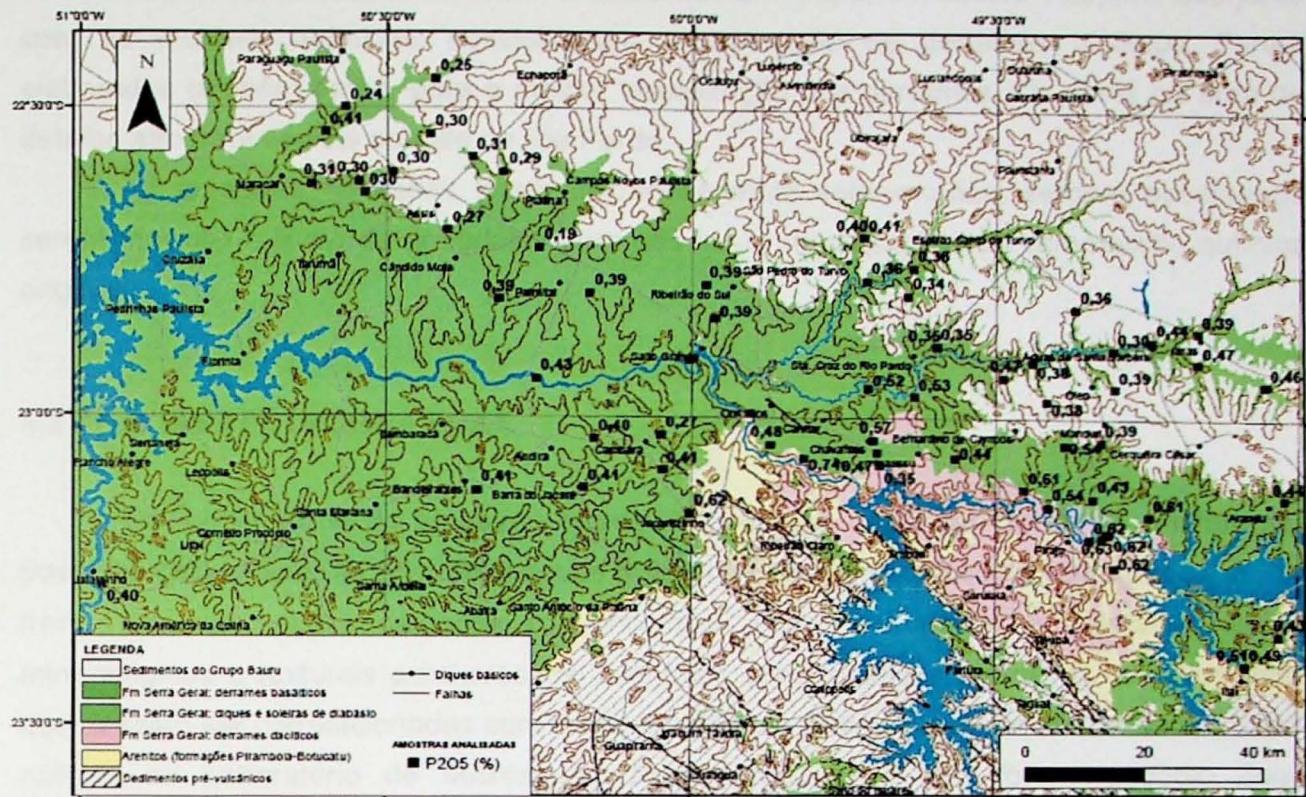


Figura 4 b. Mapa geológico regional simplificado mostrando os teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Extraído de Negri et al. (2008).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Foi realizada uma atividade de campo durante três dias, em região onde afloram derrames basálticos da Formação Serra Geral, que puderam ser separados por meio da identificação da sua zonalidade definida geralmente por uma zona vesiculada, que marca o topo do derrame, e pelos contatos entre os mesmos, que algumas vezes é identificável pela localização de arenitos “intertrapp”. Estruturas de interação magma-sedimentos inconsolidados, reconhecidas como peperitos, também foram observadas e descritas cuidadosamente, já que servem de marco estratigráfico entre derrames. Feições geomorfológicas também foram levadas em conta, na ausência de outros marcadores estratigráficos, constituindo importante ferramenta de campo para a separação dos derrames. Solos arenosos muito diferentes dos desenvolvidos sobre os basaltos são observados, correspondendo a sedimentos do Grupo Bauru que cobrem grande parte dos derrames basálticos na área de detalhe.

Baseando-se nesses critérios foi elaborado um mapa, em escala 1:25.000, que junto com as análises químicas, possibilitaram a separação de derrames distintos. Foram elaborados também perfis, para a melhor visualização dos derrames. Os perfis na área de detalhe são transversais ao vale do Rio Pardo.

As amostras coletadas foram cuidadosamente selecionadas, sempre observando serem maciças e livres de amígdalas para não haver modificações da composição química original.

#### **4.2 ANÁLISES PETROGRÁFICAS**

Um conjunto de 21 amostras representativas dos diferentes derrames e diferentes posições geográficas foi alvo de estudos petrográficos em microscópio petrográfico de luz transmitida em seções delgadas convencionais. Foram estudadas em detalhe feições mineralógicas e texturais para procurar eventuais características distintivas dos derrames, que possam ser correlacionadas com a geoquímica. As fotomicrografias das amostras foram obtidas no Laboratório de Microscopia Petrográfica (LPM) em fotomicroscópio Zeiss Axioplan (luz transmitida/luz refletida) e fotomicroscópio Olympus BPX50, ambos com câmera Olympus C5050 acoplada.

#### **4.3 ANÁLISES QUÍMICAS**

Foram obtidas análises geoquímicas de rocha total (elementos maiores e traços) por Fluorescência de raios X (FRX) em um conjunto de 31 amostras representativas dos basaltos, escolhidas a partir de sua posição estratigráfica e da petrografia. Dentre todas as amostras, 21 foram coletadas na atividade de campo e 10 foram obtidas por trabalho anterior (Negri et al., 2008).

Todas as amostras escolhidas para análises geoquímicas foram pulverizadas no Instituto de Geociências, no Laboratório de Tratamento de amostras (LTA) do Instituto de Geociências da USP.

Primeiramente as amostras tiveram uma extração das porções alteradas, sendo posteriormente fragmentadas em porções de até 2 mm através de uma prensa hidráulica, sendo posteriormente pulverizadas, chegando a uma fração silte fino, através do moinho de ágata. Após isso as amostras foram micronizadas em um micronizador de ágata e foram feitas pastilhas do pó prensado das amostras para análise de elementos traço (7,5 g de amostras para 20% de parafina) e pastilhas fundidas (aprox. 1g de amostra e 9 partes de fundente em relação à amostra) para os elementos maiores, segundo a metodologia descrita em Mori et al. (1999).

## 5. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

### 5.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Foram encontradas dificuldades quanto a preparação de um grande volume de amostras para as análises geoquímicas, que puderam ser iniciadas somente em agosto e as análises geoquímicas e lâminas disponíveis somente em outubro, acarretando falta de tempo para um melhor detalhamento da região mais a leste da área de detalhe, como inicialmente previsto.

### 5.2 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Levantamentos Geológicos de Campo					X				
Petrografia		X	X	X			X	X	
Preparação de amostras para geoquímica						X	X	X	
Análises Geoquímicas								X	
Interpretação de dados e elaboração de relatórios		X	X	X				X	X

Tabela 1. Cronograma de atividades realizadas no período.

## 6. RESULTADOS OBTIDOS

### 6.1 MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE DETALHE

Foi realizado mapeamento de detalhe em uma área a leste da cidade de Santa Cruz do Rio Pardo de aproximadamente 60 km<sup>2</sup> (Anexo I), ao longo do vale Rio Pardo, que localmente tem direção predominante leste-oeste. A região próxima ao vale do Rio Pardo foi muito importante, pois é uma área de maior exposição de rochas, visto que a região é relativamente pobre em afloramentos.

Os derrames de basaltos estudados na região apresentam um zoneamento geral típico, identificável pela localização da zona vesiculada, que marca o topo vesicular, apresentando na base e porções intermediárias estrutura maciça.

De acordo com Nardy (1995, *apud* Nardy *et al.* 2002), esse tipo de jazimento (topo vesiculado e base maciça) para os derrames de basaltos está presente em geral naqueles de maior espessura, o que não é muito comum tendo em vista a alta taxa de efusão magmática ( $1\text{km}^2/\text{ano}$ ) e a baixa viscosidade destas lavas (de  $10$  a  $10^2$  poises), o que resulta no desenvolvimento de derrames extensos e de pouca espessura, comumente até 30 m. No entanto, segundo Negri *et al.* (2008), os derrames basálticos apresentam, independente da espessura, variações texturais internas semelhantes, sendo que na base do derrame ocorrem basaltos maciços afaníticos com deslocamento subhorizontal. As porções intermediária e central são representadas por basaltos maciços que contêm geodos de sílica de tamanho centimétrico e esparsas vesículas e/ou amígdalas. As vesículas possuem tamanhos variados entre alguns milímetros e 15-20 cm, estando na maioria das vezes preenchidas por calcedônia ou subordinadamente por calcita e clorofaeíta. As porções superiores são representadas por basaltos vesiculares a amigdaloidais, com espessuras variadas.

Foram identificados na região três diferentes derrames de basalto (Anexos I e III) que apresentaram uma zonalidade típica, com o topo marcado por uma rocha vesiculada, apresentando na base e porções intermediárias estrutura maciça. No ponto as-141 próximo ao vale, foi observada uma sequência completa de um único derrame seguramente, com base maciça e topo vesiculado, porém de pouca expressão, com aproximadamente 3 metros. Abaixo deste derrame, observou-se uma porção vesiculada com características bem marcantes. Esta porção possui cor variando do cinza ao cinza acastanhado, com uma matriz afanítica e vesículas e/ou amígdalas milimétricas a centimétricas. As amígdalas são preenchidas parcialmente ou totalmente por minerais como calcedônia, quartzo, calcita e zeólitas (Figura 5). Esta porção vesiculada se mostrou muito característica tanto alterada como fresca. Esta rocha possui um fraturamento de fácil identificação em "blocos" muito característico e foi utilizada como marcador estratigráfico, marcando as proximidades do topo do derrame (Figura 6). Para melhor compreensão dos derrames eles foram hierarquizados, sendo que esta porção vesiculada, corresponde ao topo do derrame definido como Dn.



Figura 5. Porção vesiculada do derrame Dn, com vesículas e/ou amígdalas milimétricas.



Figura 6. Ponto as-534. Porção vesicular mostrando fraturamento em blocos. Marca a topo de Dn.

Foi encontrado um bloco no ponto as-141D (Figura 7), interpretando-se ser um fragmento de um lobo de lava , isto é, uma unidade de movimentação e resfriamento independente, em que uma crosta fina praticamente sem vesículas se forma e em direção ao centro do lobo (para baixo na figura), passa a ter vesículas e /ou amígdalas cada vez maiores. Essa feição foi observada marcando o topo do derrame Dn.



Figura 7. Ponto as- 141D. Bloco mostrando a feição em lobo encontrada, marcando o topo do derrame Dn.

A porção maciça associada a esta porção vesiculada do derrame Dn foi observada nos pontos as-525 e as-87 e correspondem a um basalto de cor cinza escuro a preta, fanerítico fino, por vezes fino a médio.

Arenitos “intertrapp” observados nos pontos as-522, as-544 e as-547 foram também utilizados para a separação dos diferentes derrames. Esses arenitos aparecem de forma discreta, possuem cor marrom claro, e comumente marcam o limite do topo do derrame Dn, com a base do derrame Dn+1.

A porção maciça do derrame Dn+1 (Figura 8), é formada por uma rocha de cor cinza escura a negra, fanerítica fina, por vezes fina a média. Observa-se que nesta porção maciça ocorre algumas vezes vidro vulcânico (0,2 a 1 cm), assim como vesículas e/ou amígdalas de maior dimensão (até 5 cm). A rocha maciça apresenta por vezes um deslocamento subhorizontal, podendo-se observar também fraturas sub-verticais.



Figura 8. Porção maciça do derrame Dn+1, com presença de amígdalas centimétricas esparsas.

O topo do derrame Dn+1 não foi observado, visto que provavelmente encontra-se coberto por sedimentos do Grupo Bauru e/ou alterado.

O topo do derrame Dn-1 é marcado pela presença de peperitos que evidenciam o limite do topo Dn-1 com a base do derrame Dn (Figura 9) O basalto vesicular possuía cor cinza acastanhado, com vesículas milimétricas, possuindo contatos corrugados com o arenito. Peperito é um termo aplicado para uma rocha formada essencialmente *in situ*, em que o magma mistura-se a sedimentos inconsolidados, tipicamente úmidos (Waichel *et al.*, 2002).



Figura 9. Presença de peperitos, detalhe para os contatos corrugados do arenito com o basalto vesicular. Marca o topo do derrame Dn-1.

Observou-se em corte de estrada, no ponto as-88, um derrame com porções vesiculada e maciça, sendo provavelmente o derrame Dn-1, identificado pelo fato de estar topograficamente abaixo dos demais derrames. A porção vesiculada é formada por uma rocha de cor cinza acastanhado, possui matriz afanítica e vesículas e/ou amígdalas milimétricas (até 1 cm). A porção maciça é uma rocha de cor cinza acastanhado, fanerítica fina a média, com vesículas e/ou amígdalas milimétricas dispersas (Figura 10).



Figura 10. Porção maciça e vesiculada do derrame Dn-1. A linha marca aproximadamente o contato. Ponto as-88.

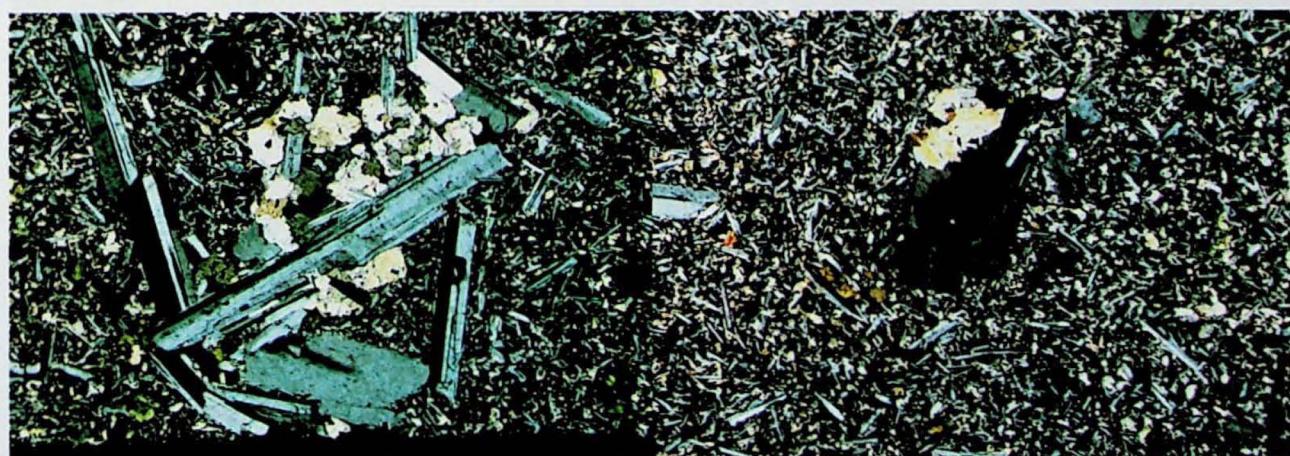
## 6.2 ANÁLISES PETROGRÁFICAS

As lâminas analisadas em microscópio petrográfico da área de detalhe são derrames basálticos que apresentam basicamente uma matriz inequigranular, fina, composta por ripas idiomórficas de plagioclásio; clinopiroxênio (augita e/ou pigeonita) em cristais xenomórficos e minerais opacos xenomórficos como cristais dispersos pela rocha, correspondendo a ilmenita e/ou magnetita. Apatita acicular ocorre como mineral acessório comumente em porções intersticiais. A textura predominante é a intergranular, em que os interstícios da rede formada por cristais ripiformes de plagioclásio são ocupados por um ou mais grãos de piroxênio. O vidro, quando presente possui cor marrom a violácea e perfaz até 5% da rocha, quase sempre intersticial. A clorofaeíta aparece praticamente em todas as lâminas, alterando o vidro e aparentemente minerais como o piroxênio. Entretanto, diferenças

significativas ocorrem no tamanho dos grãos da matriz, nos fenocristais e até mesmo nos minerais de alteração e seu modo de ocorrência.

Para o trabalho foi realizada uma classificação das lâminas disponíveis utilizando como base principal o tamanho dos grãos de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos da matriz. Os três grupos assim definidos (de matriz muito fina, fina e fina a média) foram divididos em subgrupos (cf. Tabela 2) com base em critérios como a presença de vidro intersticial e seu estado de alteração, podendo ocorrer também alteração dos cristais. A forma, tamanho, freqüência dos fenocristais e eventuais agregados de fenocristais, e a identificação de zoneamento nos fenocristais também foram considerados. Cada um desses grupos não indica necessariamente um único derrame, podendo representar apenas uma porção de um mesmo derrame sendo, por exemplo, uma matriz mais grossa uma porção intermediária, ou uma matriz muito fina uma porção superior ou inferior do derrame. Também não indicam diferentes derrames pelo fato de apresentarem matrizes ou grupos diferentes. Os grupos separados pela matriz são apresentados a seguir:

**BASALTOS DE MATRIZ MUITO FINA** (Grupo I) - apresentam ripas de plagioclásio idiomórficas (42%) de tamanho variando entre 0,06 e 0,2 x 0,01 e 0,05 mm, piroxênios xenomórficos (augita e/ou pigeonita) (40%) variando entre 0,01 e 0,06 mm, e minerais opacos xenomórficos (8%) de 0,02 a 0,05 mm, dispersos pela rocha. Vidro intersticial ocorre na maioria das vezes alterado por minerais de alteração (6%) (clorofaeíta principalmente), com pouca ocorrência de vidro preservado. Observam-se fenocristais de plagioclásio idiomórficos e piroxênios xenomórficos (4%) de tamanho variando entre 1 e 2,5 mm, com presença de aglomerados de fenocristais de plagioclásio e piroxênio definindo textura glomeroporfirítica (Figuras 11a e 12a), apresentando zoneamento principalmente nos plagioclásios (Figura 11b). Nota-se a presença de esparsas amígdalas preenchidas por materiais de alteração principalmente.

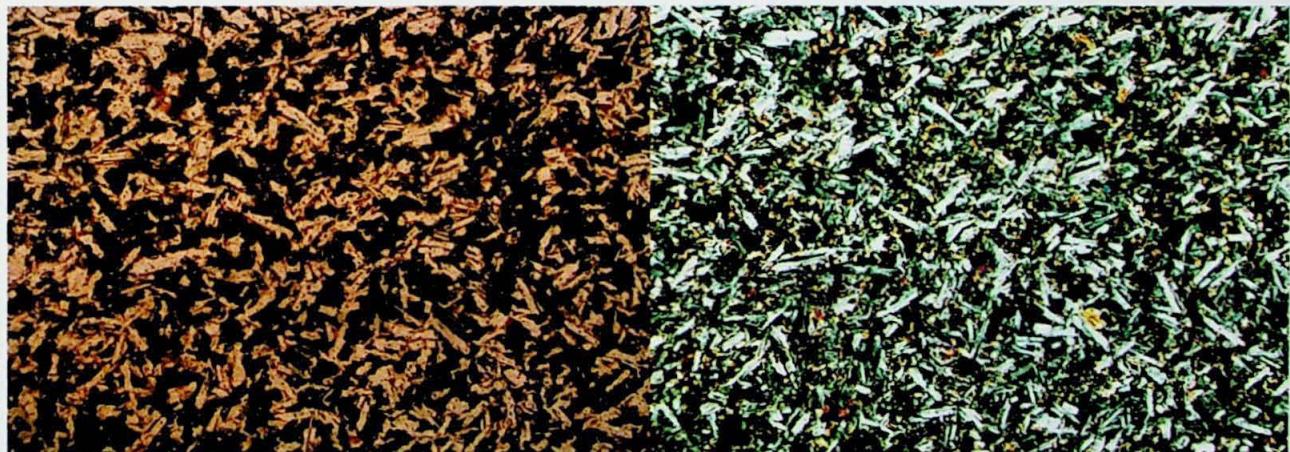


Figuras 11a e 11b. GRUPO I. (lâmina as-552) a) Aglomerado de fenocristais de plagioclásio e piroxênio, em matriz muito fina. Lado maior da imagem 3,25 mm. Nicóis cruzados. b) Fenocristais de plagioclásio e de piroxênio. Detalhe para o zoneamento mineral bem evidente. Lado maior da imagem 3,25 mm. Nicóis cruzados.



Figuras 12a e 12b. GRUPO I. (lâmina as-141C) Aglomerado de fenocristais de plagioclásio bem formados, destacados na matriz. Nicóis cruzados. b) (lâmina as-552) Aspecto geral do grupo, matriz muito fina. Nicóis paralelos. Ambas as imagens lado maior 3,25 mm.

BASALTOS DE MATRIZ MUITO FINA (Grupo II) - apresentam matriz ligeiramente mais grossa que o Grupo I, com plagioclásio variando entre 0,08 e 0,2 x 0,02 e 0,05 mm e piroxênios (augita e/ou pigeonita) de tamanho entre 0,02 e 0,06 mm e minerais opacos de 0,02 a 0,06 mm (Figuras 13a e 13b). Apresentam do mesmo modo que o primeiro grupo pouco vidro intersticial e preservado. Possuem menos fenocristais e agregados de fenocristais (<1%) em comparação ao primeiro grupo, apresentando igualmente zoneamento nos plagioclásios.



Figuras 13a e 13b. GRUPO II. (lâmina as-546) a) Observa-se matriz ligeiramente mais grossa do que o Grupo 1. Lado maior das imagens 3,25 mm. Nicóis paralelos. b) Nicóis cruzados.

Os basaltos de matriz fina apresentam grupos que se diferenciam principalmente onde a alteração é mais abundante.

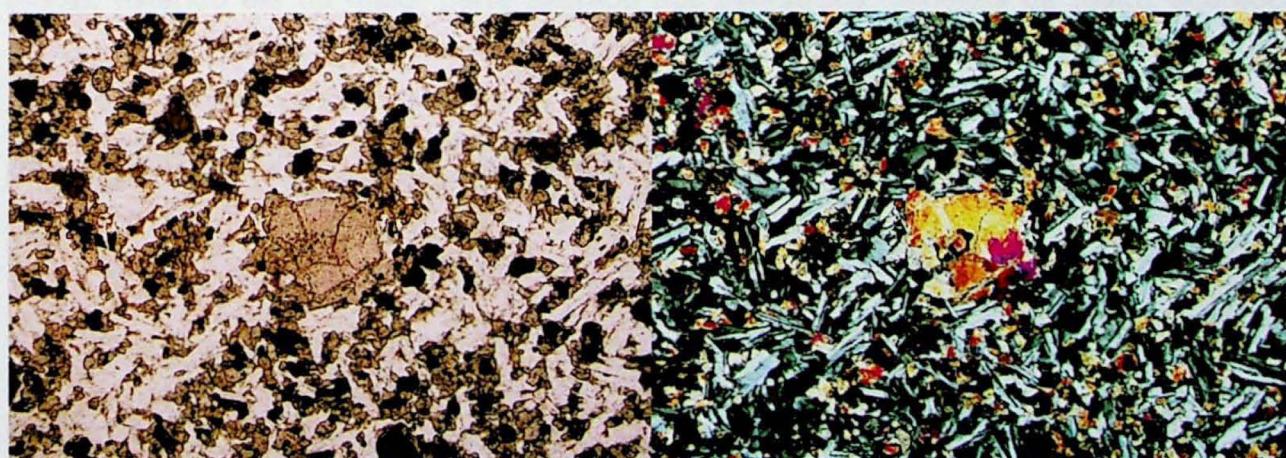
BASALTOS DE MATRIZ FINA (Grupo I) - O grupo apresenta matriz com ripas idiomórficas de plagioclásio de tamanho 0,1 - 0,2 mm x 0,02 - 0,05 mm (45%), piroxênios xenomórficos de 0,05 a 0,1 mm (35%), minerais opacos xenomórficos com tamanho entre 0,05 e 0,1 mm, representados por ilmenita e/ou magnetita (8%). Essas rochas apresentam vidro intersticial preservado em pequena quantidade, estando na maior parte alterado por clorofaeíta de cor

verde e parda (que também altera cristais da matriz e fenocristais). O vidro e seus produtos de alteração representam até 12% do total, caracterizando textura intersertal (Figuras 14a e 14b). Apresenta poucos fenocristais e poucos aglomerados deles também (<1%). Não foi observado zoneamento composicional nos fenocristais.



Figuras 14a e 14b. GRUPO I. (lâmina as-85) a) Interstícios alterados relativamente abundantes em comparação aos outros grupos. b) (lâmina as-539) Detalhe para o mineral de alteração verde, provável clorofaeita. Ambas as fotos nicóis paralelos. Lado maior das imagens 3,25 mm.

BASALTOS DE MATRIZ FINA (Grupo II) - é representado por rochas que possuem ripas idiomórficas de plagioclásio de tamanho 0,1 - 0,3 x 0,02 - 0,06 mm (45%), piroxênios de 0,05 a 0,15 mm (35%) e minerais opacos de 0,05 a 0,1 mm (10%). Ocorrem vidro e material de alteração, ambos intersticiais, sendo a alteração mais abundante na forma de pseudomorfos que lembram cristais de piroxênio e plagioclásio (10%). Fenocristais de piroxênio xenomórficos e plagioclásio idiomórficos de tamanho entre 0,8 - 1,5 mm, podendo ocorrer agregados de fenocristais, porém em pequena quantidade (<1%). Zoneamento mineral não foi observado.



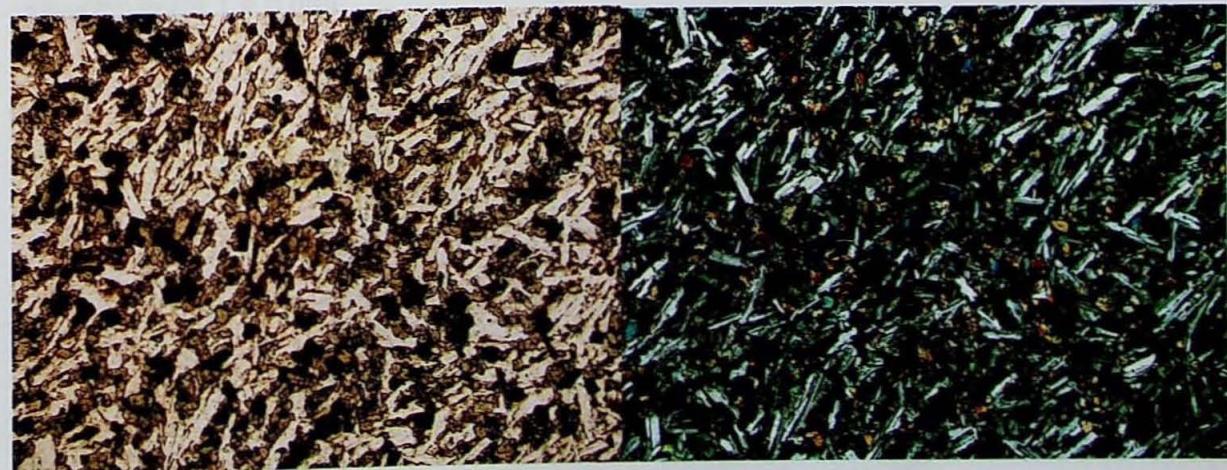
Figuras 15a e 15b. GRUPO II. (lâmina as-133) a) Ocorre alteração intersticial, no entanto nos cristais de piroxênio e plagioclásio é mais abundante. Fenocristal de piroxênio no centro da foto. Nicóis paralelos. b) Nicóis cruzados. Lado maior das imagens 3,25 mm.

**BASALTOS DE MATRIZ FINA** (Grupo 3) – apresenta rochas que apresentam matriz muito semelhante aos outros grupos. As ripas idiomórficas de plagioclásio têm  $0,1 - 0,25 \times 0,03 - 0,05$  mm (45%), piroxênios xenomórficos de 0,05 a 0,1 mm (35%) e minerais opacos xenomórficos de 0,05 a 0,1 mm (10%). Há vidro róseo intersticial (2%) preservado (Figuras 16a e 16b), que junto com as alterações dos cristais e intersticiais perfazem até 10% da rocha. Possuem poucos fenocristais de plagioclásio e piroxênio de tamanho entre 0,08 e 1,5 mm, assim como aglomerados dos mesmos (<1%). Não foi observado zoneamento mineral nos fenocristais.



Figuras 16a e 16b. GRUPO III. (lâmina as-521) Presença de vidro róseo preservado nos interstícios. Ambas as fotos nicóis paralelos e lado maior das imagens 1,3 mm.

**BASALTOS DE MATRIZ FINA** (Grupo IV) - Um quarto grupo é representado por rochas que apresentam nítida estrutura de fluxo magmático (Figuras 17a e 17b), apresentando matriz contendo plagioclásios idiomórficos de tamanho  $0,2 - 0,3 \times 0,03 - 0,08$  mm (45%), piroxênios xenomórficos de 0,05 a 0,15 mm (35%) e minerais opacos também xenomórficos de 0,05 a 0,1 mm (10%). Essas rochas têm pouco vidro intersticial preservado (<1%), estando ele na maior parte alterado nos interstícios. Minerais da matriz alterados perfazem até 10% da rocha. Fenocristais de plagioclásio idiomórficos de  $1 - 1,5 \times 0,03 - 0,05$  mm e de piroxênio xenomórficos de 0,7 a 1 mm ocorrem, mas não perfazem 1 % da rocha.



Figuras 17a e 17b. GRUPO IV. (lâmina as-83) a) Aspecto geral da rocha, com detalhe para a orientação das ripas de plagioclásio (fluxo NW-SE). Nicóis paralelos. b) Nicóis cruzados. Ambas as imagens lado maior 3,5 mm.

**BASALTOS DE MATRIZ MÉDIA** (Grupo I) - Basaltos de matriz média ocorrem e têm cristais de plagioclásios idiomórficos de tamanho 0,6- 1,2 x 0,3 – 0,6 mm (43%), piroxênios xenomórficos de 0,5 a 1 mm (35%) e minerais opacos de 0,1 a 0,5 mm (8%). Ocorre significativa quantidade de alteração dos cristais de cor parda que aparentemente alteram cristais de plagioclásio e piroxênio em maior quantidade e em menor quantidade o vidro intersticial, que somam 10% da rocha. Vidro preservado corresponde a <1% do total. Fenocristais nessa rocha são abundantes, correspondendo a piroxênios xenomórficos e plagioclásios idiomórficos de tamanho entre 1,5 – 2,5 mm (4%). Textura glomeroporfírica aparece bem desenvolvida com agregados de plagioclásio e piroxênio. Zoneamento mineral aparece em muitos fenocristais.



Figuras 18a e 18b. (lâmina as- 525) Textura glomeroporfírica bem evidente nas duas imagens, com matriz bem desenvolvida. Lado maior das imagens 3,25 mm. Ambas as imagens nicóis cruzados.

Um grupo distinto dos demais é observado em que abundantes vesículas e/ou amígdalas perfazem até 25% da rocha. Essa rocha apresenta matriz muito fina composta por plagioclásio e piroxênio e material de alteração, sendo difícil a sua separação em porcentagens já que a rocha apresenta elevado grau de alteração. As amígdalas têm tamanho entre 1 e 5 mm.

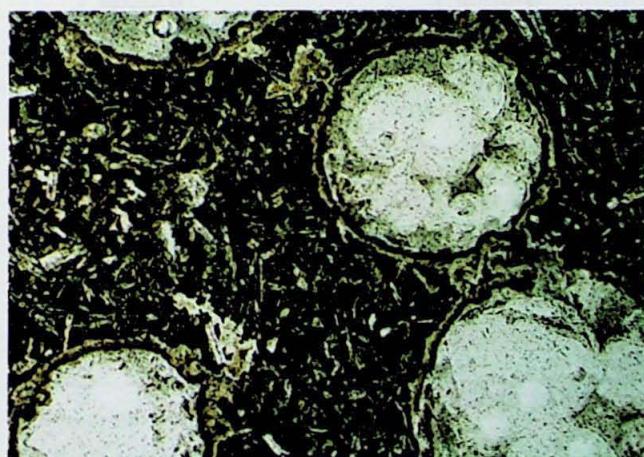


Figura 19. (lâmina as-83C) Matriz muito fina e vesículas em destaque. Polarizadores cruzados. Lado maior da imagem 2,6 mm.

A tabela 2 sintetiza as principais características dos grupos que foram separados, com a sua principal característica destacada em negrito. A tabela 3 apresenta as respectivas lâminas correspondentes aos grupos classificados.

	<b>Grupo I</b>	<b>Grupo II</b>
MATRIZ MUITO FINA	plag 0,06-0,1x0,01-0,05 mm px 0,01-0,06 mm opacos 0,02-0,05 mm pouco vidro intersticial possui fenocristais e textura <b>glomeroporfirítica (4%)</b> possui zoneamento mineral	plag 0,08- 0,1x0,01-0,05 mm Px 0,02-0,06 mm opacos 0,02-0,06 mm pouco vidro intersticial possui fenocristais e textura <b>glomeroporfirítica (&lt;1%)</b> possui zoneamento mineral

	<b>Grupo I</b>	<b>Grupo II</b>
MATRIZ FINA	plag 0,1-0,2x0,02-0,05 mm px 0,05-0,1 mm opacos 0,05-0,01 mm <b>muita alteração intersticial</b> poucos fenocristais (<1%) sem zoneamento mineral	plag 0,1-0,2x0,02-0,05 mm Px 0,05-0,15 mm opacos 0,05-0,1 mm <b>alteração dos cristais</b> possui fenocristais e textura <b>glomeroporfirítica (&lt;1%)</b> sem zoneamento mineral

	<b>Grupo III</b>	<b>Grupo IV</b>
MATRIZ FINA	plag 0,1-0,2x0,02-0,05 mm px 0,05-0,1 mm opacos 0,05-0,1 mm <b>vidro preservado</b> possui fenocristais e textura glomeroporfirítica (<1%) sem zoneamento mineral	plag 0,2-0,3x0,05-0,1 mm Px 0,05-0,15 mm opacos 0,05-0,1 mm <b>Estrutura de fluxo magmático</b> possui fenocristais e textura glomeroporfirítica (<1%) sem zoneamento mineral

	<b>Grupo I</b>
MATRIZ MÉDIA	plag 1-2x0,5-1 mm
	px 0,6-1 mm
	opacos 0,6-1 mm
	possui fenocristais e textura
	<b>glomeroporfirítica (4%)</b>
	possui zoneamento mineral

Tabela 2. Síntese das principais características dos grupos classificados.

	<b>Grupo I</b>	<b>Grupo II</b>	<b>Grupo III</b>	<b>Grupo IV</b>
MATRIZ MUITO FINA	as-552 (Dn) as-141C (Dn)	as-546 (Dn) as-84 (Dn)		
MATRIZ FINA	as-143 (Dn+1) as-85A(Dn+1)	as-528(Dn+1) as-130 (Dn)	as-529B(Dn+1) as-521 (Dn+1)	as-83 (Dn) as-87B (Dn)
	as-142 (Dn+1) as-539 (Dn+1)	as-133 (Dn)		as-550 (Dn)
MATRIZ MÉDIA	as-551 (Dn) as-525 (Dn)			

Tabela 3. Lâminas correspondentes aos grupos classificados.

Algumas observações podem ser feitas a respeito dos grupos petrográficos citados acima. As amostras representantes do derrame Dn apresentam os aglomerados de fenocristais mais abundantes e desenvolvidos (4%). O derrame Dn pode apresentar também poucos fenocristais (<1%) enquanto o derrame Dn+1 só apresenta poucos fenocristais e aglomerados. Amostras com matriz muito fina e de matriz média ocorrem somente no derrame Dn. As amostras que possuem consideráveis interstícios alterados, separadas como rochas de matriz fina pertencentes ao Grupo I, ocorrem na maior parte nas lâminas que pertencem ao derrame considerado como Dn+1, assim como naquelas que possuem vidro intersticial preservado, separadas como rochas de matriz fina pertencentes ao Grupo 3, o que é normal de se esperar, pois o derrame Dn+1 possui mais vidro, e a chance dele ficar preservado é maior. Essas diferenças podem indicar que o derrame Dn+1, que possui mais vidro intersticial é, portanto, um derrame que sofreu uma cristalização mais rápida em comparação ao derrame Dn. Por outro lado, Dn é o único derrame que apresenta matriz muito fina, característica igualmente atribuída a resfriamento rápido.

As amostras do derrame Dn são as únicas que apresentam textura glomeroporfírica, com as maiores porcentagens. Essa característica pode ser interpretada como sendo uma condição de cristalização diferente nos dois derrames, do mesmo modo que pode refletir contrastes na composição dos magmas geradores dos derrames Dn e Dn+1.

O conjunto de características que cada derrame apresenta pode ser decorrente de diferenças que os mesmos apresentam em termos compostacionais e de cristalização, como podem também refletir porções dos derrames, sendo as amostras com matriz mais grossa porções intermediárias e central do derrame e matrizes mais finas, porções de topo e base do derrame.

## 6.3 GEOQUÍMICA

### 6.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS E TIPOLOGIA

As amostras da área de detalhe foram analisadas e com seus valores obtidos por Fluorescência de Raios X, foram construídos diagramas com o intuito de caracterizá-las. Todas as análises químicas foram lançadas no diagrama de classificação sílica vs. álcalis (TAS) de Le Bas *et al.* (1986). Como pode ser observado na Figura 20, os resultados se situam no campo das rochas básicas, se tratando de basaltos subalcalinos/toleíticos.

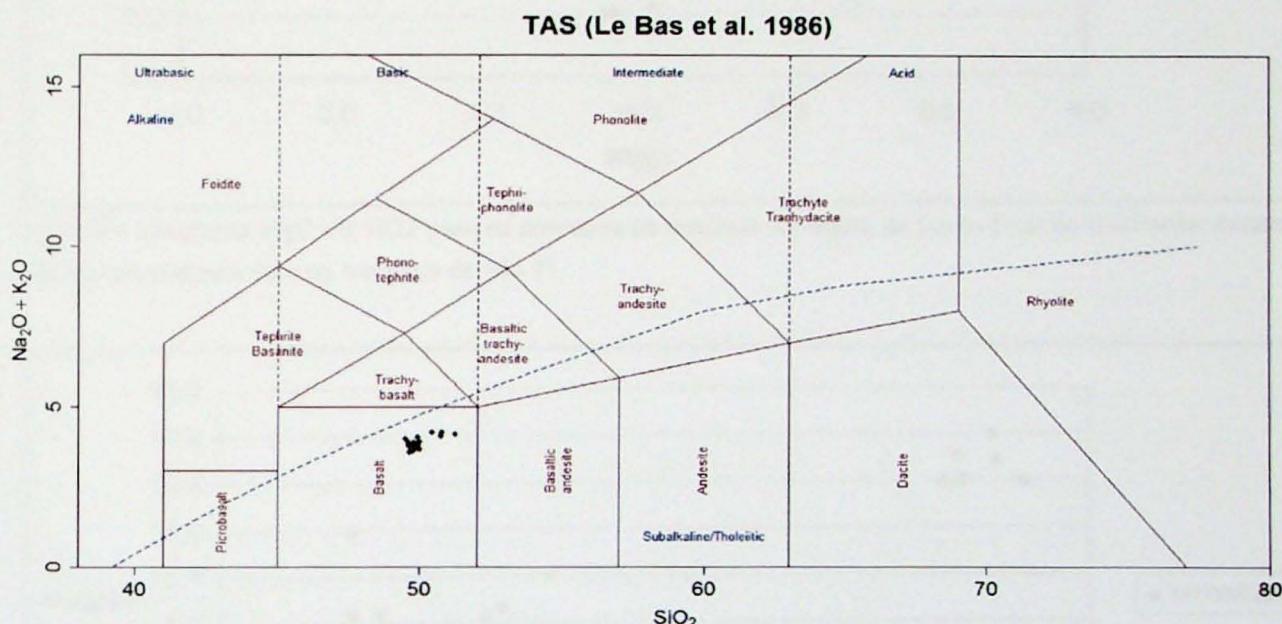


Figura 20. Diagrama TAS de Le Bas *et al.* (1986) para nomenclatura das rochas vulcânicas da área de estudo.

As amostras processadas possuem baixo conteúdo em  $\text{MgO}$ , com valores entre 4,4 e 5,4% e possuem também baixo conteúdo de elementos incompatíveis, com valores de Ni inferiores a 100 ppm (entre 26 e 72 ppm). Segundo Peate (1997), essas características indicam que o magma passou por uma extensiva cristalização fracionada, provavelmente em complexos de sills perto da base da crosta. Os “trends” dos elementos maiores dentro de cada magma tipo são controlados principalmente pela cristalização fracionada de uma extração de cristais predominantemente gabróides (olivina + clinopiroxênio + plagioclásio  $\pm$  óxidos de Fe-Ti (Peate 1990 *apud* Peate 1997).

As amostras analisadas possuem teores de Titânio entre 3 e 4%, valores compatíveis com os basaltos de alto Ti, segundo critérios propostos por Peate (1997). Observa-se que dentre os magmas do tipo alto Ti (Ribeira, Paranapanema, Pitanga e Urubici), as amostras possuem valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_5$  superiores a 14%, podendo representar magmas tipo Pitanga ou Urubici, apresentando maior afinidade com os basaltos do tipo

Pitanga do que com os do tipo Urubici, como se observa nas figuras 21 e 22 (comparar com Figura 2).

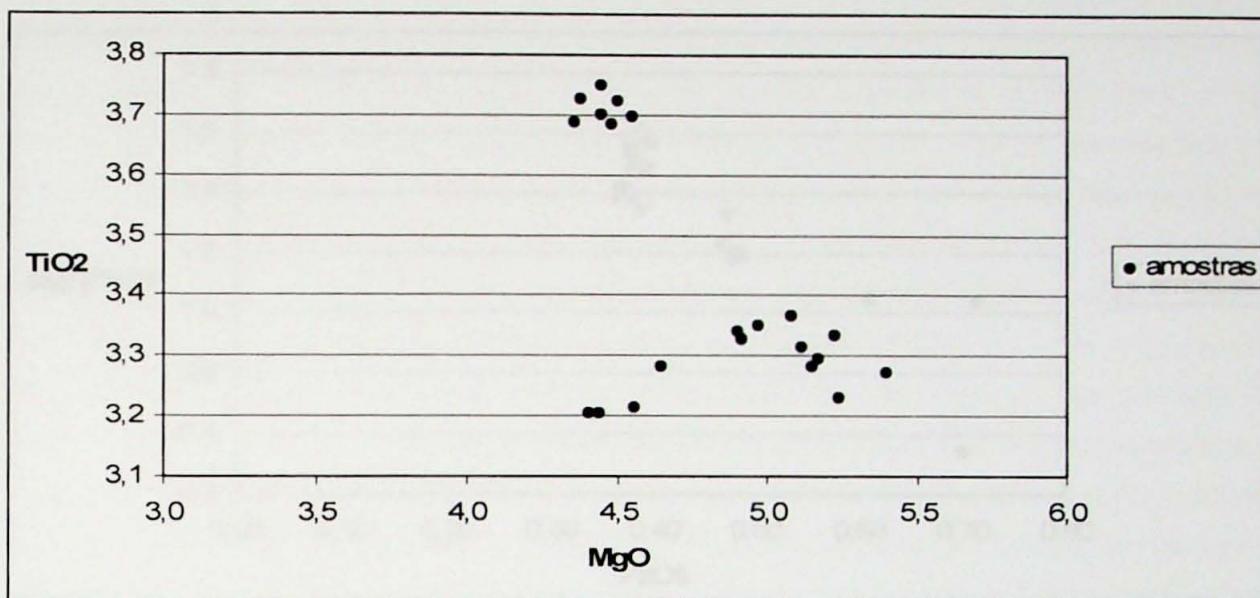


Figura 21. Diagrama MgO VS TiO<sub>2</sub> para as amostras de basaltos na região de Santa Cruz do Rio Pardo, mostrando valores compatíveis com os magmas de alto Ti.

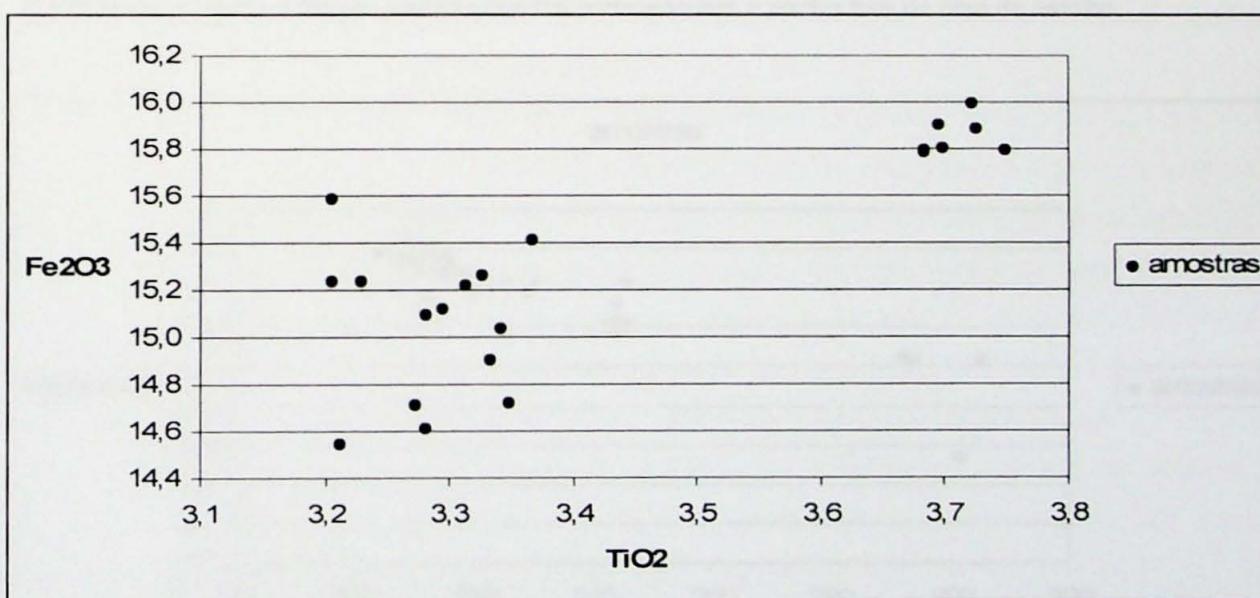


Figura 22. Diagrama TiO<sub>2</sub> VS Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para as amostras de basaltos na região de Santa Cruz do Rio Pardo, característico de magmas tipo Pitanga.

### 6.3.2 ESTRATIGRAFIA QUÍMICA

Para testar o uso da geoquímica como ferramenta estratigráfica foram construídos diagramas de variação que utilizam MgO/TiO<sub>2</sub> como índice de diferenciação dos basaltos.

As variações de  $P_2O_5$  e de Zr, mostram descontinuidades que tornaram possível a separação das amostras em três grupos.

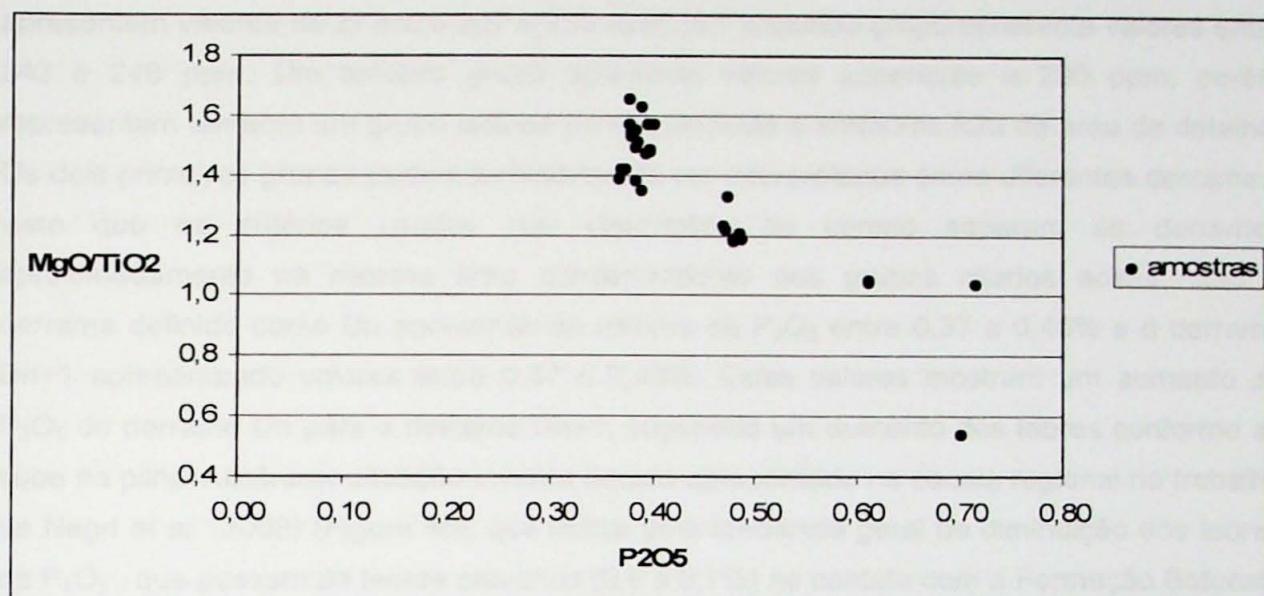


Figura 23. Diagrama MgO/TiO<sub>2</sub> vs P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Valores entre 0,37 e 0,40 (Derrame Dn), valores entre 0,47 e 0,49 (derrame Dn+1) e valores maiores que 0,6 correspondem a pontos fora da área de detalhe.

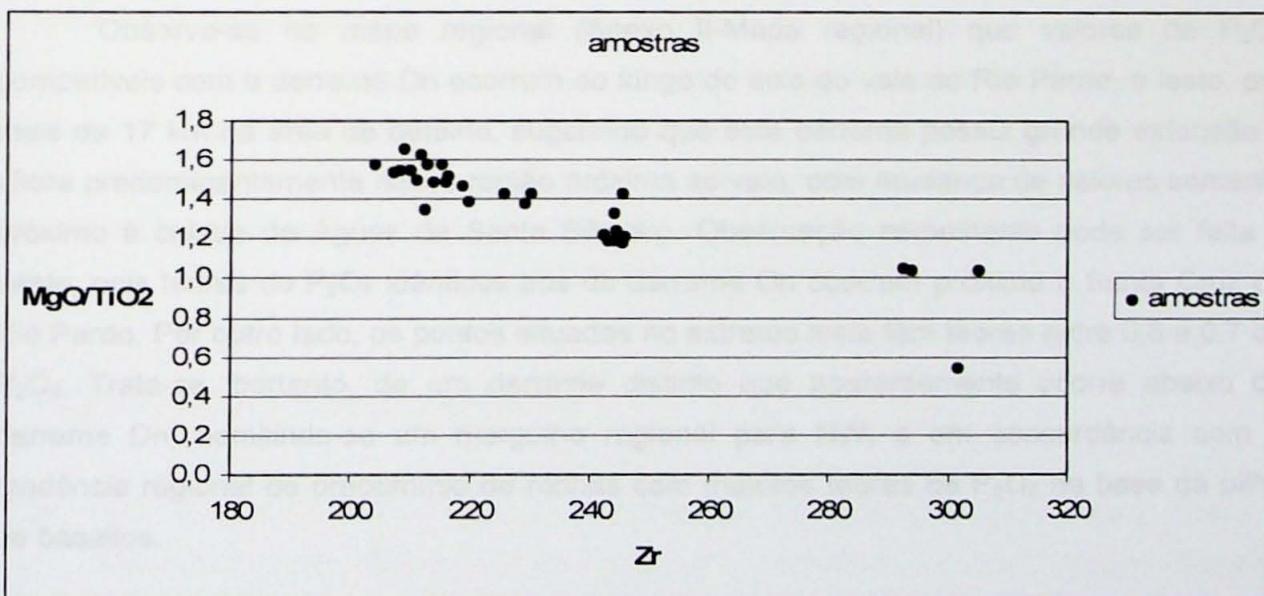


Figura 24. Diagrama MgO/TiO<sub>2</sub> vs Zr. Valores entre 207 e 230 ppm correspondem ao derrame Dn, valores entre 243 e 246 ppm correspondem ao derrame Dn+1 e valores acima de 290 ppm correspondem a pontos fora da área de detalhe.

Observa-se no diagrama MgO/TiO<sub>2</sub> vs P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 23), que podem ser separados claramente dois grupos distintos, um deles com valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> entre 0,37 e 0,40% e outro com valores mais elevados (0,47 a 0,49%) de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Um terceiro grupo apresenta valores superiores a 0,6% porém corresponde a amostras coletadas fora da área de detalhe. No

diagrama MgO/TiO<sub>2</sub> vs Zr (Figura 24) uma descontinuidade foi também observada, tornando possível igualmente a separação de três grupos. Verificou-se que nos dois casos os grupos criados apresentavam as mesmas amostras presentes. As amostras do primeiro grupo apresentam valores de Zr entre 207 e 230 ppm, já o segundo grupo apresenta valores entre 243 e 246 ppm. Um terceiro grupo apresenta valores superiores a 290 ppm, porém representam também um grupo isolado correspondente a amostras fora da área de detalhe. Os dois primeiros grupos podem perfeitamente ser interpretados como diferentes derrames, visto que os critérios usados nas descrições de campo separam os derrames aproximadamente na mesma área correspondente aos grupos citados acima, com o derrame definido como Dn apresentando valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> entre 0,37 e 0,40% e o derrame Dn+1 apresentando valores entre 0,47 e 0,49%. Estes valores mostram um aumento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do derrame Dn para o derrame Dn+1, sugerindo um aumento dos teores conforme se sobe na pilha vulcânica, situação inversa àquela apresentada na escala regional no trabalho de Negri *et al.* (2008) (Figura 4b), que indica uma tendência geral de diminuição dos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que passam de teores elevados (0,6 a 0,7%) no contato com a Formação Botucatu ou os derrames ácidos iniciais até valores baixos (~0,25%) na região de Assis (SP), cerca de 100 km a oeste, onde os magmas são correlacionados ao tipo Paranapanema. Deste modo, a estratigrafia identificada na área de detalhe mostra que localmente ocorrem inversões dessa tendência regional observada.

Observa-se no mapa regional (Anexo II-Mapa regional) que valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> compatíveis com o derrame Dn ocorrem ao longo do eixo do vale do Rio Pardo, a leste, por mais de 17 km da área de detalhe, sugerindo que este derrame possui grande extensão e aflora predominantemente nessa região próxima ao vale, com mudança de valores somente próximo à cidade de Águas de Santa Bárbara. Observação semelhante pode ser feita a oeste, pois teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> idênticos aos do derrame Dn ocorrem próximo a Santa Cruz do Rio Pardo. Por outro lado, os pontos situados no extremo leste têm teores entre 0,6 e 0,7 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Trata-se, portanto, de um derrame distinto que aparentemente ocorre abaixo do derrame Dn, admitindo-se um mergulho regional para NW, e em concordância com a tendência regional de predomínio de rochas com maiores teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na base da pilha de basaltos.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as descrições de campo, com as análises petrográficas e geoquímicas, possibilitaram algumas considerações:

- Em campo, os afloramentos dos derrames basálticos na área de detalhe selecionada são em grande parte descontínuos, o que dificulta sua delimitação em mapa, no entanto

ferramentas estratigráficas foram utilizadas e puderam ser separados três derrames distintos.

- Petrograficamente, as amostras mostram diferenças nas feições texturais e mineralógicas, possibilitando o agrupamento delas segundo critérios propostos. Estes diferentes grupos podem corresponder a diferentes derrames (por exemplo, a textura glomeroporfíritica bem desenvolvida, característica do derrame Dn) e também a diferentes posições de um mesmo derrame (por exemplo, núcleos de derrame com textura fina a média e bordas com textura muito fina).

- Nas análises geoquímicas, para fins de correlação estratigráfica, verificou-se que os melhores indicadores foram os teores de  $P_2O_5$  e de Zr que possibilitaram a separação de dois derrames, um de menores valores de  $P_2O_5$  (0,37 a 0,40) e de Zr (207 a 230) estratigráficamente abaixo de outro derrame de maiores valores (0,47 a 0,49 e 243 e 246), situação inversa da observada regionalmente. Essa clara correlação entre os derrames identificados na geoquímica ocorre de modo independente da evidenciada nos levantamentos de campo.

- As descrições petrográficas e as análises geoquímicas feitas na área de detalhe evidenciaram relação com as amostras fora da área de detalhe, sendo que composições químicas semelhantes às do derrame Dn foram observadas a mais de 15 km a leste da área de detalhe, sugerindo sua continuidade por esta extensão ao longo do vale do Rio Pardo. Estas observações não garantem se tratar de um mesmo derrame por toda essa área, necessitando de um levantamento de campo regional para se definir tal relação.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COX, K.G. & HAWKESWORTH, C.J. Geochemical Stratigraphy of the Deccan Traps at Mahabaleshwar, Western Ghats, Índia, with Implications for Open System Magmatic Process. *Journal of Petrology*, 26, 355-377.

JANASI, V. A.; NEGRI, F. A.; MONTANHEIRO, T. J.; Freitas, V. A.; Rocha, B. C. & Reis, P. M. 2007. Geochemistry of the eocretacic basalt magmatism in the Piraju-Ourinhos region, SE Brazil, and implication to the stratigraphy of the Serra Geral Formation. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 37(1), 148-162.

- LE BAS, M. J.; LE MAITRE, R. W.; STRECKEISEN, A.; ZANNETIN, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.
- MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R. & OLIVEIRA, M. A. F. 2007. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da bacia do Paraná no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências* volume 37(1): 64-80.
- MANGAN, M. T.; WRIGHT, T. L.; SWANSON, D.A.& BYERLY, G. R. 1986. Regional correlation of the Grande Ronde Flows, Columbia River Basalt Group, Washington, Oregon and Idaho. *Geological Society of America Bulletin*, 97: 1300-1318.
- MORI, P. E.; REEVES, S.; CORREIA, C.T.; HAUKKA, M. 1999. Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 29: 441-446.
- 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. São Paulo, UNESP, Geociências, v.21 n. 1/2. P. 15-32.
- NEGRI, F. A.; MONTANHEIRO, T. J.; JANASI, V. A.; REIS, P.M. 2006. Mapa de distribuição das rochas vulcânicas nas Folhas Piraju/SP e Jacarezinho SP/PR, XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. *Anais*. Sociedade Brasileira de Geologia, Aracaju, SE. pp 247.
- NEGRI, F. A.; JANASI, V. A.; MONTANHEIRO, T. J. 2008. Derrames basálticos da Formação Serra Geral na Região entre Piraju e Assis (SP): O uso da geoquímica como ferramenta estratigráfica. IV SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS.
- PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): Classification of Magmas Types and their Spatial Distribution. *Bulletin of Vulcanology*, 55: 119-139.
- PEATE, D. W., 1997. The Paraná-Etendeka Province. In: J.J. Mahoney & M. F. Coffin (eds): Large Igneous Provinces. *Geophysical Monograph* 100, AGU, pp 217-245.

STEWART, K.; TURNER S.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; KIRSTEIN L.; MANTOVANI, M. 1996. 3-D,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters* 143. 95-109.

WAICHEL, B. L.; SCHERER, C. M.; FRANK, H. T. 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 (2008) 59–72.

#### ANEXO 1 – MAPAS DA ÁREA DE DETALHAMENTO

Mapa Geológico - Área de Detalhe

Legenda

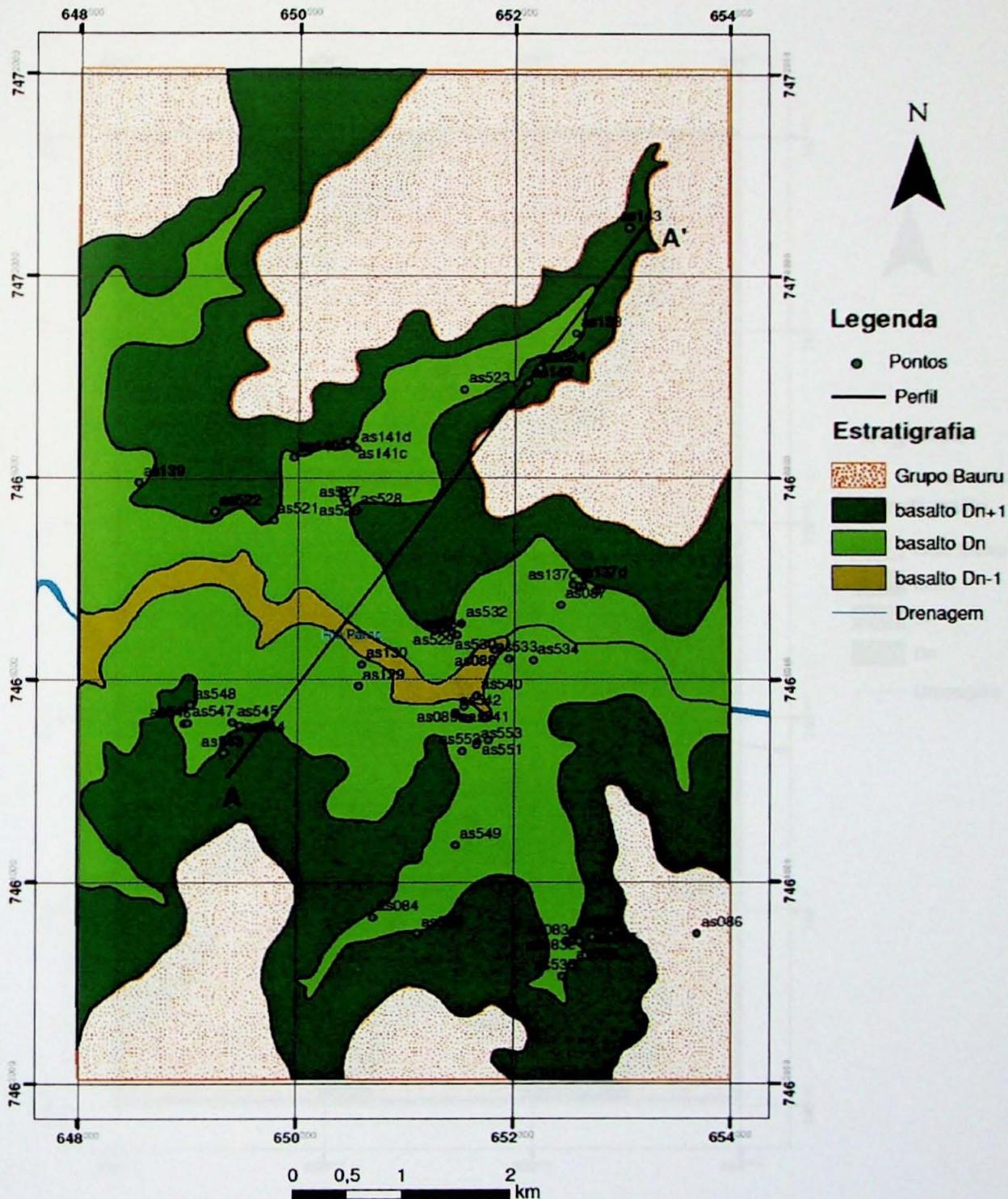
Área de Detalhe

Área de Estudo

Geotipos

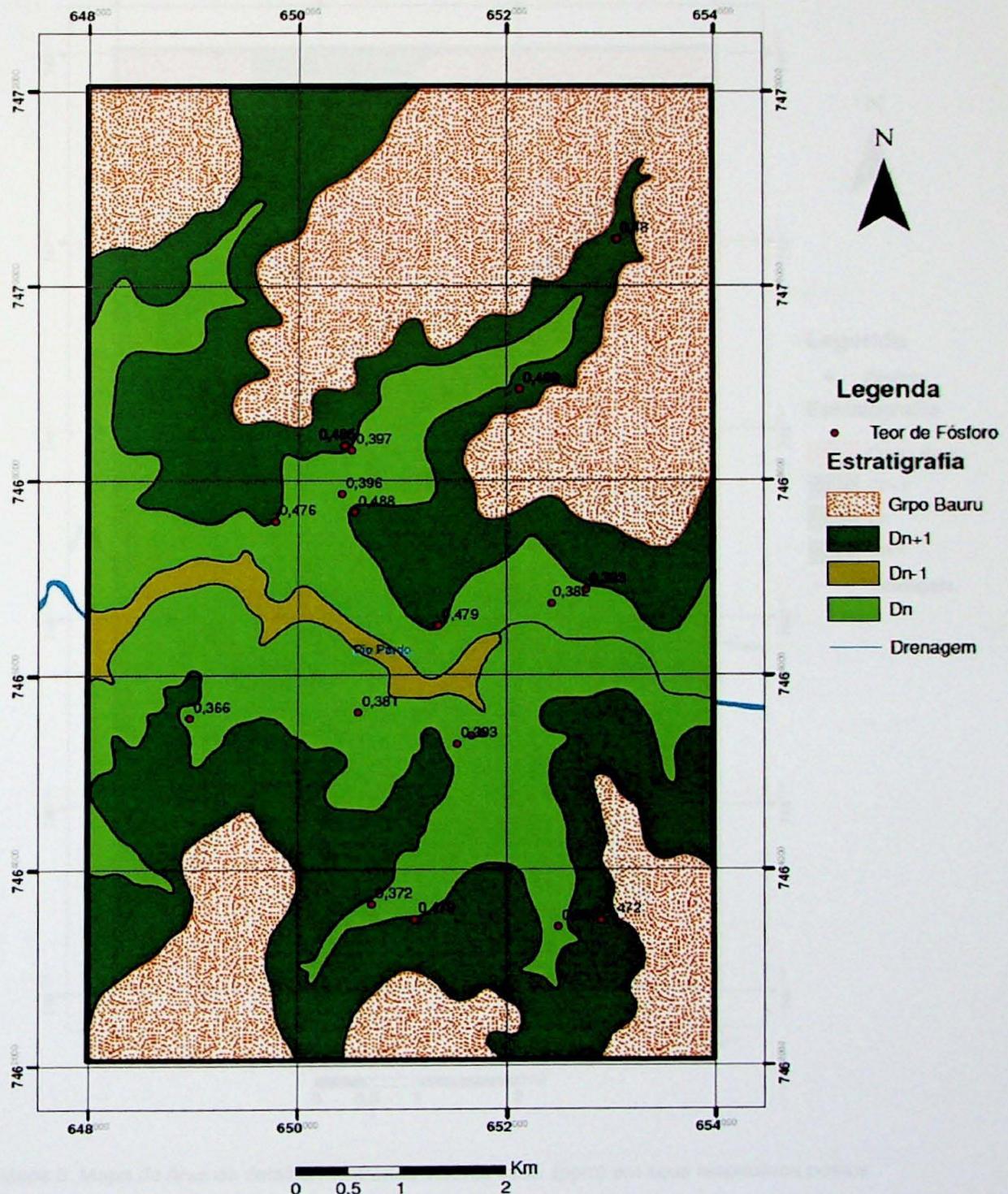
## ANEXO I – MAPAS DA ÁREA DE DETALHE

## **Mapa Geológico - Área de detalhe**



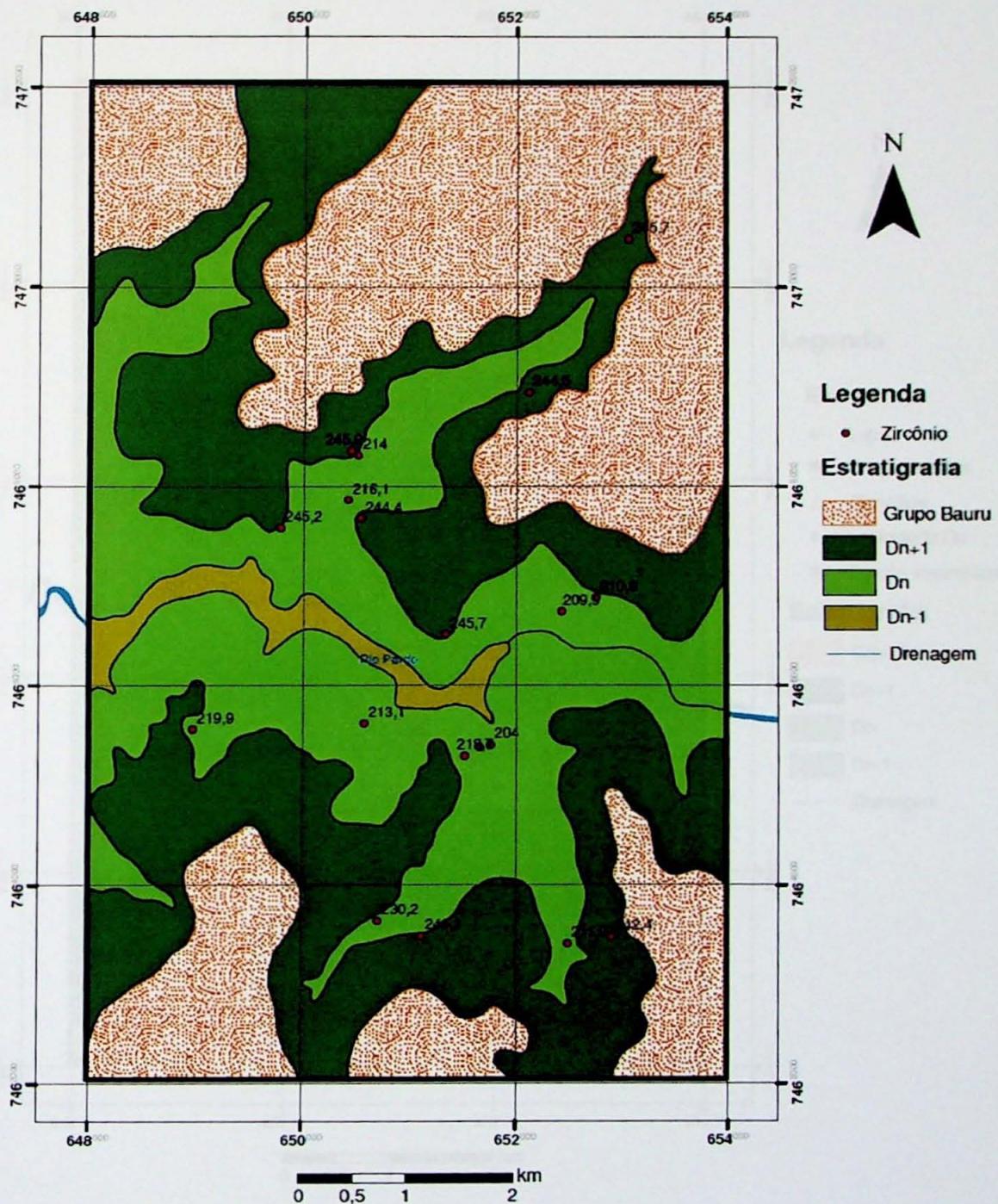
Mapa 1. Mapa Geológico da área de detalhe, mostrando os derrame identificados e o corte do perfil.

## Área de detalhe - Fósforo



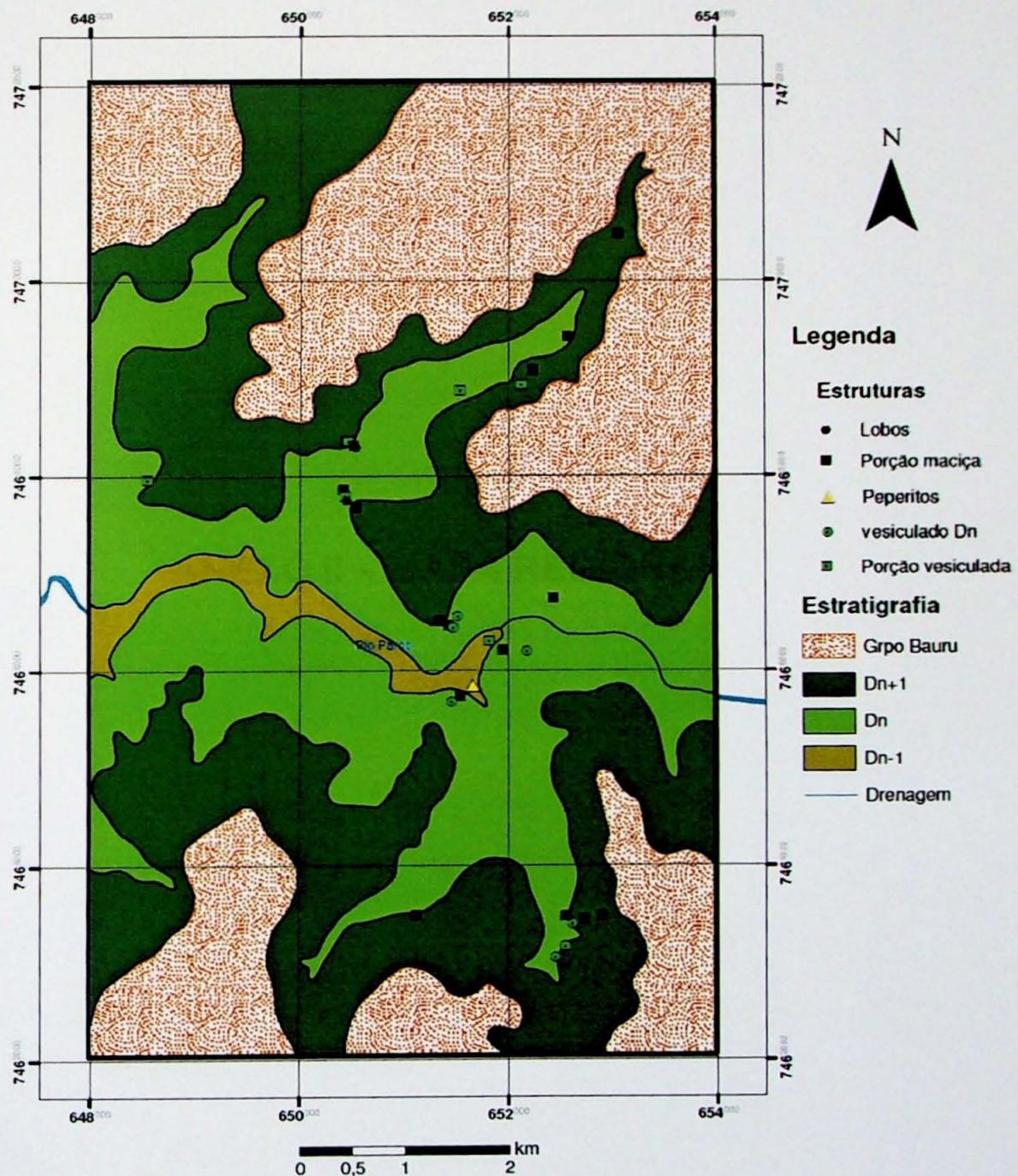
Mapa 2. Mapa da área de detalhe, com valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (% em peso) nos respectivos pontos.

## **Área de detalhe - Zircônio**



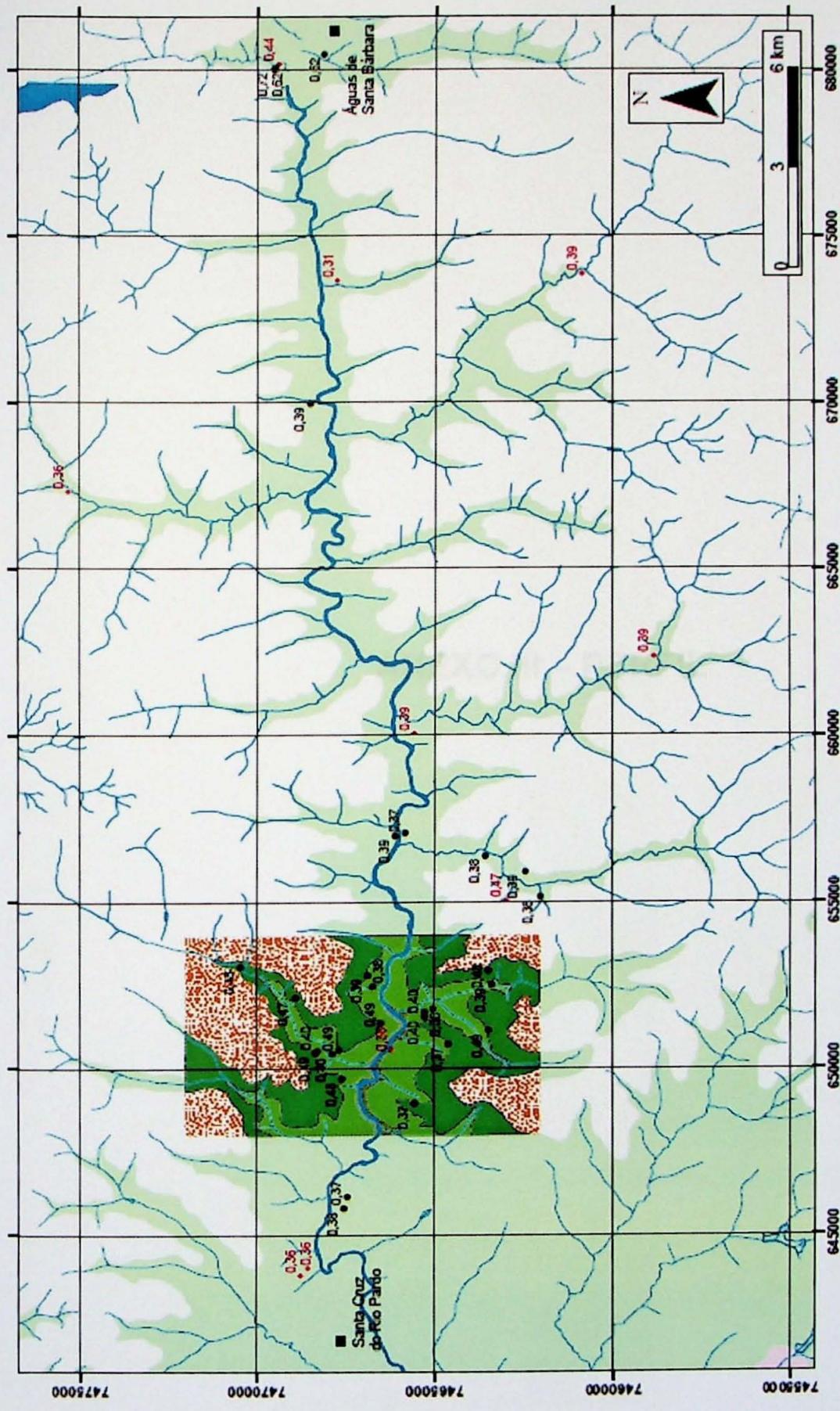
Mapa 3. Mapa da área de detalhe mostrando valores de Zr (ppm) em seus respectivos pontos.

## Área de detalhe - Estruturas



Mapa 4. Mapa da área de detalhe, mostrando as estruturas correspondentes às porções dos diferentes derrame observados.

## **ANEXO II – MAPA REGIONAL**



Mapa 1. Mapa da área regional, entre Santa Cruz Do Rio Pardo e Águas de Santa Bárbara, valores em vermelho correspondem a amostras coletadas no levantamento de campo. Valores em preto aparece inserida na área regional.

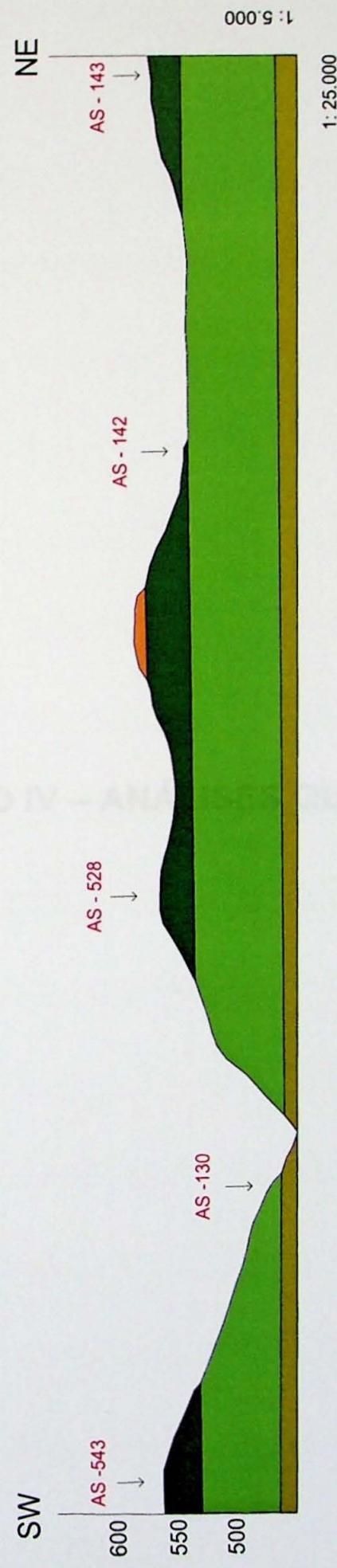
## Perfis A e da Área de Detalhe

### ANEXO III – PERFIL

#### Legenda

- Grupo Baud
- Gesso Dr.
- Gesso Dr.
- Gesso Dr.

# Perfil A - A' da Área de Detalhe



## Legenda

- Grupo Bauru
- Derrame Dn+1
- Derrame Dn
- Derrame Dn-1

Perfil litoestratigráfico dos derrames basálticos da região de Santa Cruz do Rio Pardo - SP.

## **ANEXO IV – ANÁLISES QUÍMICAS**

	AS-552	AS-83A	AS-528	AS-153	AS-149	AS-150	AS-143	AS-85A	AS-134	AS-521	AS-156	AS-133	AS-551		
SiO <sub>2</sub>	48.77	49.31	49.46	49.29	50.40	50.03	50.43	49.20	50.09	48.89	49.32	49.34	50.03	49.88	
TiO <sub>2</sub>	3.341	3.230	3.685	3.302	3.205	3.197	3.281	3.684	3.334	3.742	3.722	3.308	3.273	3.281	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.81	12.92	12.43	12.88	12.68	12.96	12.32	13.34	12.18	12.42	13.00	13.35	13.35	13.28	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.03	15.23	15.78	14.70	15.23	15.18	14.61	15.79	14.90	16.07	15.99	15.41	14.71	15.09	
MnO	0.218	0.226	0.219	0.213	0.226	0.225	0.249	0.249	0.242	0.213	0.228	0.226	0.161	0.225	0.270
MgO	4.90	5.24	4.36	5.05	4.41	4.38	4.65	4.65	4.48	5.23	4.46	4.50	4.45	5.40	5.15
CaO	9.07	9.02	8.64	9.22	8.60	8.56	8.61	8.61	8.68	9.22	8.63	8.58	9.22	9.18	9.02
Na <sub>2</sub> O	2.52	2.59	2.77	2.53	2.84	2.75	2.78	2.78	2.49	2.56	2.52	2.54	2.42	2.55	2.58
K <sub>2</sub> O	1.00	1.26	1.24	1.08	1.22	1.21	1.39	1.39	1.10	1.27	1.15	1.15	1.14	1.23	1.29
P2O <sub>5</sub>	0.393	0.388	0.488	0.379	0.382	0.374	0.369	0.369	0.472	0.394	0.474	0.476	0.388	0.376	0.401
Loi	0.36	0.20	0.48	0.52	0.26	0.34	< 0.01	< 0.01	0.98	< 0.01	0.74	0.86	1.13	< 0.01	0.22
Total	98.41	99.61	99.55	99.16	99.63	98.93	99.33	99.44	100.55	99.08	99.78	99.97	100.32	100.46	
Ba	430	445	465	448	458	442	420	520	473	399	456	446	628	380	401
Ce	113	91	110	86	141	111	86	112	94	81	103	115	87	105	99
Co	41	42	39	45	36	33	39	47	38	43	38	38	37	48	43
Cr	66	71	67	66	40	38	44	66	63	77	69	64	80	69	64
Cu	198	178	187	138	137	139	169	192	174	188	187	189	171	131	
Ga	21	23	23	22	23	23	23	23	24	23	23	22	23	22	21
La	41	31	35	38	37	41	38	36	32	< 28	37	47	38	42	38
Nb	20	20	22	19	21	21	20	23	22	20	23	22	19	20	20
Nd	52	64	65	44	50	56	69	50	74	59	73	60	66	56	52
Ni	59	57	38	64	38	39	39	38	48	60	41	44	57	71	54
Pb	13	13	11	13	13	10	6	11	12	14	11	10	11	9	
Rb	22	26	27	23	26	25	28	27	29	24	30	29	26	24	26
Sc	35	33	33	33	33	33	32	37	33	35	34	31	36	31	32
Sr	438	427	428	442	446	451	442	428	433	432	430	430	454	428	424
Th	8	10	12	12	12	11	9	5	11	11	13	12	11	10	11
U	5	5	6	5	6	5	5	< 3	5	6	6	6	5	5	5
V	520	478	457	497	431	439	496	479	462	485	455	480	443	489	516
Y	34	33	36	34	37	36	34	36	37	33	36	37	54	32	34
Zn	126	121	130	119	130	129	132	124	129	126	132	130	132	125	123
Zr	219	212	244	207	229	226	246	242	213	245	212	209	215		
MgO/TiO <sub>2</sub>	1.47	1.62	1.18	1.53	1.38	1.37	1.42	1.42	1.22	1.57	1.19	1.21	1.35	1.65	1.57



	<b>AS-128</b>	<b>AS-186</b>	<b>AS-159</b>	<b>AS-162</b>	<b>AS-187A</b>	<b>AS-132</b>
SiO <sub>2</sub>	50.49	49.07	51.59	49.92	50.28	50.73
TiO <sub>2</sub>	3.920	3.358	3.753	3.539	3.870	3.937
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.29	12.84	12.52	12.81	12.29	12.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.20	15.45	15.33	14.40	15.30	15.34
MnO	0.219	0.194	0.211	0.202	0.221	0.223
MgO	4.10	5.06	2.00	4.69	4.02	4.10
CaO	7.81	8.83	7.86	8.66	7.98	8.04
Na <sub>2</sub> O	2.66	2.58	2.69	2.57	2.60	2.66
K <sub>2</sub> O	1.74	1.43	1.59	1.26	1.53	1.55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.612	0.384	0.702	0.473	0.611	0.623
Loi	0.30	0.71	0.52	0.72	0.56	0.56
Total	99.34	99.91	98.77	99.24	99.26	100.24
Ba	508	432	553	435	586	548
Ce	118	100	132	102	119	127
Co	40	40	34	37	34	35
Cr	25	70	18	60	24	28
Cu	223	323	263	186	194	194
Ga	24	22	24	23	24	23
La	54	41	38	31	44	< 28
Nb	25	19	26	21	26	26
Nd	67	50	75	64	69	70
Ni	40	54	30	55	32	34
Pb	15	11	13	11	13	15
Rb	37	30	34	19	28	29
Sc	31	34	29	32	34	32
Sr	469	422	492	477	488	490
Th	13	11	13	10	13	13
U	6	6	7	5	6	5
V	414	480	366	420	439	419
Y	41	41	41	37	40	40
Zn	136	121	138	127	137	137
Zr	293	216	302	244	294	295
MgO/TiO <sub>2</sub>	1.05	1.51	0.53	1.33	1.04	1.04

