

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

**PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS DE PORÇÃO AFLORANTE  
DO MEMBRO ANGICO, FORMAÇÃO RIACHUELO,  
DA SUB-BACIA DE SERGIPE**

André Alves dos Santos

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes da Silva Rosa

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias

São Cristóvão-SE  
2015

André Alves dos Santos

**PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS DE PORÇÃO AFLORANTE  
DO MEMBRO ANGICO, FORMAÇÃO RIACHUELO,  
DA SUB-BACIA DE SERGIPE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de Sergipe, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências.

**Orientadora:** Dra. Maria de Lourdes da Silva Rosa

São Cristóvão–SE  
2015

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S237p Santos, André Alves dos  
Proveniência dos sedimentos de porção aflorante do membro Angico, Formação Riachuelo, da sub-bacia de Sergipe / André Alves dos Santos ; orientadora Maria de Lourdes da Silva Rosa. – São Cristóvão, 2015.  
55 f. : il.

Dissertação (mestrado em Geociências e Análise de Bacias) – Universidade Federal de Sergipe, 2015.

1. Sedimentos – Geologia. 2. Geocronologia. 3. Bacias sedimentares – Sergipe. I. Rosa, Maria de Lourdes da Silva, orient. II. Título.

CDU 551.3.051(813.7)

**PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS DE PORÇÃO AFLORANTE  
DO MEMBRO ANGICO, FORMAÇÃO RIACHUELO,  
DA SUB-BACIA DE SERGIPE**

por:

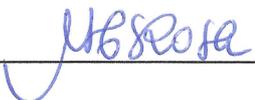
**André Alves dos Santos**  
(Biólogo, Universidade do Estado da Bahia – 2009)

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de:

**MESTRE EM GEOCIÊNCIAS**

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_ Dra. Maria de Lourdes da Silva Rosa [Orientadora – UFS]

  
\_\_\_\_\_ Dra. Débora Correia Rios [Membro Externo – UFBA]

  
\_\_\_\_\_ Dra. Ana Cláudia da Silva Andrade [Membro Interno – UFS]

Data Defesa: 30/07/2015

## **DEDICATÓRIA**

***Aos meus pais e em especial aos meus filhos: Davi e Duan, por acreditarem e apoiarem meus sonhos e convicções. A Deus, por sua divina graça agindo sobre minha vida.***

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que estiveram presentes me apoiando direta e indiretamente neste trabalho. A CAPES pela concessão da Bolsa de Mestrado e ao CNPq-PRONEX-FAPITEC pelo suporte dos trabalhos de campo e análises.

Aos meus pais agradeço o amor, apoio e confiança em meu futuro, quando então, decidi largar tudo para seguir um de meus sonhos que foi tornar-me mestre.

Aos meus dois filhos que são as minhas fontes inspiradoras e base fundamental da minha vida.

A minha orientadora Profa. Maria de Lourdes Rosa pela confiança em meu trabalho, conselhos e principalmente pela parceria e amizade crescentes que surgiram e que sem dúvida permanecerão.

Aos meus professores doutores do PGAB, Aracy Sousa Senra, Herbet Conceição e Ana Claudia Andrade, agradeço pelos conselhos, confiança, amizade e ajuda na evolução do meu trabalho.

Aos amigos Vinicius Lisboa, Tassia Vanessa, Lilia Andrade, Joane Almeida, Adjanine Pimenta e Jailson Santos a amizade e força dada em todos os momentos. A Fábio Pereira pela ajuda na confecção das figuras.

A todo o pessoal do LAPA - Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral do Departamento de Geologia e ao PGAB – Pós Graduação em Geociências e Análise de Bacias da UFS. Principalmente ao professor Herbet Conceição pela disponibilização dos laboratórios e manuseio no MEV.

A todos que aqui não foram citados, mas que contribuíram enormemente para a conclusão deste trabalho os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A Bacia de Sergipe-Alagoas possui uma das mais completas sucessões estratigráficas das margens leste e sudeste do Brasil. Na Sub-Bacia de Sergipe a Formação Riachuelo aflora na cidade homônima em Sergipe, a cerca de 30 km a noroeste da capital do estado. Esta formação registra os primeiros sedimentos depositados sob condições marinhas e é subdividida em três membros: Angico, Taquari e Maruim. Estas rochas representam um exemplo de sedimentação relacionada à fase Drifte, durante a abertura do Oceano Atlântico Sul. Neste trabalho foram obtidos os dados isotópicos U-Pb (LA-ICP-MS) de 82 grãos detríticos de zircão, em duas amostras de arenitos pertencentes ao Membro Angico. Foi possível indicar cinco principais grupos de intervalos de idade, que sugerem as seguintes fontes: G1 [901 Ma a 1152 Ma – 11%] Sistema Orogênico Sergipano (Província Borborema); G2 [1439 Ma a 1508 Ma – 4%] Província Borborema e Cráton do São Francisco; G3 [1762 Ma a 2467 Ma – 27%] Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco); G4 [2603 Ma a 2892 Ma – 30%] Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco); e G5 [2953 Ma a 3468 Ma – 28%] Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco). A maioria das idades obtidas (85%) são paleoproterozoicas a paleoarqueanas, e provavelmente, o Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco) foi a principal área-fonte para os sedimentos do Membro Angico.

*Palavras-Chave: Membro Angico, Sub-Bacia de Sergipe, Proveniência*

## **ABSTRACT**

The Sergipe-Alagoas Basin has one of the most complete stratigraphic succession of eastern and southeastern shores of Brazil. In Sub-basin of Sergipe the Riachuelo Formation occurs in the namesake city in Sergipe, about 30 km Northwest of the state capital. This formation register the first sediments deposited under marine conditions and is subdivided into three members: Angico, Taquari and Maruim. These rocks are an example of sedimentation related to the drift phase, during the opening of the South Atlantic Ocean. In this work we obtained U-Pb isotopic data (LA-ICP-MS) of 82 detrital zircon grains, from two samples of sandstones belonging to the Angico Member. They indicate five main groups age intervals, suggesting the following sources: G1 [901 Ma to 1152 Ma - 11%] Orogenic System Sergipe (Borborema Province); G2 [1439 Ma to 1508 Ma - 4%] Borborema Province and São Francisco Craton; G3 [1762 Ma to 2467 Ma - 27%] Serrinha Nucleus (Craton); G4 [2603 Ma to 2892 Ma - 30%] Serrinha Nucleus (São Francisco Craton); and G5 [2953 Ma to 3468 Ma - 28%] Serrinha Nucleus (São Francisco Craton). The majority of the ages obtained (85%) are paleoproterozoic to paleoarqueanas, and probably, the Serrinha Nucleus (Craton) was the main source area for the sediments of the Angico Member.

*Keywords: Angico Member, Sub-basin of Sergipe, Provenance*

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ii
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>SUMÁRIO</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	ix
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
I.1. Apresentação	2
I.2. Localização e Acesso à Área de Estudo	3
I.3. Objeto e Objetivos	5
I.3.1. Objetivo Geral	5
I.3.2. Objetivos Específicos	5
I.4. Justificativa	5
I.5. Metodologia de Trabalho	6
I.5.1. Levantamento Bibliográfico	6
I.5.2. Trabalho de Campo	6
I.5.3. Preparação das Amostras	7
I.5.4. Imageamento dos Cristais de Zircão	9
I.5.5. Determinações Isotópicas	9
I.6. Estruturação da Dissertação	10
<b>CAPÍTULO II – BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS</b> .....	<b>11</b>
II.1. Introdução	12
II.2. Aspectos Gerais da Geologia da Bacia Sergipe-Alagoas	12
II.2.1. Estágio Sinéclise	15
II.2.2. Estágio Pré-Rifte	15
II.2.3. Estágio Rifte	15
II.2.4. Estágio Transicional	16
II.2.5. Estágio Drifte	16
II.3. Formação Riachuelo	17
II.4. Membro Angico	19

<b>CAPÍTULO III – REFERENCIAL TEORICO DO MÉTODO LA-ICP-MS .....</b>	<b>23</b>
III.1. Zircão	24
III.2. Espectrometria de Massa	25
III.2.1. Histórico	25
III.2.2. Componentes do Espectrômetro de Massa	26
III.3. Plasma Indutivamente Acoplado	27
III.4. LA-ICP-MS	29
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
IV.1. Caracterização das Amostras com o MEV	33
IV.2. Idades U-Pb dos Cristais de Zircão Detritico	36
IV.2.1. Idades dos Cristais de Zircão Detritico da Amostra P-16	36
IV.2.2. Idades dos Cristais de Zircão Detritico da Amostra P-18	40
IV.3. Proveniência dos cristais de Zircão Detritico	44
<b>CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>48</b>
V.1. Conclusões Gerais	49
V.2. Recomendações	50
<b>REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de situação do Estado de Sergipe no território brasileiro (A). Mapa de localização e acesso da área de estudo (B) .....	4
Figura 2.	Fluxograma das etapas utilizadas na concentração de zircão .....	8
Figura 3.	Carta Litoestratigráfica da Sub-Bacia de Sergipe .....	14
Figura 4.	Mapa Geológico Simplificado da Região de Estudo .....	18
Figura 5.	Imagens MEV de Cristais de Zircão da Amostra P-16 .....	34
Figura 6.	Imagens MEV de Cristais de Zircão da Amostra P-18 .....	35
Figura 7.	Diagrama Frequência <i>versus</i> Idade (Ga) dos cristais de zircão detríticos da amostra P-16.....	38
Figura 8.	Diagrama Concórdia aplicado aos cristais de zircão detríticos da amostra P-16 .....	39
Figura 9.	Diagrama Frequência <i>versus</i> Idade (Ga) dos cristais de zircão detríticos da amostra P-18 .....	42
Figura 10.	Diagrama Concórdia aplicado aos cristais de zircão detríticos da amostra P-18 .....	43
Figura 11.	Diagrama Frequência <i>versus</i> Idade (Ga) dos cristais de zircão detríticos das amostras P-16 e P-18 .....	45
Figura 12.	Diagrama Concórdia aplicado aos cristais de zircão detríticos das amostras P-16 e P-18 .....	46

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Idades U-Pb (LA-ICP-MS) dos cristais de zircão detríticos da amostra P-16. Concordância (Con). .....	37
Tabela 2. Idades U-Pb (LA-ICP-MS) dos cristais de zircão detríticos da amostra P-18. Concordância (Con). .....	41

## ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Foto 1. Gradação da rocha da base para o topo (Afloramento P-16) .....	20
Foto 2. Ortoconglomerado políptico com seixos de quartzo e quartzito (Afloramento P-16) .....	20
Foto 3. Nível de oncólitos alinhados (Afloramento P-16) .....	22
Foto 4. Arenitos de coloração amarela (Afloramento P-18) .....	22
Foto 5. Foto do LA-ICP-MS (Universidade de Lausane) .....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS

BSA.....	Bacia Sergipe-Alagoas
BSE.....	Elétrons Retro-Espalhados ( <i>Backscattering Electron</i> )
CAPES.....	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CL.....	Catodoluminescência
CNPq.....	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPGeo.....	Centro de Pesquisas Geocronológicas
EDS.....	Espectrômetro de Energia Dispersiva
FAPITEC.....	Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe
FINEP.....	Financiadora de Estudos e Projetos
GPS.....	<i>Global Positioning System</i>
ICP.....	Plasma Indutivamente Acoplado
LA.....	Ablação a Laser
LAPA.....	Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral
MEV.....	Microscópio Eletrônico de Varredura
MS.....	Espectrometria de Massa
PGAB.....	Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias
PRONEX.....	Programa Núcleos de Excelência
SBS.....	Sub-Bacia de Sergipe
SE.....	Elétrons Secundários
UFS.....	Universidade Federal de Sergipe
USP.....	Universidade de São Paulo
UTM.....	<i>Universal Transverse de Mercator</i>

## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

---

## **I.1 – APRESENTAÇÃO**

O estudo da proveniência de rochas sedimentares visa reconstituir as relações existentes entre áreas-fonte e bacias sedimentares, envolvendo a determinação da composição da área-fonte e dos sedimentos e sua localização geográfica, as rotas de distribuição das areias da fonte até a bacia, a avaliação das condições climáticas, do tectonismo, e do relevo na época da decomposição. É também uma forma de estimar a distância de transporte da fonte até o sítio de deposição, tempo de residência do sedimento na planície aluvial ou plataforma e os efeitos da dissolução durante a diagênese (Morton 1991; Remus *et al.* 2008).

As análises dos minerais leves podem fornecer informações importantes sobre as áreas-fonte, destacando-se, a composição dos plagioclásios, os tipos de macla dos feldspatos, e os tipos de grãos de quartzo e suas inclusões. Entretanto, o estudo da assembleia de minerais detríticos pesados, incluindo as análises varietais e isotópicas, é o meio mais preciso e confiável de determinar as rochas das áreas-fonte dos sedimentos e suas variações no espaço e no tempo (Morton 1991). Estes minerais são também utilizados para correlações estratigráficas e comparações entre corpos de areia, especialmente quando na ausência de informações bioestratigráficas precisas (Remus *et al.* 2008).

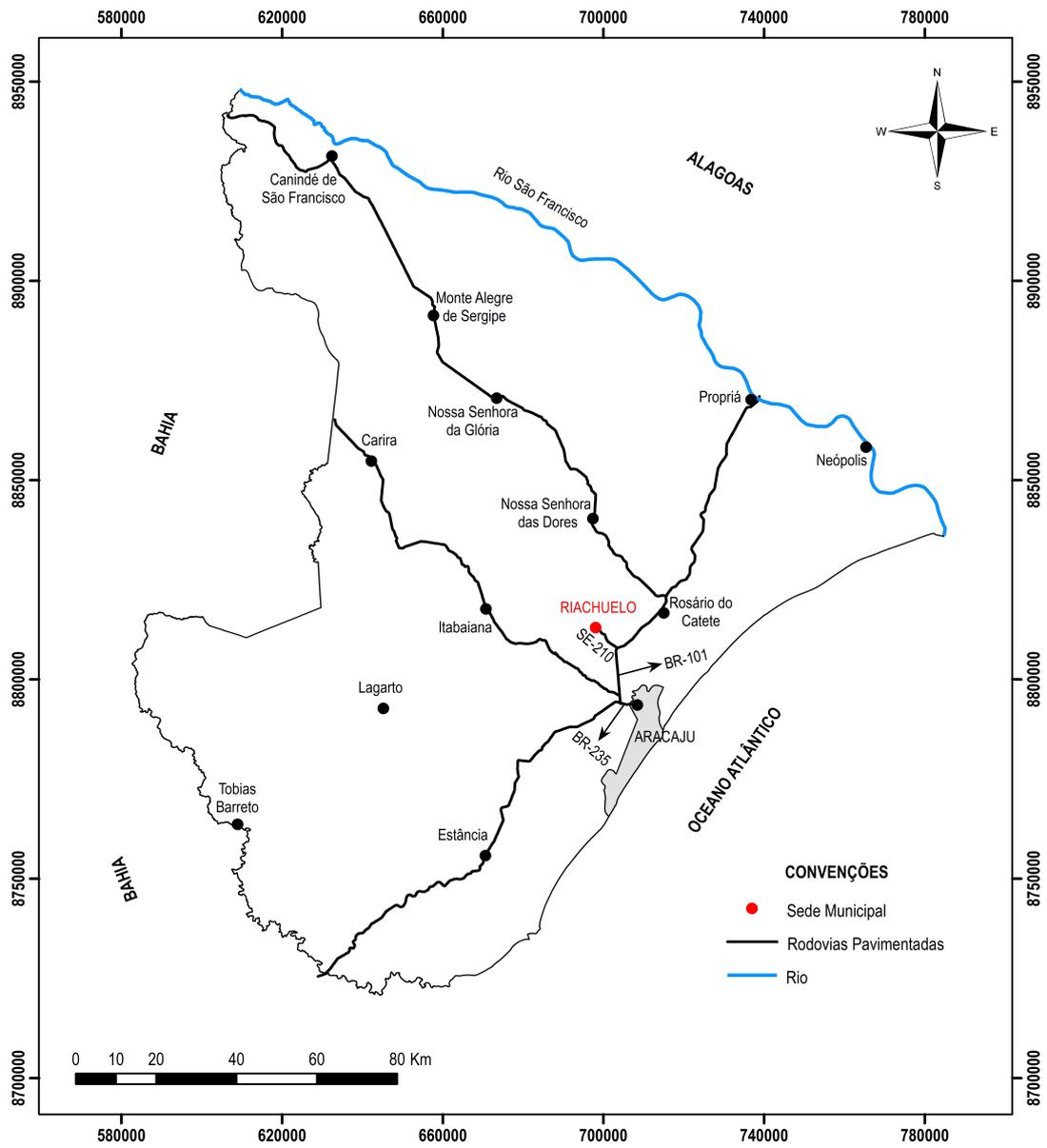
O zircão é um mineral de elevada resistência aos processos físicos e químicos naturais, sendo frequente entre os minerais detríticos resistentes da maior parte dos depósitos sedimentares. O zircão resiste também a transformações de alta temperatura como as hidrotermais e metamórficas. É comum encontrar cristais remanescentes de zircão em rochas magmáticas produzidas pela anatexia. A baixa velocidade de difusão intracristalina dos íons na estrutura do zircão (Cherniak *et al.* 1997) favorece a preservação de sua composição química e isotópica durante a maior parte dos processos geológicos. Essas propriedades fazem do zircão um mineral de grande importância em estudos de proveniência e geocronologia, conforme discutido por vários autores (Belousova *et al.* 2002; Rubatto & Hermann 2003; Remus *et al.* 2008).

A Bacia de Sergipe-Alagoas (BSA) possui uma das mais completas sucessões estratigráficas das margens leste e sudeste do Brasil (Mohriak *et al.* 1997; Souza-Lima *et al.* 2002; Mohiark 2003). Durante o período Albiano (112 a 99 Ma), com a ruptura do Gondwana e abertura do Atlântico Sul, uma grande plataforma de sedimentação carbonática começou a se formar ao longo da costa leste do Brasil e na costa ocidental da África (Cesero & Ponte 1997). As rochas carbonáticas na Bacia de Sergipe-Alagoas pertencem ao denominado Grupo Sergipe (Feijó 1995; Mendes 1994), que reúne as Formações Riachuelo e Cotinguiba. Ela está subdividida em quatro sub-bacias: Jacuípe, Sergipe, Alagoas e Cabo.

Neste contexto, esta dissertação tem como foco o estudo dos cristais de zircão detríticos pertencentes ao Membro Angico da Sub-Bacia de Sergipe (SBS), que pertence à Formação Riachuelo, unidade esta que contém os primeiros sedimentos depositados sob condições nitidamente marinhas. Estas representam um exemplo de sedimentação relacionada à fase drifte, durante a abertura do oceano Atlântico Sul.

## **I.2 – LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO**

O Membro Angico aflora principalmente no município de Riachuelo, que se localiza no centro-leste do Estado de Sergipe. O acesso, partindo-se de Aracaju (Fig. 1), é feito através das rodovias pavimentadas BR-235, BR-101 e SE-210, num percurso de cerca de 29 km. Localmente o acesso a área é realizado por estradas não pavimentadas, mas que apresentam boas condições de tráfego.



**Figura 1.** Mapa de localização e acesso à área de estudo (Bonfim *et al.* 2002).

## **I.3 – OBJETIVOS**

### **I.3.1 – Objetivo Geral**

O objetivo principal deste projeto é contribuir para o entendimento dos processos evolutivos do Membro Angico, de acordo com a dinâmica de aporte de sedimentos, e assim ajudar a reconstruir parte de sua história geológica.

O objeto deste estudo são os cristais de zircão detríticos que ocorrem associados às rochas conglomeráticas e areníticas pertencentes ao Membro Angico, Formação Riachuelo da Sub-Bacia de Sergipe.

### **I.3.2 – Objetivo Específico**

Esta pesquisa investigará as fontes dos sedimentos através de estudos isotópicos, utilizando análises de U-Pb em zircão, através da técnica de *Laser Ablation* acoplado a um ICP-MS. Tendo como objetivo específico:

- Determinar os padrões de idade das fontes dos sedimentos do Membro Angico.

## **I.4 – JUSTIFICATIVA**

A análise de minerais pesados consiste no método mais eficiente e preciso para determinar a proveniência de rochas, principalmente de arenitos. Isto se deve ao fato de que as rochas-fonte possuem uma grande diversidade de minerais pesados, que podem ocorrer associados a elas.

Existem muitos estudos acerca da estratigrafia da Bacia de Sergipe-Alagoas (Lana 1990; Feijó 1995; Mendes 1994; Souza-Lima *et al.* 2002; Mohriak 2003; Campos Neto *et al.* 2007), porém não há dados publicados sobre a proveniência dos seus sedimentos. Esse estudo é muito importante, pois visa melhor entender a evolução da bacia no que se diz respeito à origem de seus sedimentos, com o Membro Angico marcando os estágios iniciais da fase drifte desta bacia.

## **I.5 – METODOLOGIA DE TRABALHO**

Visando alcançar os objetivos propostos para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário aplicar uma metodologia que permitisse realizar as coletas de dados, análises e reflexões. Este trabalho foi desenvolvido em várias etapas, e em cada uma desta objetivou-se atingir as metas propostas.

### **I.5.1 – Levantamento Bibliográfico**

Constitui da realização de pesquisa bibliográfica, visando obter as informações disponíveis sobre a geologia da Bacia de Sergipe-Alagoas, principalmente aquelas referentes à Formação Riachuelo, mais especificamente o Membro Angico, onde se localiza o objeto desta pesquisa. Nesta etapa foram utilizadas a catalogação e análise dos dados disponíveis de trabalhos anteriores, como artigos científicos, anais de congressos e simpósios, teses e livros que abordavam o tema. Este material serviu como base para a elaboração do segundo capítulo desta dissertação.

Este levantamento também incluiu um estudo sobre as técnicas de obtenção de dados geocronológicos, com ênfase no método LA-ICP-MS, – espectrometria de massa (*MS – Mass Spectroscopy*) por ablação a laser (*LA – Laser Ablation*) com plasma indutivamente acoplado (*ICP – Inductively Coupled Plasma*).

### **I.5.2 – Trabalhos de Campo**

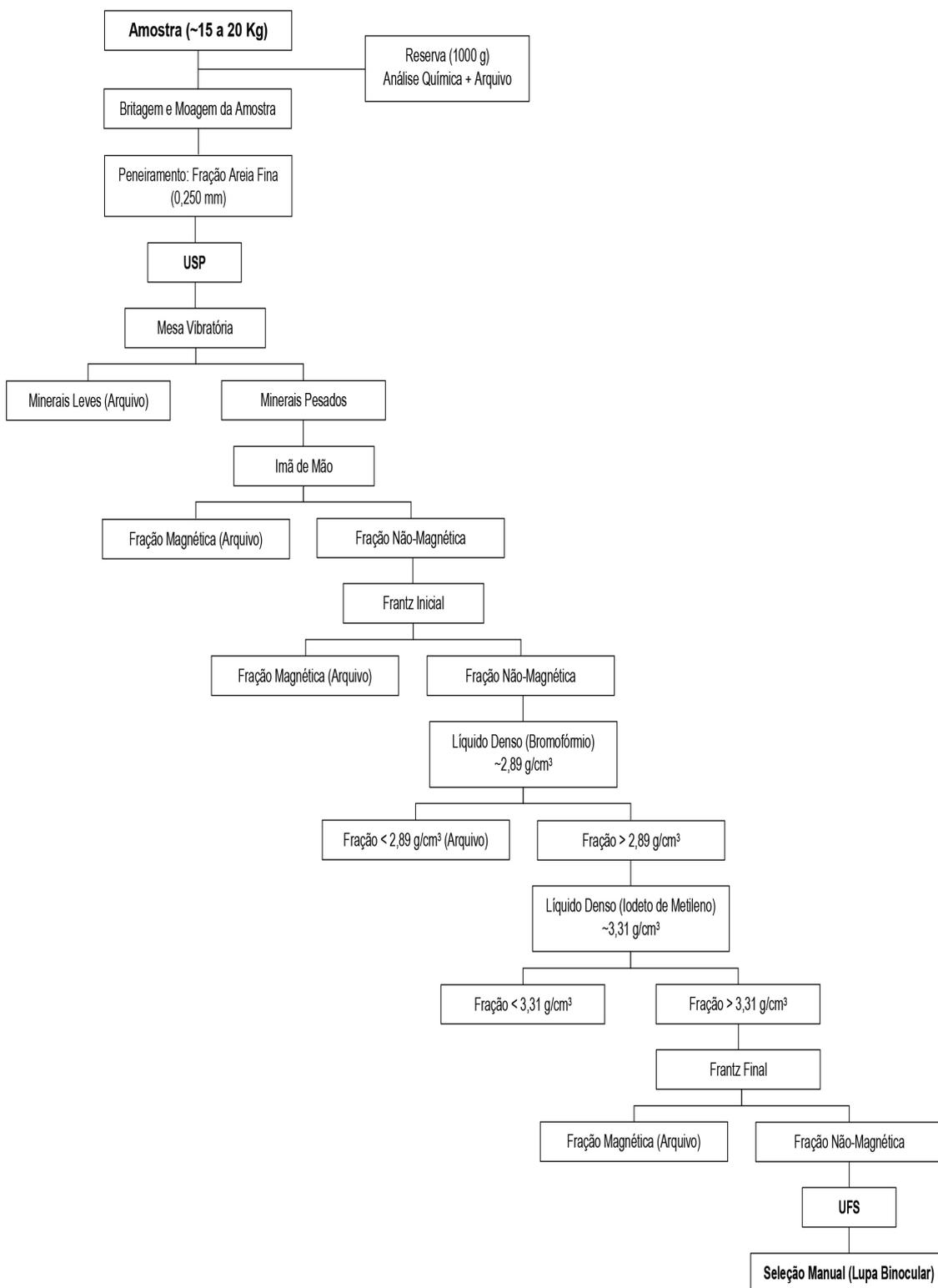
Em março de 2013 foi realizada uma missão de campo, que teve duração de seis dias. Estes trabalhos de campo objetivaram a seleção e coleta das amostras para estudos geocronológicos, pôde-se também realizar uma secção estratigráfica completa de toda a Bacia de Sergipe-Alagoas, sob a coordenação do Dr. Wagner Souza Lima, da Fundação Phoenix/Petrobras, especialista em estudos da Bacia de Sergipe-Alagoas.

Nessa missão foram selecionados dois afloramentos representativos do membro Angico para coletas de amostras, denominadas (P-16 e P-18), para se estudar a proveniência dos zircões. A localização dos afloramentos visitados foi realizada utilizando-se o sistema de coordenadas *Universal Transversal Mercator* (UTM), determinadas por *Global Positioning System* (GPS) da marca Garmin, modelo GPSMAP, 62 STC. As rochas coletadas nesses afloramentos tiveram seus aspectos texturais e mineralógicos descritos, com o auxílio de uma lupa de mão. Foi realizada a coleta sistemática de cerca de 15 a 20 kg de amostras representativas de cada afloramento, devidamente identificadas e acondicionadas em sacos plásticos para tratamento posterior.

### **I.5.3 – Preparação das Amostras**

Consistiu inicialmente da observação macroscópica das rochas coletadas. Em seguida, foram obtidos os concentrados de zircão utilizando a metodologia clássica (Fig. 2) utilizada pelo Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (LAPA) na qual o tamanho da amostra é reduzido via britador (Paviteste). A partir do material recolhido e quarteado, um volume com no máximo 1 kg foi ensacado, identificado e armazenado para o caso da necessidade de análises adicionais. O restante da amostra foi moído e peneirado a uma fração inferior a 0,25 mm, utilizando-se um moinho de panela de tungstênio (Contenco). Estas etapas foram desenvolvidas na UFS.

Em seguida, as amostras foram enviadas ao laboratório de separação mineral, do Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo (CPGeo-USP). Os minerais pesados foram então concentrados em mesa vibratória, e em seguida utilizou-se um separador isodinâmico (Frantz) para a concentração por meios magnéticos (Fig. 2). Em sequência usou-se líquidos densos (bromofórmio e iodeto de metileno), e novamente concentração por meios magnéticos pelo emprego de equipamento Frantz. Posteriormente, foi feita seleção manual em lupa binocular de aproximadamente 300 cristais de cada amostra de forma aleatória.



**Figura 2.** Fluxograma das etapas utilizadas na concentração de zircão.

#### **I.5.4 – Imageamento dos Cristais de Zircão**

O Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV é um instrumento versátil, sendo comumente utilizado para a análise da morfologia de materiais sólidos e, portanto, conveniente no estudo de proveniência de sedimentos. Mesmo utilizando-se de um técnica complexa para a obtenção de imagens de fácil interpretação.

Foram selecionados cerca de 100 cristais de zircão para serem imageados utilizando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Microscopia Eletrônica, do Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências (CLGeo) da UFS. Após o processo de separação os cristais de zircão foram colocados em *stubs* de alumínio, fixados nesse suporte com fita dupla face de carbono metálico e metalizados com carbono, utilizando-se o equipamento de metalização marca Quorum (Q150R ES).

O MEV do CLGeo é um equipamento de marca Tescan<sup>®</sup> (Vega 3), tendo acoplado detectores para elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE) e um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da Oxford Instrumentos<sup>®</sup> (X-Act). As condições analíticas do feixe de elétrons foram de 15 Kv e 20 nA. A dimensão do feixe de elétrons utilizado durante as análises ficou compreendida entre 830 nm 1000 nm.

#### **I.5.5 – Determinações Isotópicas**

Os *mounts* foram feitos no CPGeo-USP em disco de epoxi com dimensões padrão de 2,5 cm de diâmetro, sendo seccionados, polidos para expor os centros dos grãos e recobertos com uma película de carbono metalizados para imageamento por cátodo luminescência (CL). As imagens CL foram obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV da marca Hitachi S-2250N, sob condições de aceleração de voltagem de 15kV do CPGeo-USP. As análises de U-Pb também foram realizadas no CPGeo-USP, onde todos os dados apresentados foram obtidos utilizando LA-ICP-MS, Finnigan Neptune acoplado com um ArF Laser. O processamento de dados foi realizado por meio do programa *Isoplot* (Ludwig 2001). As incertezas para os índices medidos são dadas a nível de um sigma.

## **I.6 – ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está estruturada em torno dos dados levantados a partir deste estudo os quais foram reunidos, tratados e interpretados com a finalidade de obter informações necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa, que posteriormente será disponibilizada à comunidade científica na forma de artigo.

- Primeiro Capítulo: consta da introdução sobre o tema e descrição do objeto da dissertação de Mestrado, onde estão sumarizados os objetivos e a área de estudo da pesquisa desenvolvida, e os métodos utilizados nas diferentes etapas desta pesquisa.
- Segundo Capítulo: aborda os aspectos gerais da Bacia de Sergipe-Alagoas - BSA: no contexto do atual conhecimento. Apresenta-se o contexto geológico da BSA, com ênfase na Formação Riachuelo (Fm. Riachuelo) e na descrição da área, especificamente do Membro Angico.
- Terceiro Capítulo: apresenta o embasamento teórico da técnica de datação de zircão por LA-ICP-MS.
- Quarto Capítulo: abordam os resultados e interpretações dos dados obtidos no trabalho.
- Quinto Capítulo: apresenta a integração das principais conclusões sobre esta pesquisa.

## Capítulo 11 – BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS

---

## **II.1 – INTRODUÇÃO**

As bacias marginais brasileiras compartilham, de uma forma geral, grandes semelhanças quanto à evolução tectônica e história do preenchimento sedimentar. Essas semelhanças devem-se à gênese comum, resultante dos processos que culminaram com a ruptura do Gondwana a partir do final do Jurássico (Souza-Lima *et al.* 2002; Mohriak 2003; Souza-Lima & Hamsi Jr 2003).

A Bacia de Sergipe-Alagoas (BSA) está localizada no litoral nordeste brasileiro, ocupando uma faixa alongada na direção nordeste entre os estados de Sergipe e Alagoas, com uma largura média de 35 km e comprimento da ordem de 350 km em sua porção emersa. Considerando-se a porção submersa até a isóbata de 2.000 m, sua área alcança cerca de 35.000 km<sup>2</sup> (Lana 1990). Os primeiros limites da bacia são o Sistema Orogênico Sergipano a Noroeste; o Alto de Maragogi a Norte, que a separa da bacia de Pernambuco-Paraíba; e a Plataforma de Estância, a Sul, que a separa das bacias do Recôncavo e Tucano Sul. O limite Leste é inferido pela isóbata de 2.000 m (Lana 1990).

O embasamento da BSA é formado pelos terrenos do Cráton do São Francisco, do Sistema Orogênico Sergipano, e do Domínio Pernambuco-Alagoas, estes dois últimos representantes da Província Borborema. Estas rochas possuem idades Pré-cambrianas e contribuíram como fonte de sedimento desta bacia, sobretudo durante seus estágios riftes (Lana 1990).

## **II.2 – ASPECTOS GERAIS DA GEOLOGIA DA BSA**

De acordo com Souza-Lima *et al.* (2002), os primeiros estudos da geologia da bacia Sergipe-Alagoas datam da primeira metade do século 19, quando Henderson, em 1821, publicou notas preliminares sobre a geologia da região. Os primeiros levantamentos geológicos e paleontológicos foram executados entre 1865-1866 pelo naturalista canadense Charles Frederick Hartt.

Entre todas as bacias brasileiras, a BSA é a que provavelmente possui o mais completo registro tectono-sedimentar (Mendes 1994). Além de um vasto acervo de informações de poços, a BSA possui um grande número de afloramentos e a existência de muitos testemunhos ao longo de todo o empilhamento estratigráfico, o que contribui muito para um melhor entendimento de sua evolução.

A BSA tem sido alvo de diversos trabalhos e teses, devido a uma grande quantidade de dados adquiridos através de perfurações de aproximadamente 3.300 poços. Conseqüentemente, uma série de informações estratigráficas, geoquímicas e paleontológicas foi adquirida, além de mais de 100.000 km de linhas sísmicas, e levantamentos gravimétricos/magnetométricos.

O maior número de estudos realizados na bacia é direcionado aos principais intervalos produtores de óleo e gás, desde a seção Paleozoica até a Terciária, havendo reservas significativas no embasamento fraturado (Proterozoico), no campo de Carmópolis. Em acordo com Mendes (1994), os principais sistemas petrolíferos da bacia são registrados na Formação Muribeca (Aptiano), Formação Penedo-Barra de Itiúba (Neocomiano-Barremiano) e Formação Calumbi (Neocretáceo-Terciário).

Durante o período Albiano, com a ruptura do Gondwana e abertura do Atlântico Sul, uma grande plataforma de sedimentação carbonática começou a se formar ao longo da costa leste do Brasil e na costa ocidental da África (Cesero & Ponte 1997). Na BSA, esta sedimentação carbonática pode ser vista especialmente nas formações Riachuelo e Cotinguiba (Cainelli *et al.* 1987; Feijó 1995). Estas formações constituem o denominado Grupo Sergipe (Feijó 1980; Mendes 1994).

Na evolução da Sub-Bacia de Sergipe são descritos cinco estágios tectono-sedimentar (Fig. 3): sinéclise, pré-rifte, rifte, transicional e drifte (Souza-Lima *et al.* 2002; Mohriak 2003; Campos Neto *et al.* 2007):

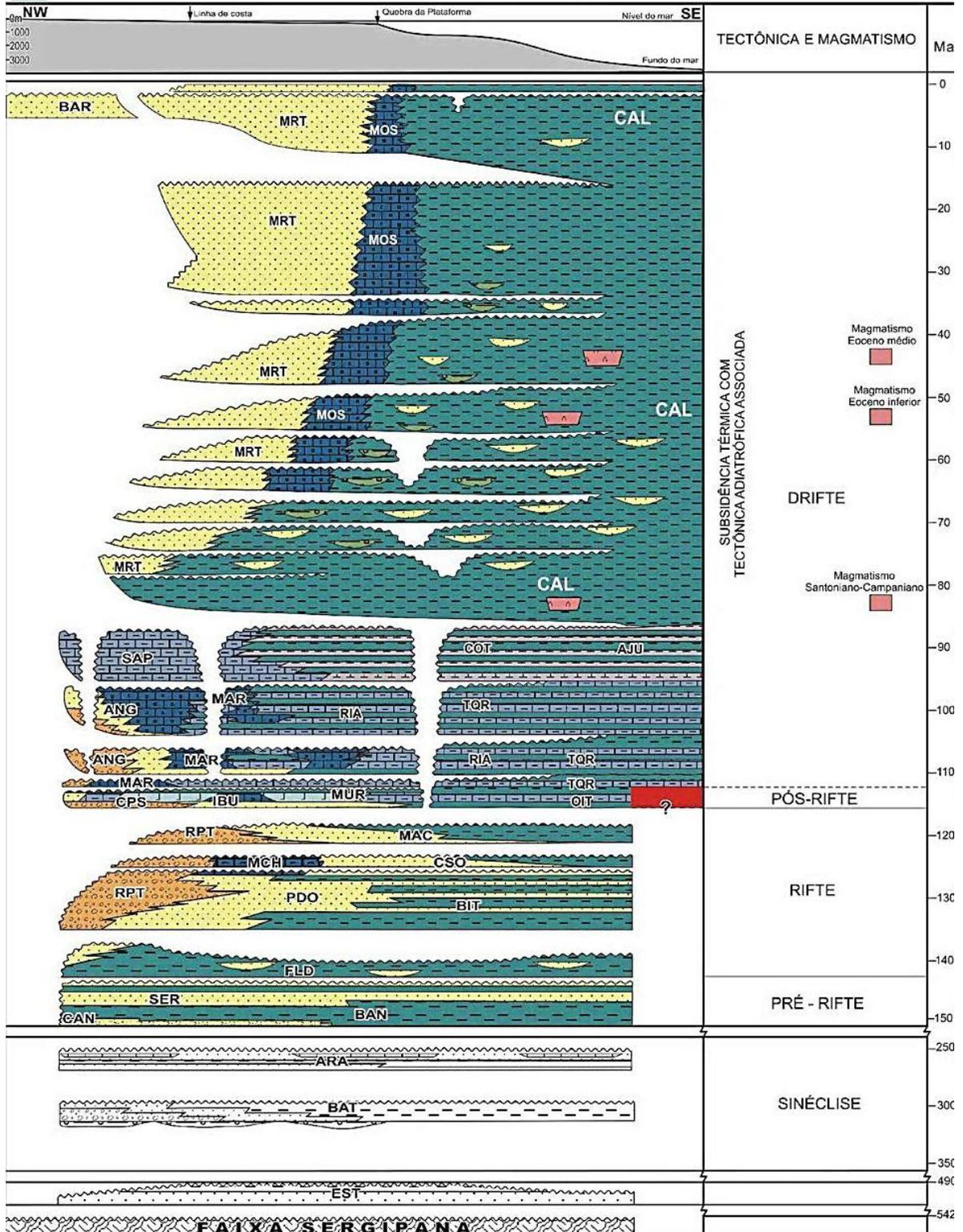


Figura 3. Carta Litoestratigráfica da Sub-Bacia de Sergipe (Campos Neto et al. 2007).

### **II.2.1 – Estágio Sinéclise**

A sequência de sinéclise está representada pelo Grupo Igreja Nova, constituído pelas unidades siliciclásticas das Formações Batinga, de idade neocarbonífera (Azambuja Filho *et al.* 1998), e Aracaré, datada do Eopermiano (Schaller 1969), separados por uma discordância de idade Permo-Carbonífera (Morhiak *et al.* 1997). A Formação Batinga foi depositada em um sistema glacial, com influência de processos fluviais e marinhos (Van der Ven *et al.* 1989). A deposição dos litotipos da Formação Aracaré ocorreu em um ambiente marinho raso e litorâneo, associado a sistemas lacustre, eólico e de sabkha (Schaller *et al.* 1980; Van der Ven *et al.* 1989). O contato inferior dessas unidades com o embasamento cristalino é marcado por uma discordância de idade Carbonífero-cambriano (Mohriak *et al.* 1997). Esse estágio é composto por rochas siliciclásticas e arenitos eólicos, folhelhos e laminitos algais lacustres.

### **II.2.2 – Estágio Pré-Rifte**

Esse estágio foi iniciado no Neojurássico, e a fisiografia da atual margem atlântica do Brasil e África exibia feições dômicas positivas e depressões ao redor dos altos, denominadas “depressões periféricas” (Estrella 1972). Na BSA, a sedimentação que precede a abertura do rifte tem início ainda durante o Permo-Carbonífero, com deposição de sedimentos em ambiente glacial, fluvial, costeiro e de *sabkhas* das formações Batinga e Aracaré, respectivamente. Durante o Jurássico foram depositados os sedimentos flúvio-lacustres das formações Candeeiro, Bananeiras e Serraria (Feijó 1995).

### **II.2.3 – Estágio Rifte**

Foi instalado devido ao aumento do tectonismo, provavelmente no final do Eocretáceo. As sequências sedimentares da BSA exibem nesta fase um misto de depósitos clásticos flúvio-lacustres, intercalados a bancos carbonáticos de águas rasas.

Pelitos lacustres com esparsos corpos arenosos da Formação Barra do Itiúba passaram ao longo do tempo para sequências deltaicas. Com o assoreamento progressivo dos meio-grábens, sistemas fluviais progradaram sobre as zonas deltáicas, depositando os arenitos fluviais da Formação Penedo. Nas bordas dos blocos soerguidos, leques aluviais da Formação Rio Pitanga foram depositados (Lana 1990). Por fim, durante o Andar Jiquiá, desenvolveram-se os bancos carbonáticos bioclásticos do Membro Morro do Chaves (Feijó 1995), associados a clásticos flúvio-deltáicos da Formação Coqueiro Seco (Lana 1990).

#### **II.2.4 – Estágio Transicional**

Este estágio foi iniciado no do Eoaptiano quando os primeiros sedimentos marinhos foram depositados. Na Sub-Bacia de Sergipe, esta fase é representada pelas rochas das formações Muribeca e Maceió. Nos baixos estruturais, à frente da linha de charneira Alagoas, depositaram-se folhelhos betuminosos com interlaminações de anidrita, dolomita e halita da Formação Maceió (Feijó 1995). Nas porções altas predominaram os clásticos grossos do Membro Carmópolis, os evaporitos do Membro Ibura e os carbonatos de baixa energia do Membro Oiteirinhos (Feijó 1995).

#### **II.2.5 – Estágio Drifte**

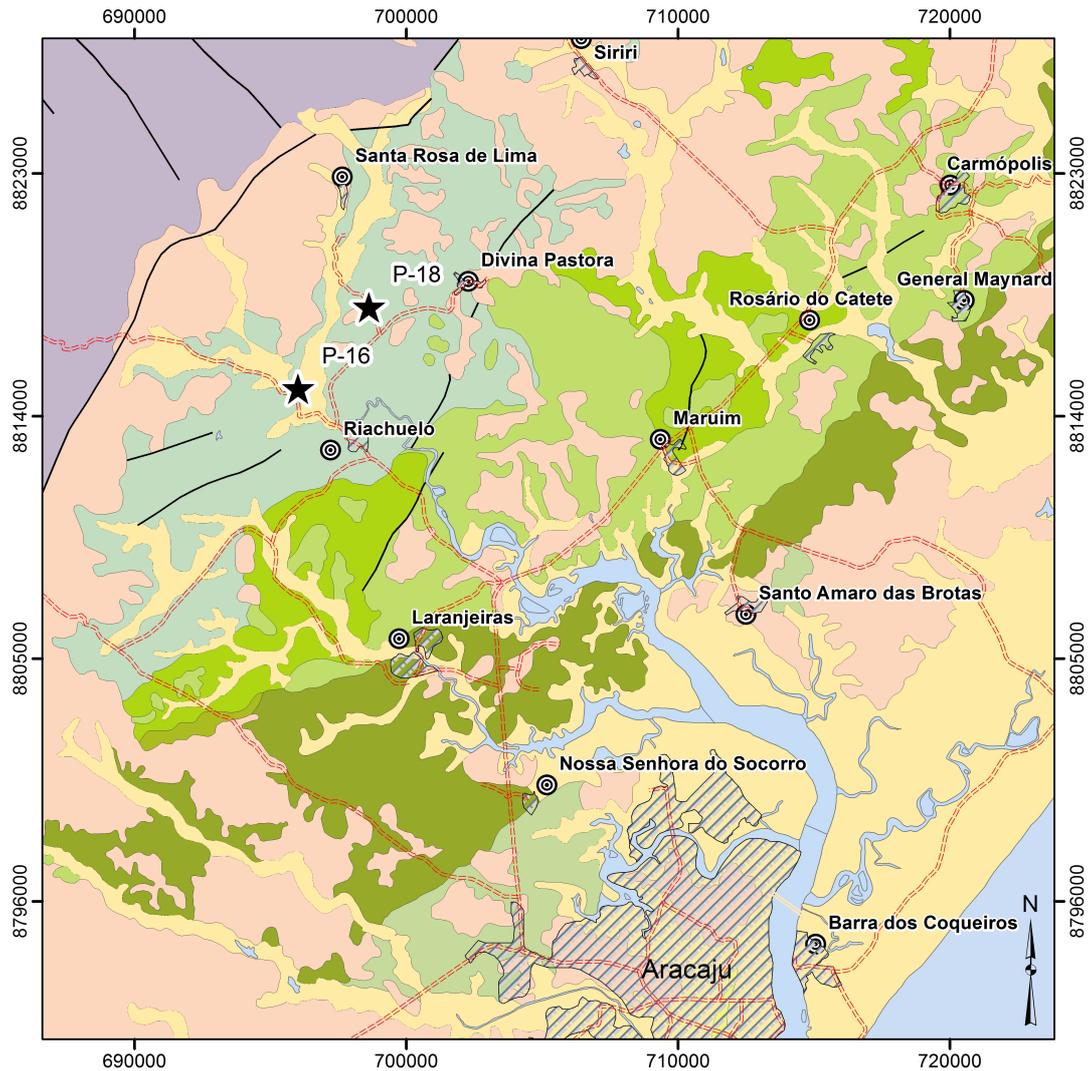
O estágio drifte começou no Eomesoalbiano, porém a sedimentação marinha já havia sido estabelecida desde o Neoaptiano (Formação Riachuelo). A sedimentação ocorreu numa plataforma carbonática ampla e rasa. O estágio final de evolução das bacias marginais brasileiras resultou no rompimento efetivo da crosta continental entre o Brasil e a África com a geração de crosta oceânica, estabelecendo condições marinhas francas (Ponte & Asmus 1976). A deposição de uma megassequência carbonática teve início durante o Neoaptiano-Eoalbiano, em condições de clima quente e seco (Chang *et al.* 1990; Dias Brito 1982). As condições vigentes neste momento condicionaram a geração de extensas plataformas carbonáticas de alta energia, intercaladas com sistemas clásticos do tipo fan-delta.

Na BSA, esta mega sequência permaneceu submetida a um controle tectônico ativo, atuante durante todo o Albiano (Koutsoukos *et al.* 1993; Wanderlei Filho & Destro 1994), que favoreceu a deposição dos sedimentos da Formação Riachuelo. Nos altos estruturais da bacia, bancos oolítico-oncolíticos associados a biolitos algálicos constituíram o Membro Maruim. Nas calhas dos semi-grábens, condições marinhas profundas geraram os calcilitos do Membro Taquari. Próximo às bordas da bacia, leques subaquosos formados por um misto de clásticos grossos e carbonatos formaram os depósitos turbidíticos proximais do Membro Angico (Cainelle *et al.* 1987; Koutsoukos *et al.* 1991).

### **II.3 – FORMAÇÃO RIACHUELO**

A Formação Riachuelo (Campbell 1948 *apud* Feijó 1995) aflora na cidade homônima, em Sergipe (Fig. 4), e foi originalmente denominada de Formação Riachuelo-Maruim. Esta formação contém os primeiros sedimentos depositados sob condições marinhas na Bacia de Sergipe-Alagoas. Ela é subdividida em três membros: Angico, Taquari e Maruim. Representa uma das poucas formações na bacia sedimentar da margem continental brasileira, onde há uma seção de carbonato de afloramentos *onshore*, fornecendo um modelo para analogia com as outras formações semelhantes. Por outro lado, a seção de carbonato do Albiano sucede de um intervalo de evaporito relacionado com importantes execuções petrolíferas em quase todas as bacias marginais no Brasil.

As rochas da Formação Riachuelo, representam um exemplo de sedimentação carbonática relacionada à fase drifte. As pedreiras Carapeba e Brejo exibem os melhores afloramentos *onshore* da seção carbonática drifte em toda margem continental brasileira.



**Legenda**

- ★ Pontos\_Amostras
- Fallhas/Fraturas

**Formações Superficiais Continentais**

- Cenozoico**
- Depósitos Quaternários
  - Grupo Barreiras

**Bacias Sedimentares**

**Mesozoico**

- Formação Calumbi
- Formação Cotinguiba
- Membro Aracaju
- Membro Sapucari
- Formação Riachuelo
- Membro Angico
- Membro Maruim
- Membro Taquari

**Faixa Sergipana**

**Neo-Mesoproterozoico**

- Formações Frei Paulo, Ribeirópolis, Olhos D' água, Itabaiana

**Planimetria**

- Área Urbana
- cidade
- Estrada Pavimentada



**Figura 4.** Mapa geológico simplificado da região de estudo, após Santos *et al.* (1997).

A Formação Riachuelo mostra evidências de deposição que ocorre em ambientes de plataforma rasa, fortemente controlados pela estrutura basal, representado por bancos oncoidal-oolítico arenosos associados a algas bioconstruções, cunhas clásticas, que compreendem depósitos mistos de carbonato e sedimentos terrígenos depósitos de fan-deltas, bem como os depósitos de origem pelíticas lagunar (Cainelli *et al.* 1987; Feijó & Vieira 1991; Koutsoukos *et al.* 1993).

## **II.4 – MEMBRO ANGICO**

O Membro Angico (Fig. 4) é composto por conglomerados e arenitos siliciclásticos e bioclásticos, com uma transição quase completa entre rochas essencialmente siliciclásticas a predominantemente bioclásticas. O ambiente deposicional é interpretado como leques subaquosos, porém ambientes costeiros rasos também podem ser inferidos. A distribuição do Membro Angico possui forte controle tectônico (Lana 1994).

Neste membro, selecionou-se durante os trabalhos de campo dois afloramentos, P-16 e P-18 (Fig. 4), para se estudar a proveniência dos zircões:

- **Afloramento P-16** – [Coordenadas UTM: 0696036W/8815018S]  
Localizado na estrada da Fazenda Piedade-Usina Central, ocorre sob a forma de um corte de morro, sendo composto por conglomerados e arenitos. O afloramento mostra uma geometria acanalada, apresentando uma gradação normal de rochas de granulação mais fina em direção ao topo (Foto 1). Os ortoconglomerados são polimíticos, com seixos de quartzo e quartzito (Foto 2), de tamanhos variados 2 a 30 cm.



**Foto 1.** Gradação normal da rocha (Afloramento P-16).



**Foto 2.** Ortoconglomerado polimítico com seixos de quartzo e quartzito (Afloramento P-16).

Seguindo a direção norte, cerca de 20 m depois encontra-se um arenito mais fino, com a presença de oncólitos como bioclastos (Foto 3). No topo do arenito tem-se um nível conglomerático marcando a base do canal. Localmente o arenito é maciço, sem estrutura interna, porém os oncólitos estão alinhados.

- **Afloramento P-18** – [Coordenadas UTM: 0698637W/8818040S] Corte em ambos os lados da estrada Bonfim-Santa Rosa de Lima, após a base do poço da Petrobras RO-5. Formado por arenitos de coloração cinza amarelada (Foto 4), localmente conglomeráticos. Ocorrem intercalados folhelhos de coloração escura (marrons e cinzas). Observa-se a presença de níveis fossilíferos, com oncólitos.



**Foto 3.** *Nível com oncólitos alinhados (Afloramento P-16).*



**Foto 4.** *Arenitos de coloração amarela. (Afloramento P-18).*

## Capítulo III – REFERENCIAL TEÓRICO DO MÉTODO LA-ICP-MS

---

### III.1 – ZIRCÃO

O zircão ( $ZrSiO_4$ ) é um mineral acessório comum, estável e frequentemente encontrado em assembleias de minerais pesados em arenitos e conglomerados de bacias sedimentares de todas as idades. Ele é um ortossilicato tetragonal, cujos tetraedros de  $SiO_4$  dividem bordas com dodecaedros de  $ZrO_8$  em uma estrutura fechada (Klein & Dutrow 2007).

Este mineral é quimicamente resistente e refratário, sobrevivendo aos processos de intemperismo, transporte, diagênese e em grande parte do campo do metamorfismo. O zircão é um mineral de elevada resistência aos processos físicos e químicos naturais, sendo frequente entre os minerais detríticos registrados na maior parte dos depósitos sedimentares. Ele resiste também às transformações de alta temperatura como as hidrotermais e metamórficas. A baixa velocidade de difusão intracristalina dos íons na estrutura do zircão favorece a preservação de sua composição química e isotópica durante a maior parte dos processos geológicos (Belousova *et al.* 2002).

Essas propriedades fazem do zircão um mineral de grande importância em estudos de proveniência e geocronologia, conforme discutidos por vários autores (Morton 1985; Morton & Hallsworth 1994; Addad 2001; Belousova *et al.* 2002). Ademais, rochas ígneas e metamórficas frequentemente contêm cristais de zircão com idades anteriores a de sua cristalização magmática, provenientes de encaixantes parcialmente assimiladas ou de seu protólito.

As análises de elementos traços e isótopos por microsonda iônica, espectrometria de massa por plasma com canhão de laser e microscopia eletrônica de varredura - MEV são técnicas complementares amplamente utilizadas em estudos de proveniência, permitindo que um considerável número de espécies de minerais pesados seja empregado para este fim. Assim, as análises geoquímicas em um único grão mineral podem não só auxiliar na identificação da proveniência, a partir das variações composicionais detectadas nos grãos minerais, como também adicionar um considerável grau de sofisticação na sua determinação.

## **III.2 – ESPECTROMETRIA DE MASSA**

### **III.2.1 – Histórico**

De acordo com Sylvester (2001, 2008) a denominação de espectrógrafo de massa foi utilizada pela primeira vez por Aston & Dempster em 1918 e em 1919 respectivamente, em pesquisas desenvolvidas para medição das massas dos elementos da tabela periódica. A datação de eventos geológicos baseada em isótopos radioativos começou com Nier no final da década de 30 com base nos estudos dos isótopos de U, Th e Pb. Nier observou que dependendo da composição química e da idade, as composições isotópicas de Pb variavam. Em 1948, Aldrich e Nier observaram que as composições isotópicas de Ar e Ca alteravam devido ao decaimento radioativo de K. Desta forma, nascia a geocronologia com base nestes dois métodos no início dos anos 1950.

O desenvolvimento do espectrômetro de massa iniciou-se com a descoberta da radiatividade no final do século XIX. A primeira medição foi realizada por Thompsom que identificou dois isótopos com pesos atômicos 20 e 22 na luz néon. Nier modificou o espectrômetro de massa de setor magnético de 180° para 60°. Esta mudança não só reduziu o peso e o consumo de energia do eletroímã, mas também melhorou a forma do feixe de íons junto ao coletor. A redução do preço tornou o equipamento mais acessível para um grande grupo de cientistas. Além disso a arquitetura do espectrógrafo de massa foi melhorada posteriormente na década de 1930 quando as medidas das massas dos elementos e suas abundâncias tornaram-se possíveis. Desde então os espectrômetros de massa têm evoluído como importante ferramenta em pesquisas nas áreas de física, química, biologia e geologia.

Ressalta-se que o nome espectrômetro de massa (MS – *Mass Spectrometry*) é um equívoco, pois não se mede massa. Uma balança eletrônica ou mecânica é utilizada para medir a massa. Um espectrômetro de massa requer íons que são, subsequentemente, separados com base na sua razão massa por carga; o MS determina as razões entre estes íons.

### III.2.2 – Componentes do Espectrômetro de Massa

Os modernos espectrômetros de massa, desenvolvidos a partir do equipamento construído por Nier consistem em três partes essenciais (Gill 1997): (i) uma fonte de feixe de íons positivos, (ii) analisador magnético, e (iii) um coletor de íons:

- **Fonte de Feixe de Íons:** é o local os íons são criados, acelerados, direcionados e focados afim de aumentar a intensidade do feixe. É um sistema englobando três ou mais regiões com diminuição sucessiva de pressão onde o plasma produzido no ICP é “sugado” devido a diferença de pressão. Esse sistema é muito importante, pois quanto menor a pressão, menor o número de colisões entre as partículas e maior a certeza nas medidas.
- **Analisador de Massa:** região do MS onde ocorre a separação dos íons de acordo com a relação massa sobre carga eletrônica dos diferentes elementos. Inicialmente, os espectrômetros utilizavam o Analisador por Setor Magnético (MSA), que consistia em submeter os íons a um campo magnético, onde ocorre a separação dos elementos. Atualmente, existem outros tipos de analisadores, como o MSA associado ao Analisador Eletrostático (ESA), onde as partículas passam por campos magnético e elétrico, respectivamente; O analisador por Tempo de Viagem (TOF); e o analisador de Quadrupolos (QUAD). Além disso, pode-se acoplar um Coletor Simples ou um Coletor Múltiplo (MC) ao equipamento.
- **Detector:** é um transdutor que transforma a corrente iônica em uma série de pulsos elétricos ou em um potencial (voltagem) que pode ser convertido em um valor numérico para a aquisição no computador. A aquisição geralmente é feita por multiplicação de elétrons e é utilizado o coletor de Faraday, que pode ser único ou múltiplo.

Os espectrômetros de massa trabalham com íons positivos ou negativos de elementos ou espécies moleculares em um sistema de ultra-alto vácuo, de  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  mbar. A ionização da amostra é fundamental, pois é necessário acelerar a massa no analisador que, por sua vez, faz a deflexão de íons em função da massa, da velocidade e da intensidade de campos elétricos e/ou magnéticos. Amostras sólidas ou gasosas podem ser analisadas dependendo da arquitetura da fonte de íons.

Para análise da massa de uma amostra gasosa, é necessário ionizar, no interior da fonte, as moléculas pelo bombardeamento com elétrons. Esta ionização é obtida através da produção de um feixe de elétrons, a partir de um filamento de tungstênio ou rênio a temperatura de  $2000^{\circ}\text{C}$  e energia da ordem de 70 eV. Os íons resultantes carregados positivamente, são acelerados por um campo de alta voltagem e são dirigidos a pequenas janelas de forma a serem reunidos em feixes.

Em amostras sólidas, o elemento é depositado diretamente sobre um filamento e inserido junto à fonte iônica, ou seja, fonte de ionização térmica. Sob o vácuo no interior do espectrômetro de massa, o filamento é aquecido através da passagem de corrente elétrica. Este aquecimento provoca a vaporização do elemento depositado, gerando partículas carregadas positivamente que são aceleradas para o interior do campo eletromagnético ao passarem pelas janelas de colimação. Os filamentos podem ser compostos de Ta, Re ou W, Pt e Th dependendo da temperatura necessária para a ionização da amostra. Os íons resultantes são então acelerados e reunidos em feixes, como no caso da amostra gasosa (Gill 1997).

### **III.3 – PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO**

Plasma é definido como o alto estado de energia de um gás no qual praticamente todos os átomos e moléculas são ionizados. Para iniciar o protoplasma, um fluxo de gás é semeado com elétrons livres oriundos de uma faísca de alta tensão de enorme potencial capaz de vencer a resistência dielétrica do gás.

O plasma é mantido por meio de campo elétrico e magnético flutuante produzido pelo gerador de onda de rádio, com frequência (RF) da ordem de 40 MHz, que é produzida dentro de uma bobina de carga ("load coil"). Estes campos acoplam as energias no plasma por meio de aceleração de elétrons livres da periferia para uma zona interna da bobina de carga. Esta zona é conhecida como a região de adição de energia. A energia é então transferida para outra espécie de plasma por meio de colisão. O gás de argônio atinge uma temperatura de 6000 a 8000°K na porção central do plasma para um fluxo de 0,7 litros por minuto e uma pressão de 1,25 bar. Devido ao alto estado de energia do plasma, as moléculas injetadas dentro da tocha são quebradas, em seus elementos químicos constituintes que, por sua vez, são ionizados (Gill 1997).

A técnica de plasma indutivamente acoplada ("*Inductively Coupled Plasma*" - ICP) produz com maior eficiência o feixe de íons, que são analisados por meio de espectrometria de massas (ICP-MS). Uma outra vantagem do ICP em relação às outras formas de ionização é quanto ao mecanismo de introdução de amostra, que se dá através do processo clássico de nebulização ou injeção de átomos ou moléculas liberados por abrasão à laser. Em ambos os casos, a introdução de amostras é operada em condições de pressão ambiental. Existem muitos outros tipos de espectrômetros de massa, que utilizam uma grande variedade de meios e mecanismos para a produção de íons. A introdução de amostras no ICP pode ser feita de duas maneiras. No primeiro modo, a solução da amostra é preparada através do sistema químico convencional e, no segundo, é usada a técnica de abrasão de amostras sólidas por meio de laser.

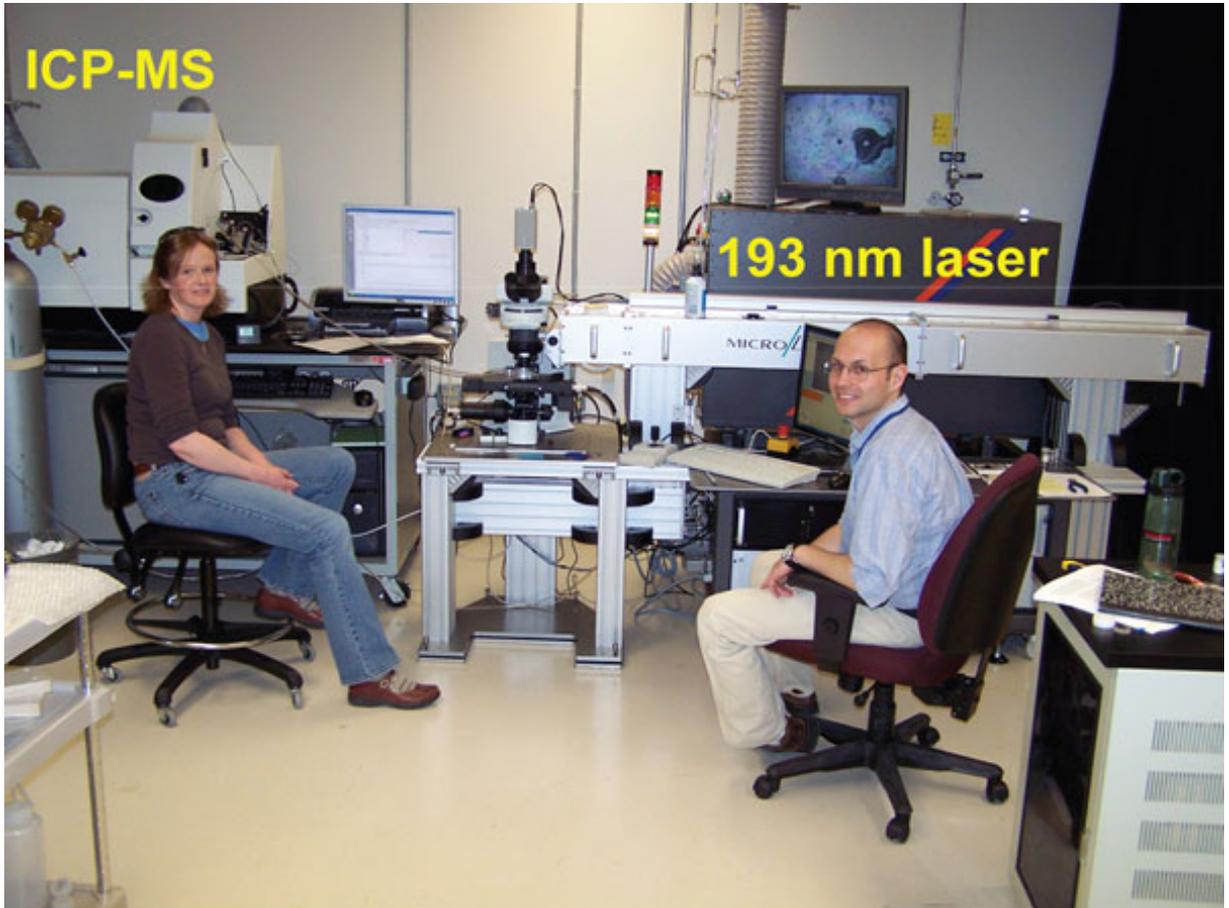
- *Sistema Químico:* a amostra é dissolvida em reagente químico apropriado, por exemplo, HNO<sub>3</sub>, HCl, HF, etc, e os elementos químicos de interesse são, quando requerido, concentrados em uma coluna de troca iônica. A solução contendo os elementos é injetada na tocha do plasma ("plasma torch"). Os principais componentes do mecanismo para introdução de amostra em solução líquida são sistema de nebulizador, bomba "peristáltica", câmara tipo "spray" e tocha.

- *Ablação à Laser ("Laser Ablation" - LA):* é uma das técnicas de microsonda que normalmente utiliza um laser UV de Nd YAG de 266 ou 211 nm, em geral, de forma pulsada. Atualmente existe feixe de laser com comprimento de onda de 193 nm (*Excimer Lambda*) extremamente homogêneo e com o diâmetro que pode variar entre 125 a 5 µm (Fig. 5). Os componentes abrasados são arrastados/transportados por meio de um fluxo de gás de Ar/He (o mesmo utilizado no plasma) para o interior da câmara "spray". Opcionalmente para o caso de zircão, pode-se inserir componentes abrasados que são injetados simultaneamente com uma solução de "spike" na câmara de "spray" acoplado ao "plasma torch". Neste caso, é necessário ter uma dupla entrada.

### **III.4 – LA-ICP-MS**

A primeira parte do LA-ICP-MS (Foto. 5) é o sistema de introdução de amostras por ablação a laser (LA) que consiste de um laser com a óptica associada, uma célula de ar comprimido adequada para conter a amostra, e tubos para transportar a amostra para o plasma indutivamente acoplado ICP, através de um fluxo de gás. A amostra é transformada pelo laser em um aerossol de partículas pequenas que são transportadas num fluxo de gás para o ICP. Neste equipamento, o gás é aquecido até uma temperatura elevada, formando um plasma, que é um líquido semelhante a um gás, mas que contém um grande número de elétrons livres e íons.

A amostra em aerossol é transportada para o plasma, onde ela é vaporizada e atomizada, convertendo a substância em partículas muito pequenas ou gotículas onde finalmente é ionizada.



**Foto 5.** Foto do LA-ICP-MS (USGS 2015).

A próxima parte do equipamento, o espectrômetro de massa (MS), que opera no vácuo, separa esses íons com base em sua massa e carga de rádio. A intensidade desse feixe de íons é convertida num sinal elétrico que é medido e registrado. A carga de massa identifica a composição elementar e a intensidade está relacionada funcionalmente à concentração. Uma das características especialmente atraentes do LA-ICP-MS, de técnicas combinadas, é que o LA é otimizado para a amostragem, o ICP para a produção de íons e o MS para separar os íons. Estes processos não são totalmente independentes e a otimização é um processo multidimensional.

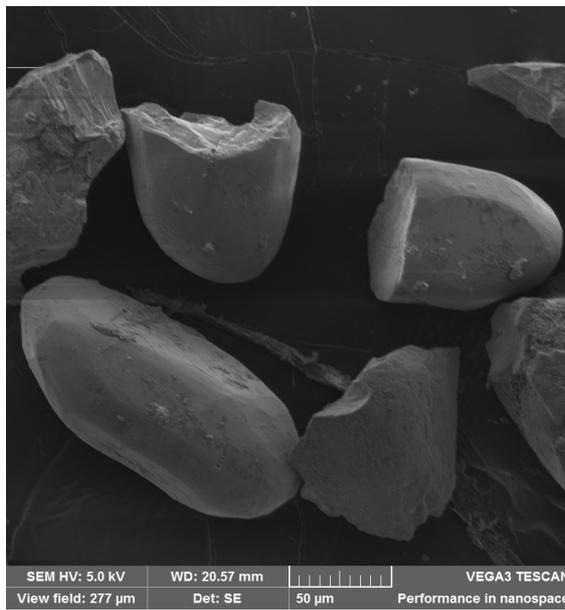
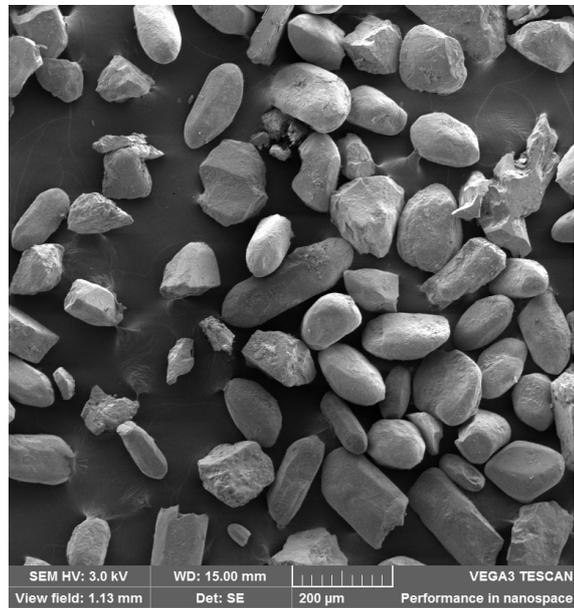
## Capítulo V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

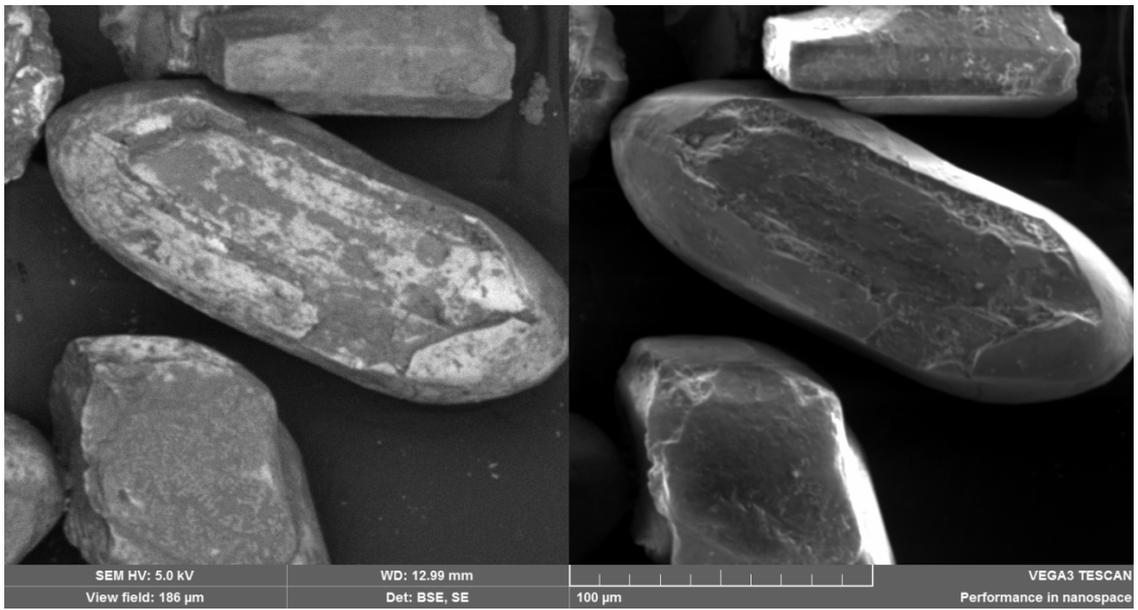
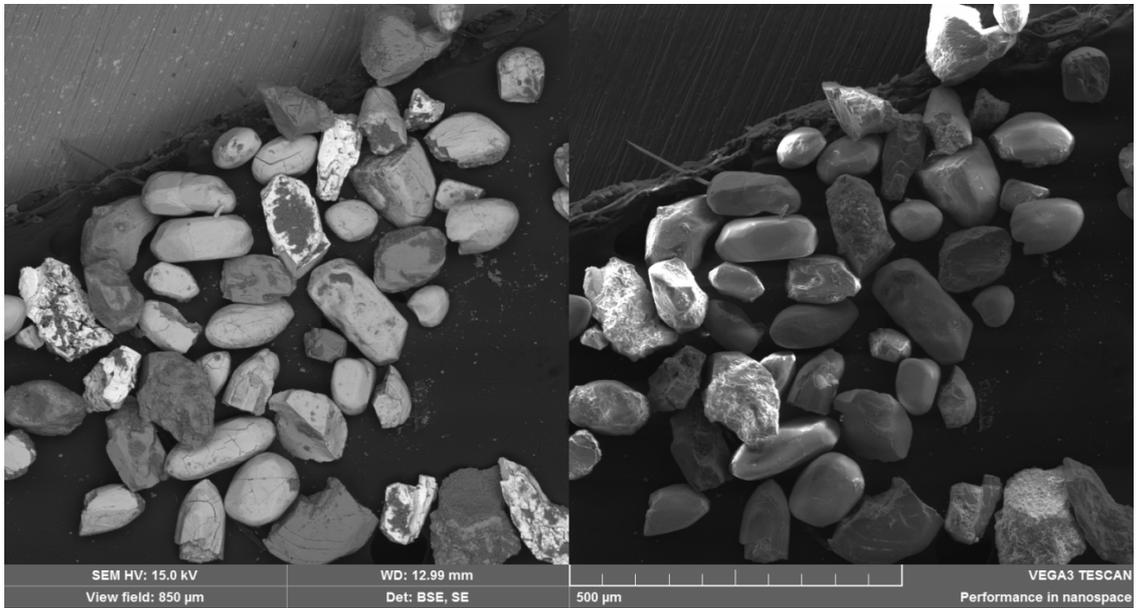
## IV.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS COM O MEV

Os concentrados de zircão das amostras P-16 e P-18 (Figs. 5 e 6) foram observados em MEV. Em ambos os resultados identificou-se a presença de titanita, granada e epídoto em quantidades menores que àquela do zircão e, em volumes ainda mais inferiores, foram encontrados cristais de ilmenita, rutilo, monazita e quartzo.

- **Amostra P-16:** apresenta cristais e fragmentos de zircão de tamanhos variando entre 70  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$ , com predomínio de grãos em torno de 100  $\mu\text{m}$  (Fig. 5). O grupo predominante apresenta hábito prismático, com prismas curtos com razões 3:1, com os vértices arredondados e que se assemelham às classes  $S_{19}$  e  $S_{24}$  segundo a nomenclatura de Pupin (1980). De forma subordinada encontram-se cristais prismáticos mais alongados, razões 6:1 que possui semelhanças com as classes  $P_4$  e  $P_5$  de Pupin (1980). Os fragmentos de cristais (Fig. 5) são consistentes com a classe dominante de prismas curtos. As faces geralmente arredondadas e os cristais quebrados são característicos de processos de rolamento.
- **Amostra P-18:** ocorrem fragmentos de cristais, estes últimos de granulometria variando entre 50  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , predominando grãos com tamanhos em torno de 100  $\mu\text{m}$  (Fig. 6). O grupo predominante apresenta hábito prismático, com prismas curtos com razões 3:1 ou 4:1, com os vértices arredondados e que se assemelham as classes  $S_{18}$ ,  $S_{19}$  e  $S_{23}$  em acordo com a classificação de Pupin (1980). Subordinadamente observam-se cristais de hábitos mais arredondados, que têm formatos esféricos (Fig. 6), e ainda é possível observar resquícios de faces cristalinas, corroborando que este seja seu hábito original e não produto de retrabalhamento. Estes grãos assemelham-se as classes  $S_{20}$  e  $S_{25}$  segundo a nomenclatura Pupin (1980). As faces quebradas e arredondadas indicam transporte, ou podem refletir o quebramento dos cristais durante o processo de preparação da amostra.



**Figura 5.** Imagens MEV de cristais de zircão da amostra P-16.



**Figura 6.** Imagens MEV de cristais de zircão da amostra P-18.

## IV.2 – IDADES U-Pb DOS ZIRCÕES DETRÍTICOS

Os resultados obtidos na datação de cristais de zircão pelo método U-Pb são descritos a seguir. Por apresentarem maior concordância, as razões  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  foram utilizadas para idades de até 1300 Ma, e as acima desta foram usadas as razões  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

Os dados são apresentados: (i) em histogramas de frequência *versus* idades, concordância de  $100 \pm 10\%$ ; e (ii) e no diagrama da Concórdia. Foram realizadas 82 análises isotópicas, 35 na amostra P-16 e 47 na P-18.

### IV.2.1 Idades dos Zircões Detríticos da Amostra P-16

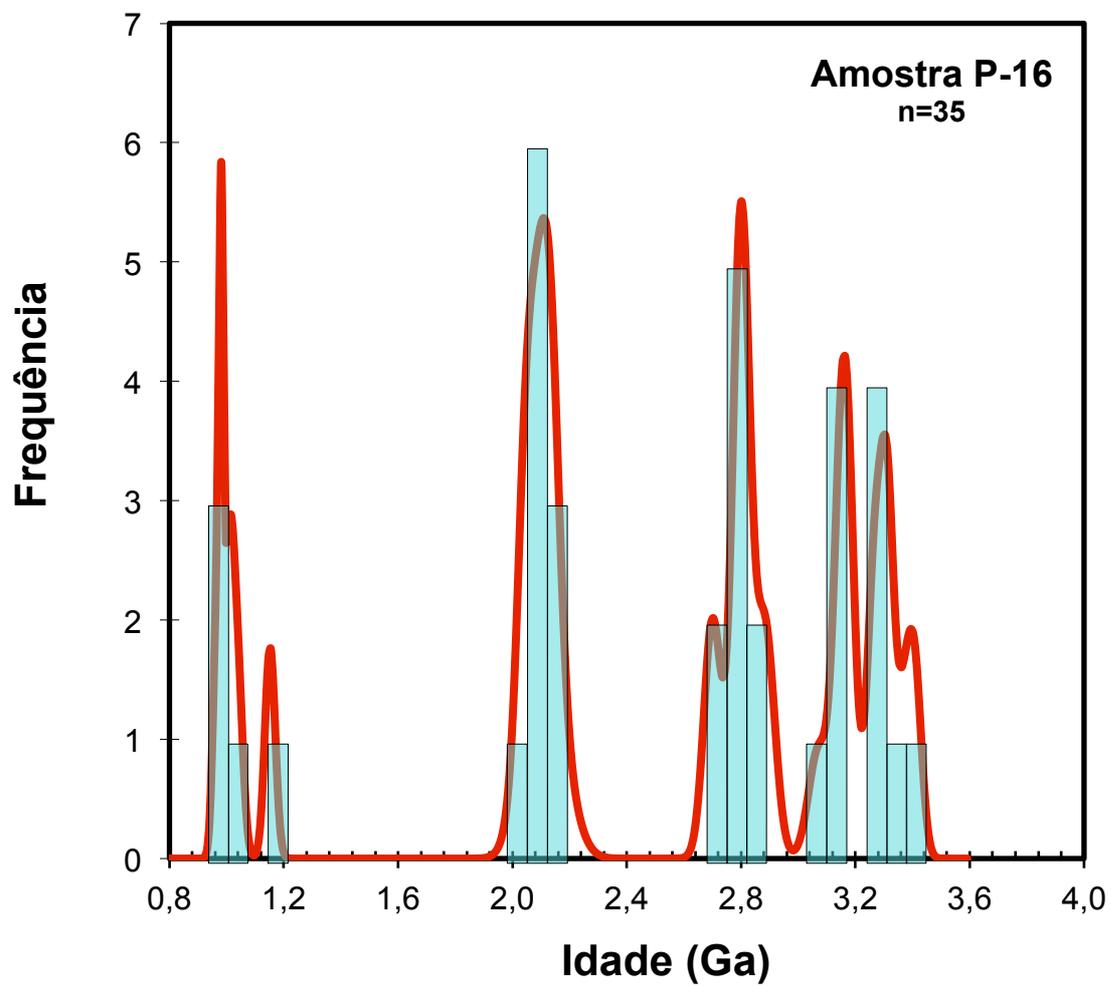
As 35 análises (Tab. 1) realizadas nos zircões detríticos da amostra P-16 mostraram um amplo intervalo de idades, do Neoproterozoico (968 Ma) ao Paleoarqueano ( $3409 \pm 24$  Ma) e uma alta porcentagem de concordância (entre 91 a 100%) com uma média de 96,5% (Tab. 1). No histograma de idades (Fig. 7) fica evidenciado quatro conjuntos de idades: 968 a 1152 Ma (C1), 2041 a 2169 Ma (C2), 2696 a 2892 (C3) e 3071 a 3409 Ma (C4).

A idade  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  mais nova obtida foi de 968 Ma (98% de concordância) e o grupo mais jovem encontra-se 968 Ma a 1152 Ma (Figs. 7 e 8), com apenas duas idades neoproterozoicas (968 Ma e 982 Ma) e três mesoproterozoicas (1009 a 1152 Ma). Está é o menor grupo encontrado, representando 14% do total de análises. As idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  paleoproterozoicas (Figs. 7 e 8) situam-se no intervalo de 2041 Ma a 2169 Ma, e representam 29% dos dados obtidos.

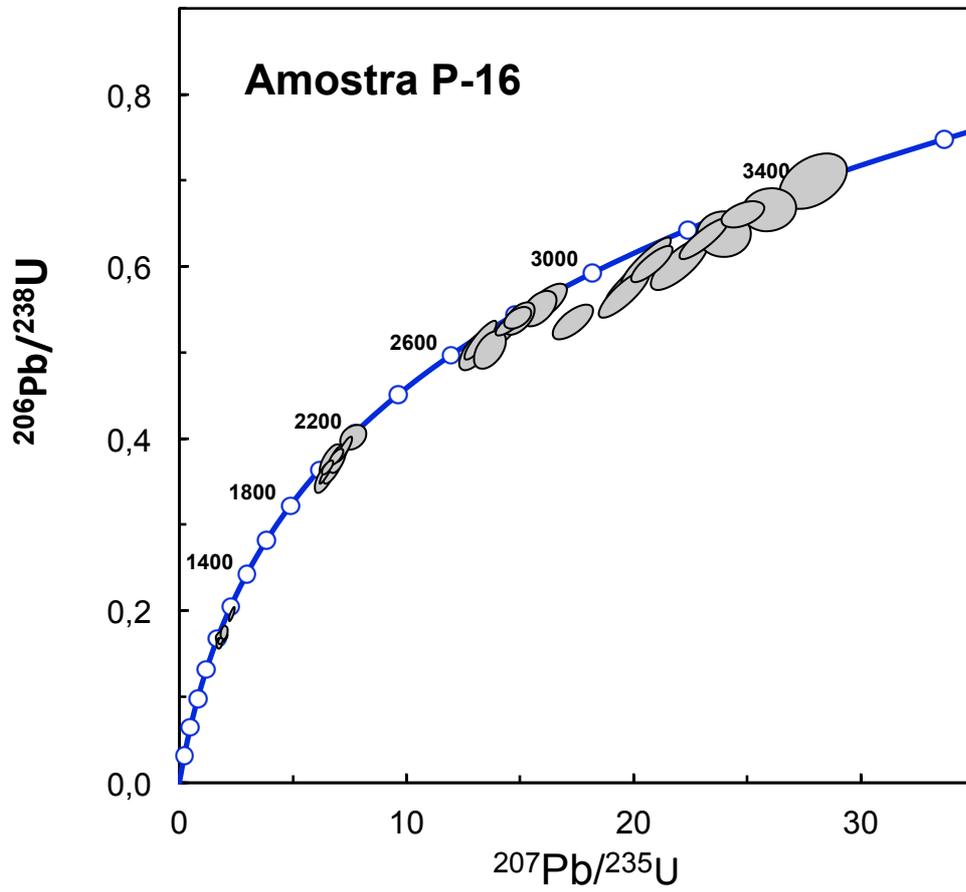
Os zircões arqueanos (Figs. 7 e 8) são os mais abundantes (57% do total) e possuem idades entre 2696 Ma a 3409 Ma, sendo que o cristal mais antigo apresenta uma concordância de 100% (Tab.1, Fig. 8). Estes apresentam dois conjuntos de abundâncias similares, o C3 que possui nove idades (2696 Ma a 2892 Ma), e o C4 com dez análises (3071 Ma a 3409 Ma).

**Tabela 1.** Idades U-Pb (LA-ICP-MS) dos zircões detríticos da amostra P-16. Concordância (Con).

CONJUNTO	Spot	Idades (T) - Ma				Con (%)
		T <sub>206/238</sub>	1 sigma	T <sub>207/206</sub>	1 sigma	
<b>C1 [14%]</b>	6,1	<b>968</b>	14	1000	55	96
	25,1	<b>982</b>	8	1018	35	96
	25,2	<b>1009</b>	15	1022	122	98
	35,1	<b>1036</b>	19	1084	74	95
	37,1	<b>1152</b>	18	1191	44	96
<b>C2 [29%]</b>	20,1	2017	16	<b>2041</b>	27	98
	38,1	1966	36	<b>2063</b>	46	95
	40,1	2048	39	<b>2064</b>	51	99
	43,1	2006	32	<b>2066</b>	34	97
	24,1	2074	18	<b>2088</b>	33	99
	36,1	2013	35	<b>2120</b>	49	94
	26,1	2060	30	<b>2122</b>	33	97
	47,1	2080	35	<b>2131</b>	39	97
	29,1	2115	29	<b>2136</b>	29	99
	16,1	2181	27	<b>2169</b>	55	100
<b>C3 [26%]</b>	49,1	2680	40	<b>2696</b>	28	99
	27,1	2630	41	<b>2710</b>	35	97
	41,1	2632	39	<b>2785</b>	23	94
	18,1	2765	25	<b>2793</b>	30	99
	42,1	2740	41	<b>2801</b>	27	97
	17,1	2789	22	<b>2811</b>	25	99
	10,1	2787	32	<b>2819</b>	28	98
	2,1	2833	36	<b>2878</b>	31	98
	9,1	2865	38	<b>2892</b>	34	99
<b>C4 [31%]</b>	13,1	2770	36	<b>3071</b>	35	90
	48,1	2995	47	<b>3143</b>	27	95
	44,1	3053	47	<b>3151</b>	26	96
	45,1	2906	44	<b>3173</b>	25	91
	11,1	3047	35	<b>3177</b>	28	95
	4,1	3166	39	<b>3267</b>	29	96
	39,1	3044	47	<b>3268</b>	24	93
	22,1	3277	24	<b>3311</b>	22	98
	33,1	3186	43	<b>3313</b>	25	96
	7,1	3295	39	<b>3371</b>	27	97
	50,1	3421	50	<b>3409</b>	24	100



**Figura 7.** Diagrama Frequência *versus* Idade (Ga) dos zircões detríticos da amostra P-16.



**Figura 8.** Diagrama Concórdia aplicado aos zircões detriticos da amostra P-16.

#### **IV.2.2 Idades dos Zircões Detríticos da Amostra P-18**

As 47 análises (Tab. 2) realizadas nos zircões detríticos na amostra P-18 as idades variam do Neoproterozoico (901 Ma) ao Paleoarqueano ( $3468 \pm 29$  Ma), e com uma alta porcentagem de concordância entre 90 e 106%, e uma média de 99,5%. Observa-se no histograma (Fig. 9) cinco conjuntos de idades: 901 Ma a 1094 Ma (C1), 1439 Ma a 1508 Ma (C2), 1762 Ma a 2467 Ma (C3), 2603 Ma a 2870 Ma (C4) e 2953 Ma a 3468 Ma (C5).

Nesta amostra a idade  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  mais nova obtida foi de 901 Ma (90% de concordância) e o grupo mais jovem encontra-se 901 Ma a 1094 Ma (Figs. 9 e 10), possuindo duas idades neoproterozoicas (901 Ma e 928 Ma) e duas mesoproterozoicas (1013 Ma e 1094 Ma), representa 8,5% do total de análises.

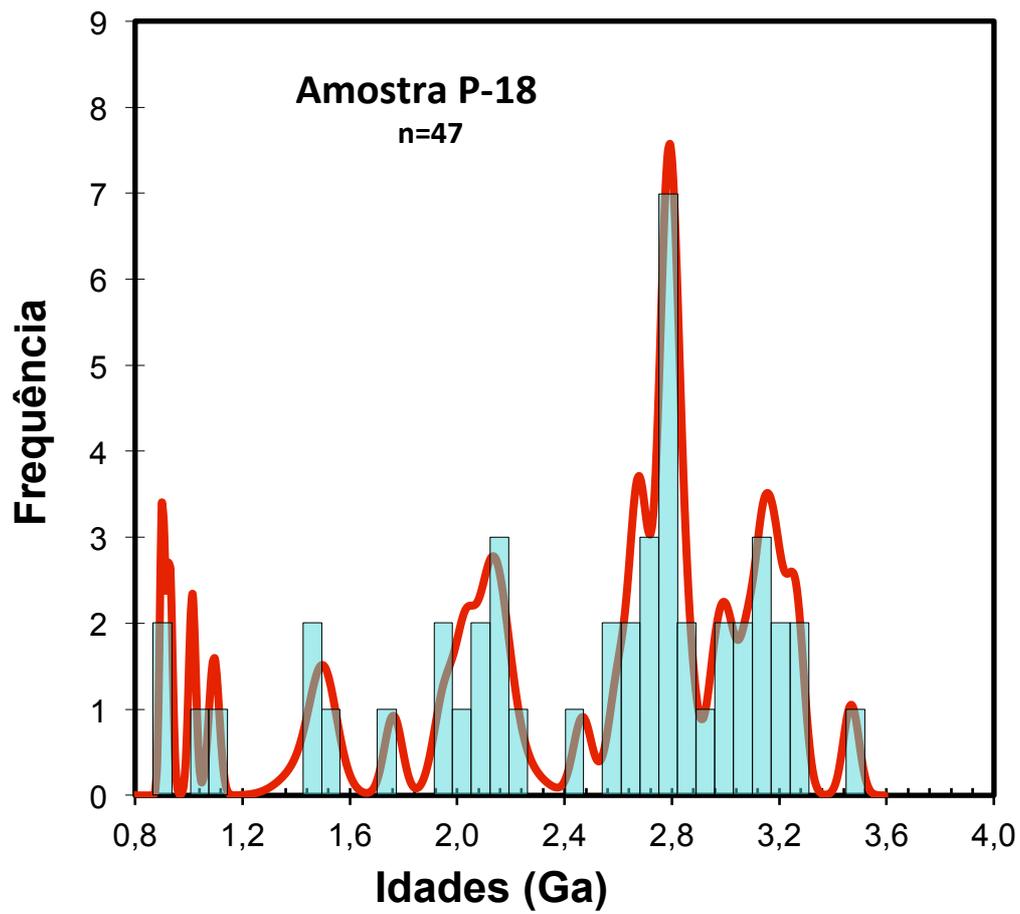
O segundo conjunto é o menos representativo (6,5 %), possui idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  mesoproterozoicas de 1439 Ma a 1762 Ma representam o segundo grupo mais jovem de zircão detrítico. E este intervalo de idades não é observado na amostra P-16.

O conjunto três somente possui idades paleoproterozoicas entre 1762 Ma a 2467 Ma, este grupo representa cerca de 23% do total das análises.

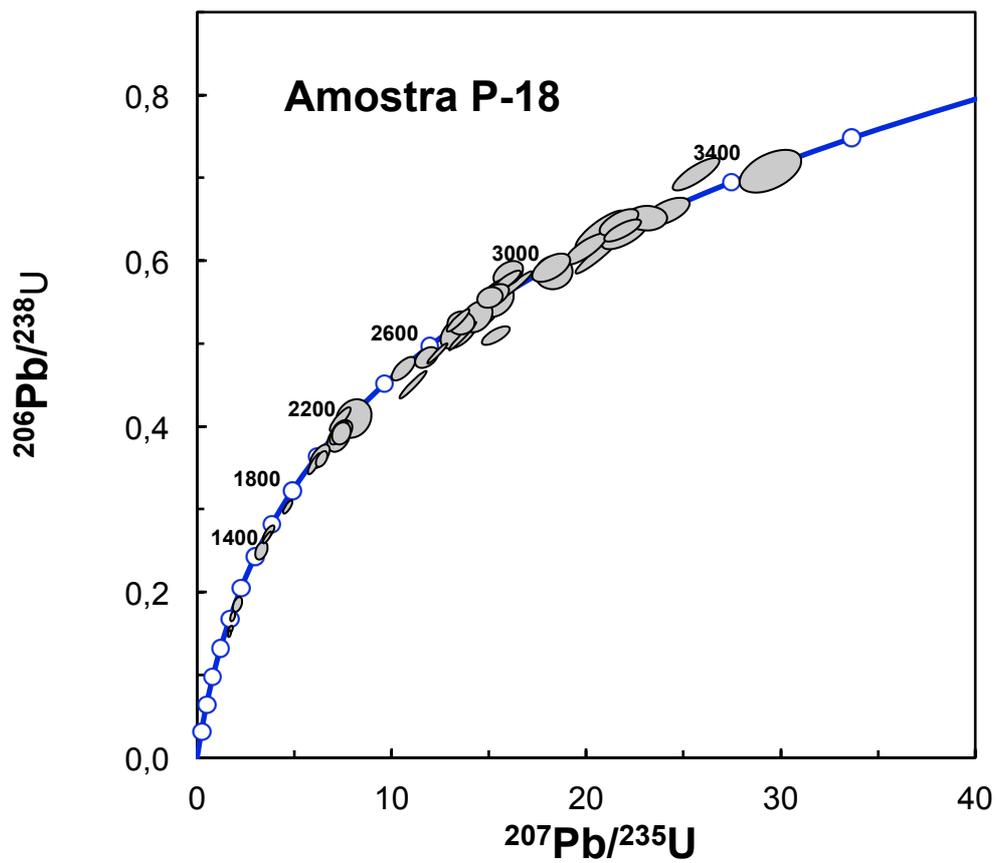
De forma similar a amostra P-16, a maioria das idades determinadas na P-18 encontra-se no Arqueano (62%), onde existem dois conjuntos o C4 e C5. O conjunto quatro (2603 Ma a 2870 Ma) é o mais representativo concentrando 34% das idades determinadas, e abrange do Neoarqueano ao Mesoarqueano. O C5, meso a paleoarqueano (2953 Ma a 3468 Ma), é o segundo mais abundante com 28% do total das análises.

**Tabela 2.** Idades U-Pb (LA-ICP-MS) dos zircões detríticos da amostra P-18. Concordância (Con).

Conjunto	Spot	Idades (T) - Ma				Con (%)
		T <sub>206/238</sub>	1 sigma	T <sub>207/206</sub>	1 sigma	
<b>C1 [8,5%]</b>	49,1	<b>901</b>	9	995	54	90
	49,2	<b>928</b>	11	956	73	97
	3,1	<b>1013</b>	13	970	66	104
	7,1	<b>1094</b>	19	1073	107	101
<b>C2 [6,5%]</b>	34,1	1437	23	<b>1439</b>	83	99
	23,1	1521	16	<b>1498</b>	46	101
	2,1	1548	19	<b>1508</b>	53	102
<b>C3 [23%]</b>	5,1	1708	17	<b>1762</b>	33	96
	29,1	1962	24	<b>1952</b>	39	100
	10,1	2003	28	<b>1986</b>	57	100
	25,1	1989	18	<b>2029</b>	33	98
	8,1	2212	27	<b>2066</b>	46	107
	31,1	2139	28	<b>2126</b>	43	100
	27,1	2106	31	<b>2143</b>	55	98
	20,1	2146	26	<b>2144</b>	53	100
	51,1	2134	26	<b>2162</b>	52	98
	36,1	2216	43	<b>2221</b>	84	99
9,1	2488	26	<b>2467</b>	34	100	
<b>C4 [34%]</b>	46,1	2546	22	<b>2603</b>	35	97
	47,1	2400	29	<b>2618</b>	51	91
	16,1	2567	21	<b>2662</b>	28	96
	24,1	2738	23	<b>2671</b>	28	102
	6,1	2726	24	<b>2698</b>	27	101
	37,1	2682	37	<b>2721</b>	42	98
	35,1	2658	30	<b>2759</b>	31	96
	32,1	2758	32	<b>2775</b>	32	99
	40,1	2853	21	<b>2779</b>	29	102
	17,1	2884	26	<b>2780</b>	30	103
	21,1	2970	26	<b>2799</b>	29	106
	33,1	2784	34	<b>2800</b>	33	99
	42,1	2864	22	<b>2800</b>	30	102
	45,1	2932	23	<b>2815</b>	30	104
38,1	2833	33	<b>2833</b>	31	100	
11,1	2914	29	<b>2870</b>	31	101	
<b>C5 [28%]</b>	43,1	2658	21	<b>2953</b>	30	90
	4,1	3003	29	<b>2987</b>	29	100
	30,1	2977	34	<b>3018</b>	29	98
	1,1	3090	30	<b>3082</b>	30	100
	18,1	3182	38	<b>3083</b>	40	103
	14,1	3218	26	<b>3132</b>	26	102
	28,1	3061	36	<b>3148</b>	31	97
	48,1	3183	22	<b>3168</b>	28	100
	13,1	3161	29	<b>3189</b>	27	99
	50,1	3236	24	<b>3222</b>	28	100
	19,1	3443	30	<b>3258</b>	28	105
	41,1	3272	27	<b>3272</b>	30	100
	39,1	3457	40	<b>3468</b>	29	99



**Figura 9.** Diagrama Frequência *versus* Idade (Ga) dos zircões detríticos da amostra P-18.

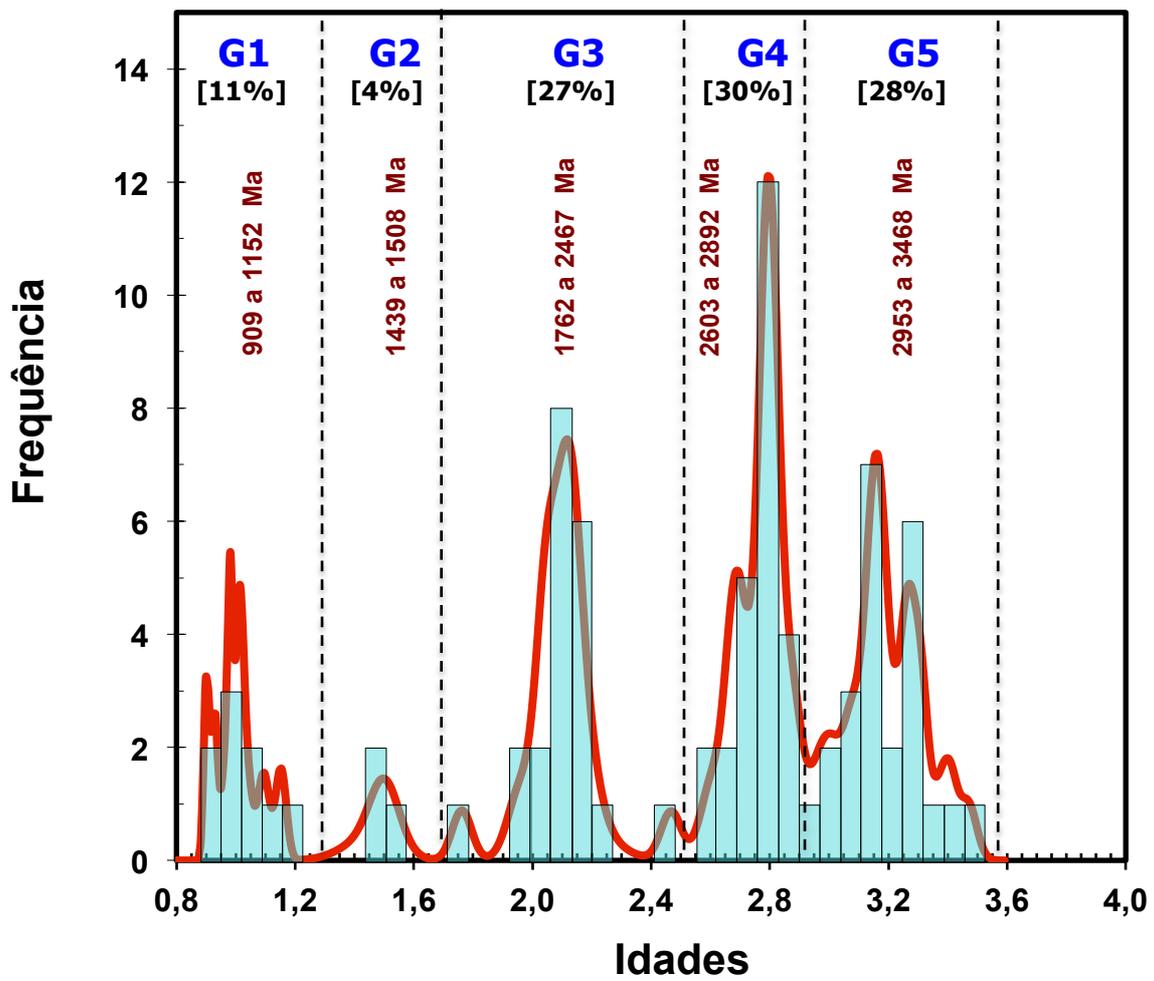


**Figura 10.** Diagrama Concórdia aplicado aos zircões detríticos da amostra P-18.

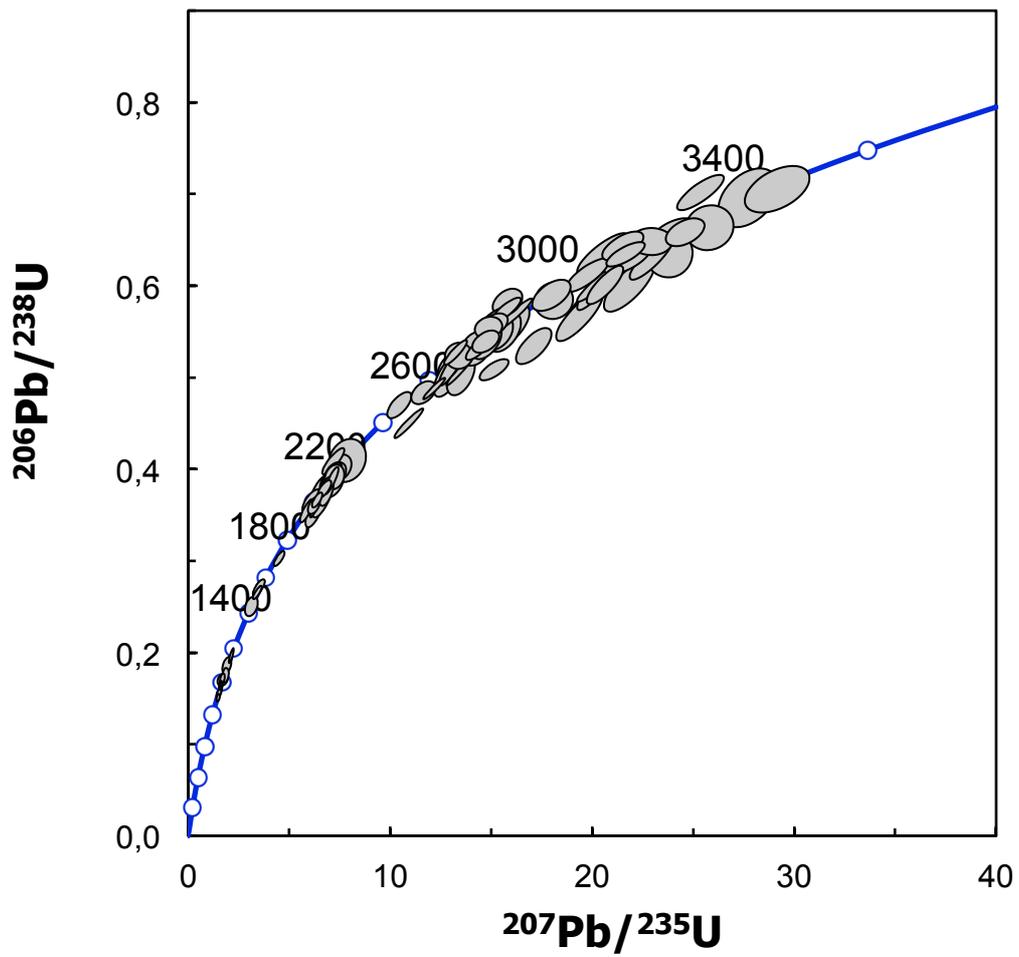
### IV.3 – PROVENIÊNCIA DOS ZIRCÕES DETRÍTICOS

As idades U-Pb obtidas dos grãos detríticos de zircão das amostras do Membro Angico estudadas indicam fontes diversas para os sedimentos que constituíram os protólitos deste membro. Analisando de forma conjunta as duas amostras (Figs. 11 e 12) e observando-se cinco populações de grãos, ressalta-se que 58% das idades encontrada são arqueanas.

- **G1 [901 Ma a 1152 Ma – 11%]:** Representado por amostras de idades neoproterozoicas e mesoproterozoicas, indicam provavelmente áreas fontes situadas na Província Borborema (Van Schmus et al. 2011; Neves *et al.* 2009, 2015; Araújo *et al.* 2012) que de acordo com estes autores esta província é caracterizada pela Orogenia Cariris Velhos (1100 a 950 Ma). Idades de 900 e 1100 Ma também são descritas na porção sul desta província, no Sistema Orogênico Sergipano (Carvalho 2005; Nascimento 2005; Oliveira *et al.* 2005) associadas a zircões detríticos e a maciços graníticos.
- **G2 [1439 Ma a 1508 Ma – 4%]:** O menor grupo observado, apresenta idade mesoproterozoica. Em acordo com Neves *et al.* (2015), o período compreendido entre 1500 e 1000 Ma é marcado na Província Borborema por uma grande estabilidade crustal. Neste intervalo de tempo, a densidade de distribuição de zircões detríticos também é baixa. No Cráton do São Francisco durante esta época formaram-se os grandes conjuntos deposicionais, que constituem as coberturas cratônicas mesoproterozoicas, o Supergrupo Espinhaço (Barbosa & Dominguez 1996).



**Figura 11.** Diagrama Frequência *versus* Idade (Ga) dos zircões detríticos das amostras P-16 e P-18.



**Figura 12.** Diagrama Concórdia aplicado aos zircões detríticos das amostras P-16 e P-18.

- **G3 [1762 Ma a 2467 Ma – 27%]:** Composta por zircões de idades paleoproterozoicas. Indicam provavelmente áreas fontes situadas no Cráton do São Francisco (Rios 2002; Cruz Filho *et al.* 2005; Rios *et al.* 2008) ou da Província Borborema (Neves *et al.* 2009, 2015; Araújo *et al.* 2012). No Núcleo Serrinha, que faz parte o embasamento do Cráton do São Francisco e constitui um dos embasamentos do Sistema Orogênico Sergipano, durante este período (Rios *et al.* 2008) tem-se a estruturação dos *greenstone belts* do Rio Itapicuru e Capim, além de um expressivo e volumoso magmatismo granítico, monzonítico e sienítico. Estas rochas poderiam servir como área-fonte para os sedimentos. Segundo Neves (2015), este intervalo de idade corresponde ao embasamento da Província Borborema.
- **G4 [2603 Ma a 2892 Ma – 30%]:** Concentra o maior grupo de zircões detríticos observada, nesse estudo tem idades neo a mesoarqueanas. Estas idades possivelmente refletem contribuições de rochas ígneas e metamórficas do Cráton do São Francisco, notadamente do Núcleo Serrinha que apresenta corpos graníticos correlacionáveis (Rios 2008) e das rochas gnaisses-migmatíticas do Domo de Itabaiana, datadas por U-Pb<sub>Shrimp</sub> em 2830 Ma (MLS Rosa, comunicação verbal). Na Província Borborema estas idades são mais frequentes no Domínio Rio Grande do Norte (Neves 2015), localizado na porção extremo norte desta província, sugerindo que a fonte provável seja o Cráton do São Francisco.
- **G5 [2953 Ma a 3468 Ma – 28%]:** Formada por cristais de idades meso a paleoarqueanas. Idades em torno de 2800 Ma a 3100 Ma são descritas para Núcleo Serrinha por Rios (2002) e, entre 3600 e 3200 Ma por Rios *et al.* (2008). Estas últimas idades, segundo estes autores, correspondem aos encontrados nas rochas mais antigas da América do Sul, os maciços de Sete Volta, Boa Vista e Mata Verde no Sul da Bahia, de 3400 Ma a 3500 Ma.

## Capítulo IV – RESULTADOS & DISCUSSÃO

---

## V.1 – CONCLUSÕES GERAIS

Com base no estudo de duas amostras de grãos detríticos de zircão de porção aflorante do Membro Angico, Formação Riachuelo, da Sub-Bacia de Sergipe foi possível indicar cinco principais intervalos de idade, que sugerem as seguintes fontes:

- **G1 [901 Ma a 1152 Ma – 11%]:** Sistema Orogênico Sergipano (Província Borborema).
- **G2 [1439 Ma a 1508 Ma – 4%]:** Província Borborema e Cráton do São Francisco.
- **G3 [1762 Ma a 2467 Ma – 27%]:** Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco).
- **G4 [2603 Ma a 2892 Ma – 30%]:** Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco).
- **G5 [2953 Ma a 3468 Ma – 28%]:** Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco).

Desta forma, conclui-se que os dados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa mostram que cerca de 85% das idades obtidas são paleoproterozoicas a paleoarqueanas, e que provavelmente o Núcleo Serrinha (Cráton do São Francisco) foi a principal área-fonte para os sedimentos do Membro Angico.

## **V.2 – RECOMENDAÇÕES**

Recomenda-se que sejam realizados uma análise convencional dos minerais pesados detríticos, que consiste na determinação da composição de toda a assembleia de minerais pesados presentes nos sedimentos.

O estudo da composição química (MEV-EDS) desses grãos individuais pode fornecer informações das condições de formação (temperatura, pressão), correlacionando-se, dessa forma, com a composição da rocha fonte e possíveis áreas fontes.

## Referências Bibliográficas

- Addad J.F. 2001. *Minerais Pesados: Uma Ferramenta para Prospecção, Proveniência, Paleogeografia e Análise Ambiental*. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Minas Gerais, 68 p.
- Araújo C.E.G., Cordani U.G., Basei M.A.S., Castro N.A., Sato K., Sproesser W.M., 2012, U-Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreaú Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin: *Precambrian Research* **206-207**: 36-51
- Azambuja Filho N.C., Cruz F.E.G., Arienti L.M., Hook S.C. 1998. *Sergipe-Alagoas Basin field*. ABGP digital Field Trip, N 1.
- Barbosa, J.S.F. & Dominguez, J.M.L. 1996. Texto Explicativo para o Mapa Geológico do Estado da Bahia - Esc: 1:1.000.000. Secretaria da Indústria Comércio e Mineração do Estado da Bahia, SGM/PPPG/FAPEX/CPGG, Salvador-BA, 295p.
- Belousova E.A., Griffen W.L., O' Reilly, S.Y., Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **143**: 602-622.
- Bonfim L.F., Costa I.V.G., Benevenuti S.A.P 2002. *Diagnóstico do Município de Sergipe*. CPRM. 20 p.
- Cainelli C., Babinski, N.A., Santos, R.C.R., Uesugui, N. 1987. Sedimentos albo-santonianos da Bacia Sergipe-Alagoas: ambientes de sedimentação e perspectivas petrolíferas. *Revista Brasileira de Geociências*, **17**(2):135-138.
- Campbell D.F. 1948. *Estado de Sergipe*. BRASIL. Conselho Nacional do Petróleo. Relatório Interno Rio de Janeiro p. 135-147.
- Campos Neto O.P.A., Souza-Lima W., Cruz F.E.G. 2007. Bacia de Sergipe-Alagoas. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências Petrobras*, **15**(2):405-415.
- Carrera S.C. 2015. *Arquitetura deposicional e proveniência da Formação Marizal nas sub-bacias Tucano Sul e Central, BA*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, 147 p.
- Carvalho M.J. 2005. Evolução Tectônica do Domínio Marancó – Poço Redondo: Registro das Orogêneses Cariris Velhos e Brasiliana na Faixa Sergipana, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 191 p.

- Cesero P. & Ponte F.C. 1997. Análise comparativa da paleogeologia dos litorais atlânticos brasileiro e africano. *In: PETROBRÁS. Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobrás, 11*:1-18.
- Chang H.K., Kowsmann R., Figueiredo A.M.F. 1990. Novos conceitos sobre o desenvolvimento das bacias marginais do leste brasileiro. Rio de Janeiro. *In: Raja Gabaglia G.P. & Milani E. (eds.) Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, p. 269-289.*
- Cherniak D.J., Hanchar J.M., Watson E.B. 1997. Rare earth diffusion in zircon. *Chemical Geology, 134*:289-301.
- Cruz Filho B.E., Conceição H., Rosa M.L.S., Rios D.C., Macambira M.J.B, Marinho M.M. 2005. Geocronologia e assinatura isotópica (Rb/Sr e Sm/Nd) do batólito trondhjémico Nordestina, Núcleo Serrinha, Nordeste do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências, 35*:1-8.
- Dias Brito D. 1982. Evolução paleoecológica da Bacia de Campos durante a deposição dos calcilutitos, margas e folhelhos da Formação Macaé (Albiano e Cenomaniano). Rio de Janeiro. *Boletim técnico da Petrobras, 25*(3):84-97.
- Estrella G.O. 1972. O estágio "rift" nas bacias marginais do leste brasileiro. Belém, Brasil. *In: Congresso Brasileiro Geologia, Anais, v. 3, p. 29-34.*
- Feijó F.J. & Vieira R.A.B. 1991. Sequências cretáceas das bacias de Sergipe e Alagoas. *Revista Brasileira de Geociências, 10*:153-168.
- Feijó F.J. 1980. Estudo dos carbonatos Muribeca e Riachuelo no alto de Aracaju – Bacia Sergipe-Alagoas – Nordeste do Brasil, 31. *Congresso Brasileiro de Geologia, Camburiú, 1*: 324.
- Feijó F.J. 1995. Bacia de Sergipe–Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 8*(1): p.149-161.
- Gill R. 1997. *Modern analytical Geochemistry*. Ed. Logman, Londres. 329 p.
- Klein C. & Dutrow B. 2007. *Mineral Science*. Ed. John Wiley & Sons, New Jersey. 675 p.
- Koutsoukos E.A.M, Mello M.R., Azambuja Filho N.C, Hart M.B. & Maxwell J.R. 1991. The upper Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Brazil: an integrated paleoenvironmental assessment. *Am. Assoc. of Petrol. Geol. Bull, 73*(3): 479-498.
- Koutsoukos E.A.M., Azambuja Filho, N.C., Spadini, A.R. & Destro, N. 1993. Upper Aptian – lower Coniacian carbonate sequences in the Sergipe Basin, northeastern Brazil. *In: Simo, T., Scott, R.W. & Masse, J.P. (eds.) Cretaceous Carbonate Platforms, Tulsa, AAPG Memoir 56. p. 127-143.*

- Lana M.C. 1990. Bacia de Sergipe Alagoas: Uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. *In: Gabaglia, R. & Milani, E.J. (eds.) Origem e evolução das bacias sedimentares*, Petrobrás, p. 311-332.
- Ludwig K.R. 2001. *ISOPLLOT v.3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Special publications 1<sup>a</sup>.
- Mendes J.M.C. 1994. *Análise estratigráfica da seção Neo-aptiana/Eocenomaniana (Formação Riachuelo) na área do alto de Aracaju e Adjacências, Bacia Sergipe-Alagoas*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 166 p.
- Mohriak U.W. 2003. Bacias da margem continental brasileira. *In: BIZZI A.L., GONCALVES, H.J., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI, M.R. (eds.). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Cap. 3, p. 99-102.
- Mohriak U.W., Bassetto M., Vieira I.S. 1997. Observações sobre a carta estratigráfica e a evolução tecno-sedimentar das bacias de Sergipe-Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **11**(1/2):84-115.
- Morton A.C. & Hallsworth C.R. 1994. Identifying provenience-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, **90**:241-256.
- Morton A.C. 1985. Heavy mineral in provenance studies. *In Zuffa G.G. Ed. Provenance of Arenites*. Dordrecht, Germany, D. Reidel Pub. Co, 249-277.
- Morton A.C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. *In: Morton, A.C.; Todd. S.P.; Houghton, P. D. W. (eds.). Developments in Sedimentary Provenance Studies. Geological Society Special Publication 57*, p. 31-45.
- Nascimento R.S. 2005. Domínio Canindé, faixa sergipana, Nordeste do Brasil: Um estudo geoquímico e isotópico de uma sequência de rifte continental neoproterozoica. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 145 p.
- Neves P.S. 2015. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogeny. *Journal of south American Earth Sciences*, **58**:150-164.
- Neves P.S., Bruguier O., Silva J.M.R., Bosch D., Alcantara V.C., Lima C.M. 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis?: *Precambrian Research*, **175**:187-205.

- Oliveira E.P., Carvalho M.J., Nascimento R.S., McNaughton N. 2005. Evolution of the neoproterozoic sergipano orogenic belt, NE Brazil: Detrital zircon geochronology and SM-ND isotopes on metasedimentary rocks unravel part of the story. *In: III Simpósio sobre o Cráton do São Francisco*. Salvador, *Short Papers*, p. 166-169.
- Ponte F.C. & Asmus H.E. 1976. The Brazilian Marginal Basins: current state of knowledge. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, **48**:215-239.
- Pupin J.P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.* **73**, 207-220.
- Remus M.V.D., Souza R.S., Cupertino J.A., De Ros L.F., Dani N., Vignol-Lelarge M.L. 2008. Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Revista Brasileira de Geociências*, **9**(2):166-185.
- Rios D.C. 2002. *Granitogênese no Núcleo Serrinha, Bahia, Brasil: Geocronologia e Litogeoquímica*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 213 p.
- Rios D.C., Davis D.W., Conceição H., Rosa M.L.S., Davis W.J., Dickin A.P., Marinho M.M., Stern R. 2008. 3.65-2.10Ga history of crust formation from zircon geochronology and isotope geochemistry of the Quijingue and Euclides plutons, Serrinha nucleus, Brazil: *Precambrian Research*, **167**:53-70.
- Rubatto D. & Hermann J. 2003. Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): Implications for Zr and Hf budget in reduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**(12): 2173-2187.
- Santos R.A., Souza J.D., Martins A.A.M., Neves J.P., Leal R.A. 1997. Mapa Geológico do Estado de Sergipe. Brasília, CPRM/DIEDIG/DEPAT.CODISE, escala 1:250.000.
- Schaller H. 1969. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas. *Boletim Técnico da Petrobras*, **12**(1):21-86.
- Schaller H., Della Favera J.C., Tibana P. 1980. Roteiro geológico da bacia Sergipe-Alagoas. Rio de Janeiro, *Petrobras/DEPEX*. **1**:1-19. Relatório interno.
- Souza-Lima W. & Hamsi Jr. G. 2003. *Bacias sedimentares brasileiras: Bacias da margem continental*. Fundação Paleontológica Phoenix, vol. 50, 4p.
- Souza-Lima W., Andrade A.J., Bengtson P., Galm P.C. 2002. A Bacia de Sergipe-Alagoas: evolução geológica, estratigrafia e conteúdo fóssil. *Fundação Paleontológica Phoenix*, Aracaju, **1**(1):1-34.
- Sylvester P. 2001. Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Principles and Applications. Mineralogical Association of Canada, *Short Course Series*, v. 29, 243 p.

- Sylvester P. 2008. Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues. Mineralogical Association of Canada, *Short Course Series*, v. 40, 348 p.
- USGS 2015. Mineral Analysis. [http://minerals.cr.usgs.gov/dial/LA\\_ICPMS.html](http://minerals.cr.usgs.gov/dial/LA_ICPMS.html). Acessado em 13 de fevereiro de 2015.
- Van der Ven P.H., Cainelli C., Fernandes G.J.F. 1989. Bacia Sergipe-Alagoas: Geologia e Exploração. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **3**(4):307-319.
- Van Schmus W.R., Kozuch M., Brito Neves B.B. 2011. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. *Journal of American Earth Sciences*, **31**:227-252.
- Wanderlei Filho J.R. & Destro N. 1994. Evolução das bacias de Jacuípe (BA), de Sergipe e Alagoas e implicações no rifteamento da margem nordeste oriental brasileira durante o cretáceo. *In: Simpósio do Cretáceo Brasileiro*, 3, Rio Claro, *Anais*, p. 49-52.