



A elaboração do Projeto Geologia e Recursos Minerais da Folha Imperatriz - SB.23-V-C-V, escala 1:100.000, resulta de uma ação do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, empresa pública vinculada à Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, do Ministério de Minas e Energia. Esse empreendimento, inserido no "Projeto Cartografia da Amazônia", é coordenado pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM, e executado pelas Forças Armadas Brasileiras (Exército, Marinha e Aeronáutica) e pela CPRM. O objetivo do projeto é o de registrar novas informações no chamado vazio cartográfico da Amazônia, com ênfase nas cartografias terrestre, náutica e geológica, insumos estratégicos e de suporte ao planejamento de políticas públicas, defesa nacional e execução de projetos de infraestrutura a serem desenvolvidos na região.

O projeto foi executado pela Superintendência Regional de Belém, no âmbito do Programa Geologia do Brasil. Conta com levantamentos geológicos de campo, análises laboratoriais, com suporte de dados aerogeofísicos de alta resolução, além da consistência de informações geológicas, recursos minerais pré-existentes e geração de base de dados.

Esse projeto deverá auxiliar os órgãos de planejamento das esferas de governo federal, estadual e municipal, em especial ao governo do estado do Maranhão, no estabelecimento de políticas públicas de desenvolvimento regional, na medida em que serve de base para novos estudos mais detalhados de prospecção e exploração mineral, visto que neste projeto foram registrados 127 depósitos e 95 ocorrências minerais, agrupados nas classes utilitárias: a) Minerais industriais (zeólitas, esmectitas, caulim); b) Materiais de uso na construção civil; c) Insumos minerais para agricultura; e d) Água potável de mesa.

O conhecimento geológico e a divulgação de áreas potencialmente favoráveis para a presença de substâncias minerais de valor econômico deverão atrair investimentos por parte de empresas de prospecção e pesquisa mineral, com vistas a contribuir e alavancar a atividade de mineração e para o melhor entendimento da evolução geológica da região, além de contribuir para os estudos de zoneamento ecológico-econômico e de gestão ambiental do território nacional.

Toda informação contida neste produto também encontra-se disponível para consultas e download de arquivos vetoriais no GEOBANK - banco de dados geológicos da CPRM em <http://geobank.cprm.gov.br>

GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DA FOLHA IMPERATRIZ - SB.23-V-C-V

Escala: 1:100.000

ESTADOS DO MARANHÃO E TOCANTINS



FOLHA IMPERATRIZ - SB.23-V-C-V

DEZEMBRO DE 2014



www.cprm.gov.br

SERVIÇO DE ATENDIMENTO AO USUÁRIO - SEUS
Tel: 21 2295-5997 - Fax: 21 2295-5897
E-mail: seus@cprm.gov.br

OUVIDORIA
Tel: 21 2295-4697 - Fax: 21 2295-0495
E-mail: ouvidoria@cprm.gov.br



Secretaria de
Geologia, Mineração e
Transformação Mineral

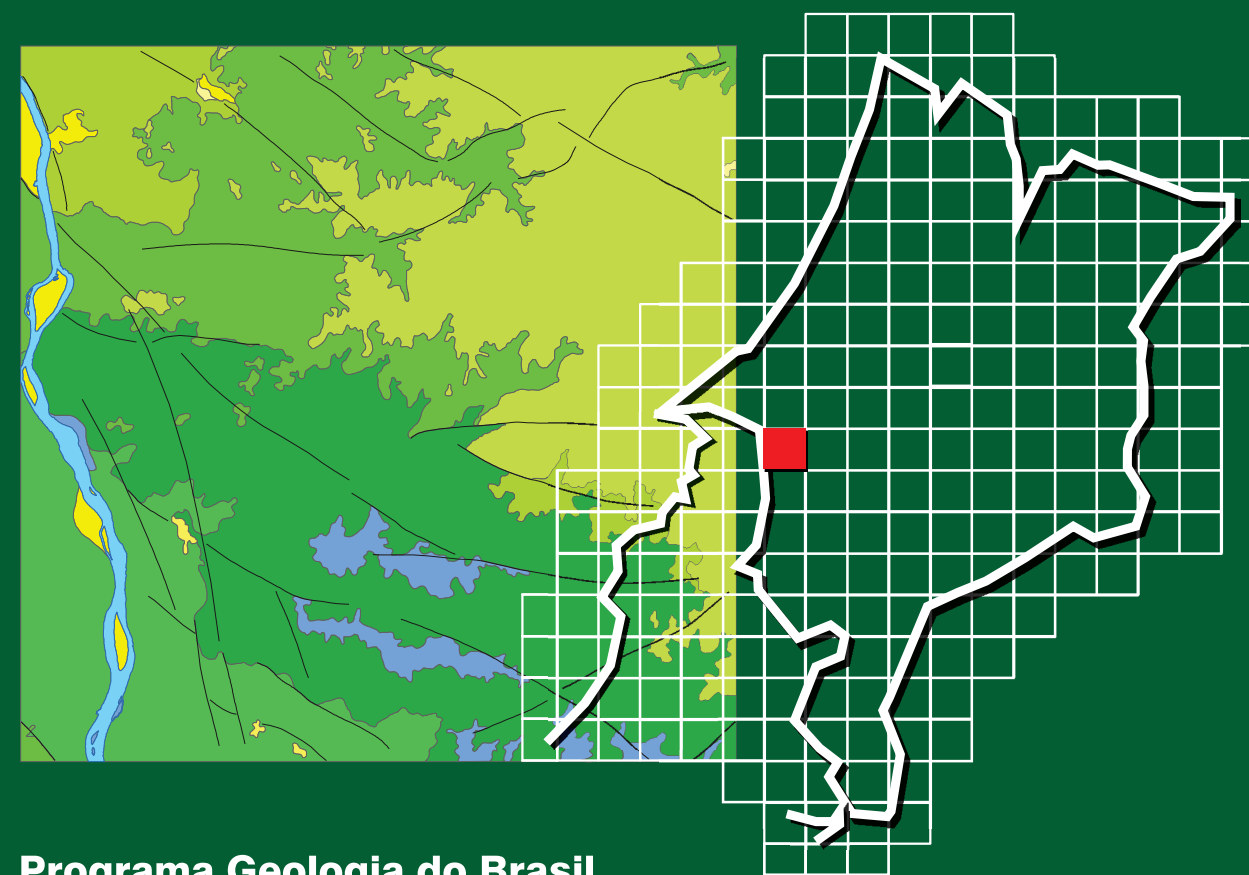
Ministério de
Minas e Energia



Cartografia da Amazônia Levantamentos Geológicos Básicos



GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DA FOLHA IMPERATRIZ - SB.23-V-C-V



Programa Geologia do Brasil

Escala: 1:100.000
2014



SB.23-V-C-V

GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DA FOLHA IMPERATRIZ

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE BELÉM

GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DA FOLHA IMPERATRIZ SB.23-V-C-V ESTADO DO MARANHÃO ESCALA 1:100.000

Autores

Manoel Corrêa da Costa Neto
Elem Cristina dos Santos Lopes
Gisele Corrêa dos Anjos
Abraão Fernando Figueira de Melo



BELÉM / 2014

**GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DA
FOLHA IMPERATRIZ SB.23-V-C-V
ESTADO DO MARANHÃO
ESCALA 1:100.000**

Programa Geologia do Brasil (PGB)
Informações Integradas para Proteção da Amazônia
Sistema de Cartografia da Amazônia

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

C837g COSTA NETO, Manoel Corrêa da.

Geologia da Folha Imperatriz – SB.23-V-C-V, Estado do Maranhão, Escala 1:100.000 / Manoel Corrêa da Costa Neto, Elem Cristina dos Santos Lopes, Gisele Corrêa dos Anjos, Abraão Fernando Figueira de Melo. – Belém: CPRM

Serviço Geológico do Brasil, 2014.

87 p. : il. Color.

Programa Geologia do Brasil - PGB. Informações Integradas para Proteção da Amazônia. Sistema de Cartografia da Amazônia

ISBN: 978-85-7499-182-5

1. Geologia Regional - Maranhão. 2. Recursos Minerais - Maranhão. I. Lopes, Elem Cristina dos Santos. II. Anjos, Gisele Corrêa dos. III. Melo, Abraão Fernando Figueira de. IV. Título.

CDD 558.112

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE BELÉM

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

EDISON LOBÃO
Ministro

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

CARLOS NOGUEIRA DA COSTA JÚNIOR
Secretário

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM

MANOEL BARRETTO DA ROCHA NETO
Diretor-Presidente

ROBERTO VENTURA SANTOS
Diretor de Geologia e Recursos Minerais

THALES DE QUEIROZ SAMPAIO
Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

ANTONIO CARLOS BARCELAR NUNES
Diretor de Relações Institucionais e Desenvolvimento

EDUARDO SANTA HELENA DA SILVA
Diretor de Administração e Finanças

REGINALDO ALVES DOS SANTOS
Chefe do Departamento de Geologia

FRANCISCO VALDIR DA SILVEIRA
Chefe do Departamento de Recursos Minerais

EDILTON JOSÉ DOS SANTOS
Chefe da Divisão de Geologia Básica

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE BELÉM

MANFREDO XIMENES PONTE
Superintendente

LÚCIA TRAVASSOS DA ROSA-COSTA
Gerente de Geologia e Recursos Minerais

CINTIA M. GAIA DA SILVA
CÉSAR LISBOA CHAVES
Supervisores de Geologia e Recursos Minerais

TOMAZ DE AQUINO MASSOUD LOBATO
Gerente de Relações Institucionais e Desenvolvimento

CRISTIANE SILVA DE SOUSA
MARCELO LACERDA VASQUEZ
Supervisores de Relações Institucionais e Desenvolvimento

CÍCERO VIEIRA DE MENESES
Gerente de Administração e Finanças

JOÃO BASTISTA MARCELO DE LIMA
Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial

CRÉDITOS DE AUTORIA

Autores

Manoel Corrêa da Costa Neto
Elem Cristina dos Santos Lopes
Gisele Corrêa dos Anjos
Abraão Fernando Figueira de Melo

TEXTO EXPLICATIVO

1 – INTRODUÇÃO

Elem Cristina dos Santos Lopes
Manoel C. da Costa Neto

2 – CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Manoel C. da Costa Neto

3 – UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Elem Cristina dos Santos Lopes

4 – GEOLOGIA ESTRUTURAL

Manoel C. da Costa Neto

5 – PETROLOGIA SEDIMENTAR E MINERAIS PESADOS

Elem Cristina dos Santos Lopes

6 – RECURSOS MINERAIS E GEOQUÍMICA PROSPECTIVA

Manoel C. da Costa Neto
Abraão Fernando Figueira de Melo

7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Manoel C. da Costa Neto
Abraão Fernando Figueira de Melo

MAPA GEOLÓGICO

Manoel C. da Costa Neto
Elem Cristina dos Santos Lopes
Gisele Corrêa dos Anjos

SIG GEOLÓGICO

Manoel C. da Costa Neto

APOIO TÉCNICO

Campo

José Arimatéia da Cruz
Antonio Pereira Júnior

Laboratório

Denise Correa Lobato
Érica de Jesus Fernandes

Escritório

Alexandre Dias Carvalho

Estagiários

Amanda V. da Silva Rocha e Marcela Maracaípe Braga
(Geologia)

Jaciara C. A. do Amaral e Raildo de S. Machado
(Biblioteconomia)

Revisão Bibliográfica

Nelma Fabrícia da Paixão Ribeiro Botelho

Revisão Final

Edilton José dos Santos
Lúcia Travassos da Rosa-Costa

APRESENTAÇÃO

O Projeto Geologia e Recursos Minerais da Folha Imperatriz – SB.23-V-C-V é uma ação do **Programa Geologia do Brasil**, desenvolvido pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, empresa pública vinculada à Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, do Ministério de Minas e Energia. Este projeto foi executado pela Superintendência Regional de Belém, e está inserido no **Projeto Cartografia da Amazônia**, coordenado pelo CENSIPAN – Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia, e executado pelas Forças Armadas Brasileiras (Exército, Força Aérea e Marinha) e pelo Serviço Geológico do Brasil.

O Projeto Cartografia da Amazônia é uma iniciativa do governo federal brasileiro, e tem por objetivo levantar informações no chamado “vazio cartográfico” da Amazônia, sendo composto por subprojetos, que envolvem as cartografias terrestre, náutica e geológica (geologia e aerogeofísica), e que visam a geração de informações estratégicas para o monitoramento regional, segurança e defesa nacional, e para o planejamento de projetos de infraestrutura na região.

Considerando-se a importância do conhecimento geológico como fonte primordial de entendimento do meio físico, os levantamentos geológicos são ferramentas importantes para gestores públicos, federais, estaduais e municipais, no desenvolvimento de projetos de ordenamento e gestão territorial, gerando desenvolvimento regional.

O Projeto Geologia da Folha Imperatriz visou principalmente a cartografia geológica na escala 1:100.000, contando com levantamentos geológicos de campo, análises laboratoriais, com suporte de dados aerogeofísicos de alta resolução, além da consistência de informações geológicas pré-existentes. Os dados obtidos neste projeto estão sintetizados em uma Nota Explicativa e ordenados em ambiente SIG, vinculado ao GEOBANK, banco de dados corporativo da CPRM, que pode ser acessado através do site www.cprm.gov.br.

ROBERTO VENTURA SANTOS
Diretor de Geologia e Recursos Minerais

MANOEL BARRETTO DA ROCHA NETO
Diretor-Presidente da CPRM – Serviço Geológico do Brasil

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	5
RESUMO	9
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	17
3. UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	25
3.1 FORMAÇÃO MOSQUITO (T3J1βm)	25
3.1.1 Introdução	25
3.1.2 Litogeoquímica	29
3.1.2.1 Elementos maiores	30
3.1.2.2 Elementos traços	30
3.1.2.3 Discussões	34
3.2 FORMAÇÃO CORDA (J3K1c).....	34
3.2.1 Associação de fácies eólica (J3K1ce)	35
3.2.1.1 Arenito com estratificação acanalada de grande porte (Aa)	35
3.2.1.2 Argilito laminado com intercalações de arenito (PI).....	36
3.2.2 Associação de fácies fluvial (J3K1cf)	36
3.2.2.1 Arenito com camadas heterolíticas (Ah)	36
3.2.2.2 Argilito-siltoso e arenito médio intercalado (Pa)	37
3.2.2.3 Arenito com estratificação acanalada de pequeno porte (Aac)	37
3.2.2.4 Arenito fino com laminação cruzada de baixo ângulo (Al)	38
3.2.2.5 Argilito-siltoso com laminação cruzada de baixo ângulo (Plm)	38
3.2.2.6 Arenito médio a grosso (Ga).....	38
3.2.3 Camadas e paleodireções de fluxos	38
3.3 FORMAÇÃO GRAJAÚ (K1g)	38
3.4 FORMAÇÃO CODÓ (K1c).....	41
3.5 GRUPO ITAPECURU (K12it)	43
3.5.1 Formação Varjão (K12itv)	45
3.5.1.1 Arenito fino com estratificação plano-paralela e cruzada acanalada (Apa)	45
3.5.1.2 Argilito-síltico vermelho maciço (Am)	45
3.5.1.3 Arenito fino com estruturas sin- e pós-deposicionais (Asp)	45
3.5.1.4 Arenito fino estratificado intercalado com camadas e lentes de argilito vermelho (Aag).....	46
3.5.2 Camadas e paleodireções de fluxos	47
3.6 DEPÓSITOS DE TERRAÇOS FLUVIAIS (Q1t)	47

3.7 DEPÓSITOS DETRÍTICOS INDIFERENCIADOS (Q1di)	48
3.8 DEPÓSITOS ALUVIONARES (Q2a).....	49
4. GEOLOGIA ESTRUTURAL	51
4.1 INTRODUÇÃO	51
4.2 FALHAMENTOS	51
4.3 SEÇÕES GEOLÓGICAS.....	51
4.4 DISCUSSÃO	52
5. PETROLOGIA SEDIMENTAR E MINERAIS PESADOS	55
5.1 PETROLOGIA SEDIMENTAR.....	55
5.1.1 Formação Corda	55
5.1.1.1 Classificação e textura dos arenitos.....	55
5.1.1.2 Composição do arcabouço mineralógico.....	55
5.1.1.3. Discussão.....	57
5.1.2 Formação Grajaú	59
5.1.2.1 Classificação e texturas dos arenitos	59
5.1.2.2 Composição do arcabouço mineralógico.....	59
5.1.2.3 Discussão	60
5.1.2.4 Classificação e texturas dos arenitos silicificados e <i>cherts</i>	61
5.2 MINERAIS PESADOS.....	62
5.2.1 Formação Corda	62
5.2.2 Formação Grajaú	63
5.2.3 Formação Varjão	63
5.2.4 Discussão	64
6. RECURSOS MINERAIS E GEOQUÍMICA PROSPECTIVA	65
6.1 RECURSOS MINERAIS	65
6.1.1. Minerais industriais	70
6.1.1.1 Zeólitas	70
6.1.1.2 Argilas esmectíticas	74
6.1.2 Materiais de uso imediato na construção civil	74
6.1.2.1 Argilas para cerâmica	75
6.1.2.2 Agregados minerais	75
6.1.3 Insumos minerais para agricultura	76
6.1.4 Água potável	76
6.1.4.1 Características dos aquíferos	77
6.2 GEOQUÍMICA PROSPECTIVA	78
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

RESUMO

O Projeto Geologia e Recursos Minerais da Folha Imperatriz está vinculado ao Programa Geologia do Brasil, desenvolvido pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil, e este relatório apresenta os resultados do mapeamento geológico e da avaliação do potencial mineral da Folha Imperatriz (SB.23-V-C-V), na escala 1:100.000, a qual está localizada no oeste do estado do Maranhão, no âmbito da Bacia do Parnaíba.

Os resultados alcançados neste projeto, somados às informações resgatadas de trabalhos anteriores realizados na Bacia do Parnaíba, permitiram propor um novo ordenamento estratigráfico para as unidades sedimentares do Cretáceo Inferior que afloram na Folha Imperatriz, as formações Corda, Grajaú, Codó e Varjão, e fornecer informações adicionais sobre os corpos básicos da Formação Mosquito, do Triássico-Jurássico.

Os basaltos da Formação Mosquito são geoquimicamente caracterizados como toleítos de baixo TiO_2 e estão relacionados à abertura do Oceano Atlântico equatorial, como parte da CAMP – *Central Atlantic Magmatic Province*. A idade adotada para os mesmos situa-se no intervalo de 190-200 Ma, com base em datações radiométricas da literatura.

Para a Formação Corda adotou-se o intervalo Barremiano (andar Buracica) - Jurássico Superior. Neste trabalho foram cartografadas duas associações de litofácies, uma relacionada a depósitos eólicos de dunas e interdunas, e outra francamente fluvial. Estudos petrográficos em arenitos desta unidade indicaram que a origem dos cimentos zeolítico, carbonático e esmectítico está relacionada a eodiagênese e mesodiagênese rasa.

A Formação Grajaú é caracterizada principalmente por arenitos e arenitos conglomeráticos, depositados em ambiente fluvial. Relações de campo e informações da literatura indicam que a sedimentação ocorreu contemporaneamente ou imediata-

mente após a deposição da Formação Corda (estágio Barremiano-Aptiano).

A Formação Codó, de idade aptiana-albiana, é composta predominantemente por folhelhos cinza escuros, intercalados com níveis carbonáticos com feições estromatolíticas, que são indicativos de deposição em ambiente lagunar com alguma influência marinha.

Entre as formações Codó e Grajaú constatou-se a existência de uma discordância erosiva, identificada ao longo dos rios Tocantins e Bananal.

Neste trabalho é proposta a Formação Varjão, como parte do Grupo Itapecuru, para designar as rochas sedimentares depositadas em ambiente fluvial, agrupadas em quatro litofácies sedimentares, dominadas por arenitos finos e argilitos avermelhados.

A cobertura pleistocênica e holocênica é formada por Depósitos de Terraços Fluviais, que representam o paleovale do Rio Tocantins, Depósitos Detríticos, onde estão incluídos sedimentos coluvionares holocênicos, e Depósitos Aluvionares, relacionados às drenagens atuais.

Neste trabalho a investigação de recursos minerais culminou com o registro de 127 depósitos e 95 ocorrências minerais, agrupados nas classes utilitárias: a) Minerais industriais (zeólitas, esmectitas, caulim); b) Materiais de uso na construção civil; c) Insumos minerais para agricultura; e d) Água potável de mesa.

Este trabalho destaca uma importante zona de ocorrência de zeólitas associada à Formação Corda, na qual os estudos demonstraram muito bons resultados de aplicação como descontaminante e na agricultura. Ainda de relevância econômica estão assinaladas as ocorrências da esmectita, de rochas sedimentares carbonáticas, com destaque para a sua aplicação para fins agrícolas pela técnica de rochagem, e o Aquífero Sambaíba, confinado por derrames basálticos, com capacidades para altas vazões de águas subterrâneas.

ABSTRACT

This report contains the results of the geological mapping and evaluation of mineral resources of the Imperatriz Sheet (SB.23-V-C-V), located in the western portion of the Maranhão state, at the 1:100.000 scale. This research is part of the Programa de Geologia do Brasil (Geology of Brazil Program) developed by CPRM/(Geological Survey of Brazil).

All results achieved in this study, coupled with historical data from projects carried out by CPRM in the Parnaíba Basin, allowed the reformulation of the stratigraphy of the Cretaceous units of the Imperatriz Sheet.

The Mosquito Formation basalts are characterized as low-Ti tholeiites and are related to the opening of the equatorial Atlantic Ocean and are part of the CAMP - Central Atlantic magmatic Province, with crystallization age in the range of 200 Ma to 190 Ma. The Corda Formation age adopted in this work is Barremian (Buracica stage) to Neo-Jurassic. Two facies associations were discriminated and related to eolian (dunes and interdunes) and fluvial deposits. New petrographic data show that the zeolite, carbonate and smectite cement in sandstones is of diagenetic origin (eodiagenesis to shallow mesodiagenesis).

Field data show an interbedded relation between the Corda and Grajaú formations, and that the deposition of the Grajaú sediments took place contemporaneously or immediately after the deposition of the Corda sediments (Barremian-Aptian stage).

An erosive discordance, which can be observed in outcrops along the Tocantins and Bananal rivers, marks the contact between the Codó and Grajaú formations. Furthermore, in this work the age of the Codó Formation is considered to be Aptian-Albian).

A new stratigraphic unit is proposed in this study, the Varjão Formation, which represents the fluvial deposits of the Itapecuru Group.

The Pleistocene and Holocene sediments are represented by detritic and alluvial deposits related to the Tocantins fluvial basin.

The investigation of mineral resources in the Imperatriz Sheet recorded 127 deposits and 95 occurrences, which are grouped in four classes: a) Industrial minerals (zeolites, smectite clays etc.), b) Materials used in civil construction; c) Agricultural minerals, and d) potable water.

This work highlights an important area of occurrence of zeolites associated with the Corda Formation. Technical studies indicate their use as decontaminant and in the agriculture. Also of economic importance are the occurrences of smectite, carbonate sediments, with emphasis on their application for agricultural purposes using the "rocks for crops" technique, and the Sambaíba Aquifer, confined between basalt flows, with capabilities for high groundwater flow.

1 INTRODUÇÃO

A Folha Imperatriz (SB.23-V-C-V) localiza-se na porção oeste do Estado do Maranhão, na divisa com o Estado do Tocantins, sendo limitada pelos meridianos 47° e 47°30'W e paralelos 5°30' e 6°S (figura 1.1). A área é cortada pelo Rio Tocantins, pela rodovia BR-010 (Belém-Brasília) e pela Ferrovia Norte-Sul, que se interliga à Ferrovia de Carajás. A folha abrange parte dos municípios maranhenses de Imperatriz, Governador Edison Lobão, João Lisboa, Senador La Rocque, Buritirana, Davinópolis, Montes Altos, Ribamar Fiquenes, e parte dos municípios de São Miguel do Tocantins, Itaguatins, Maurilândia do Tocantins, pertencentes ao Estado do Tocantins.

Imperatriz é a principal cidade da área e está situada no extremo noroeste da folha. Apresenta-se como entreposto comercial e de serviços, que abastece mercados locais em um raio de 400 km e forma com Araguaína-TO, Marabá-PA, Balsas-MA e Açailândia-MA, um importante pólo comercial e industrial. O município situa-se na área de influência de grandes projetos, que de algum modo, condicionam seu desenvolvimento: a mineração da Serra dos Carajás (Marabá/Parauapebas), a mineração do igarapé Salobo (Marabá/Parauapebas), a Ferrovia Carajás/Itaqui, a Ferrovia Norte-Sul, as indústrias guzeiras (Açailândia) e a indústria de celulose da Celmar (Cidelândia).

A partir da construção da rodovia Belém-Brasília, em 1960, a cidade de Imperatriz passa a despertar o interesse de empreendedores do centro-oeste e do sul do país. Até os anos 1990, o município passou por três ciclos econômicos - do arroz, da madeira e do ouro. Atualmente o município tem sua economia centrada no setor terciário (serviços), com 77,78% do mercado, enquanto os setores secundário (indústrias cerâmicas, principalmente) e primário (agricultura, pecuária, extrativismo vegetal e mineração rudimentar - olarias, etc.) ocupam, respectivamente, 16,76% e 5,46% do mercado.

O clima da região da Folha Imperatriz é equatorial, caracterizado por um período relativamente chuvoso, do mês de dezembro a maio, e um período mais seco de junho a novembro. Apresenta um relevo de planícies onduladas onde se erguem, espaçadamente, morros escarpados sustentados, via de regra, pelos sedimentos da Formação Itapecuru. Nestas planícies observa-se uma vegetação de cerrado, de capinzal, extensos babaçuais e matas de galeria.

A área da Folha Imperatriz possui trabalhos de cunho geológico e hidrogeológico de enfoque regional, como os de Lima e Leite (1978), Caldasso (1978), Souza et al. (1990), Rezende (1997) e outros.

Os objetivos básicos deste projeto foram: 1) refinar o conhecimento das ocorrências de zeólitas (estilbita e laumontita) em arenitos da Formação Corda, na Bacia do Parnaíba, em parte dos estados do Maranhão e do Tocantins, as quais representam os mais expressivos jazimentos zeolíticos em rochas sedimentares do Brasil; e, 2) a cartografia geológica na escala 1:100.000 e o cadastramento dos recursos minerais da área de aproximadamente 3000 km² da Folha Imperatriz. Este levantamento faz parte do Programa de Geologia do Brasil, desenvolvido pela CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

A área é coberta por levantamentos gravimétrico e gamaespectrométrico em escala regional, executados pela PETROBRAS, no ano de 2005, e por levantamento aerogeofísico magnético e gamaespectrométrico do Projeto Aerogeofísico Parnaíba, do convênio Agência Nacional de Petróleo - ANP (2006) e CPRM, com linhas de voo e controle com espaçamento de 0,5 km e 4,0 km, respectivamente.

As atividades desenvolvidas neste projeto constaram de mapeamento geológico, cadastramento mineral e prospecção geoquímica. Todas elas se embasaram em trabalhos de campo, análises de laboratório (estudos petrográficos, análises de minerais pesados e de difração raios-x em amostras de rocha, além da prospecção geoquímica de concentrados de bateia e análises mineralógicas semi-quantitativas) e nos dados aerogeofísicos disponíveis. Os trabalhos de mapeamento geológico e levantamento de recursos minerais incluem o estudo de 264 estações, a análise do perfil litológico de 10 poços tubulares profundos para extração de água e a execução de 4 furos de sonda para identificação de zeólitas (figura 1.2).

Os resultados alcançados estão sintetizados neste relatório e integrados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, apresentado em CD-ROM com mapa geológico e de recursos minerais e nota explicativa. Foi realizada ainda a atualização do GEOBANK, banco de dados da CPRM que agrupa informações geológicas de todo o território nacional.

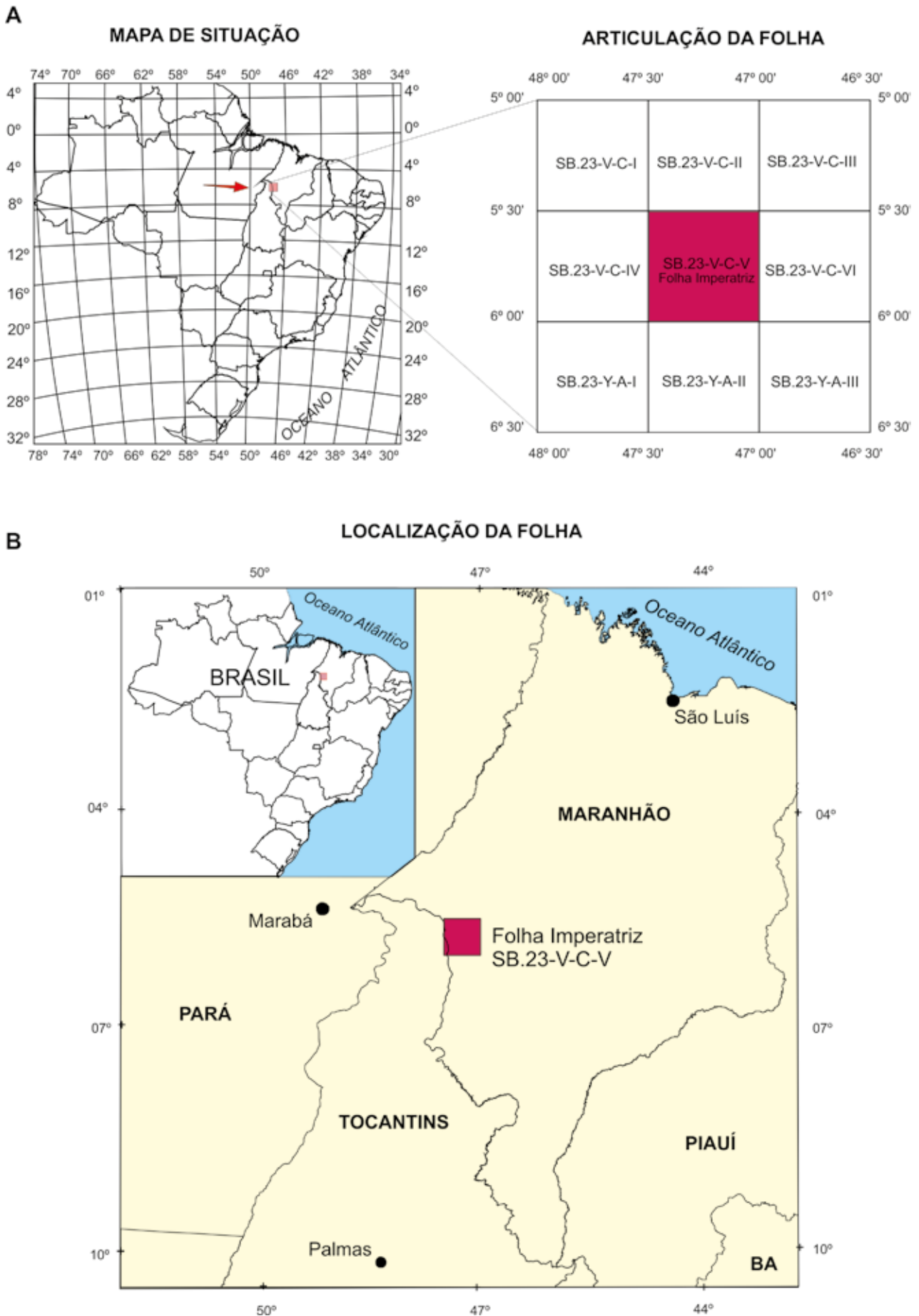


Figura 1.1 A e B: Articulação e localização da Folha Imperatriz (SB.23-V-C-V).

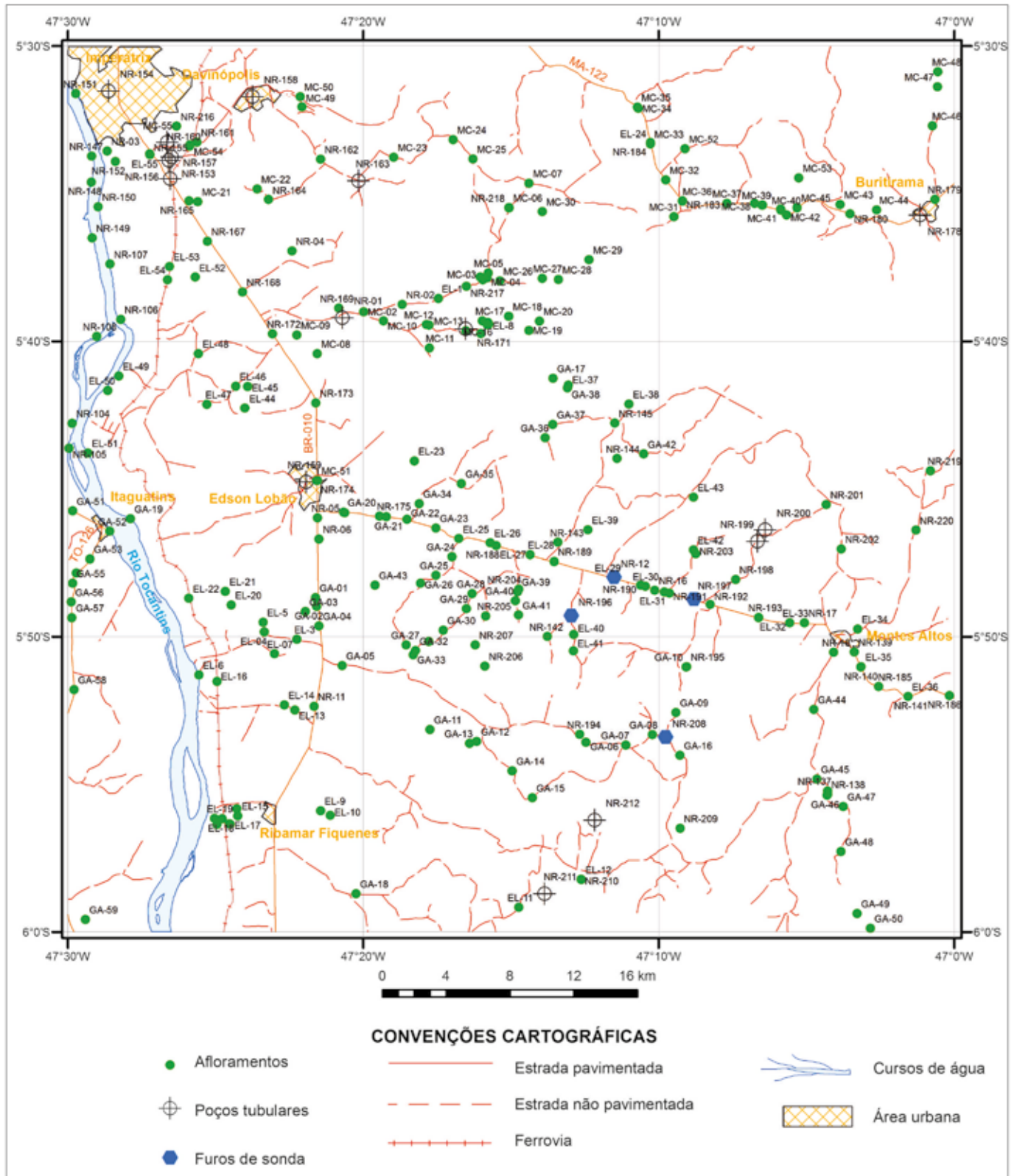


Figura 1.2: Quadrícula da Folha Imperatriz com a localização das estações geológicas, furos de sonda e poços tubulares.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área da Folha Imperatriz está inserida na parte centro-noroeste da Bacia do Parnaíba, localizada no nordeste do Brasil, com cerca de 600.000 km² de área e 3.500 m de espessura no depocentro (GÓES; FEIJÓ, 1994).

O embasamento compreende unidades dos crátons São Luis, São Francisco e Núcleo Cratônico Central, unidades dos cinturões orogênicos e faixas de dobramentos brasileiros Gurupi, Tocantins-Araguaia e Lineamento Transbrasiliano; e unidades cambrianas do Grupo Jaibaras (GÓES; TRAVASSOS; NUNES, 1993; ALMEIDA, 1974; SCHOBENHAUS FILHO, 1975).

Os cinturões de dobramentos e lineamentos, marginais aos crátons, delimitam estruturalmente a bacia: o cinturão Gurupi a norte, a faixa de dobramentos Tocantins-Araguaia e Geossutura Tocantins-Araguaia (ALMEIDA, 1974) a oeste, e o Lineamento Transbrasiliano a sudeste-leste (figura 2.1). Os falhamentos, altos estruturais e estruturas grabeniformes (MESNER; WOODRIDGE, 1964; REZENDE; PAMPLONA, 1970; CAMPOS; LIMA, 1987 apud GÓES; TRAVASSOS; NUNES, 1993; GÓES, 1995; CAMPOS; DARDENNE, 1997; SGARBI et al., 2001) encontradas no interior da bacia (figura 2.1) estariam associados a estas mega-estruturas, como uma extensão para o interior da bacia destas estruturas aflorantes nas suas bordas (BRITO NEVES, 1990; GÓES; TRAVASSOS; NUNES, 1993).

A Bacia do Parnaíba é separada de suas vizinhas por altos estruturais (arcos estruturais) gerados por processos tectônicos relacionados à quebra do Gondwana e posterior formação do Oceano Atlântico Norte e Equatorial. O Arco Ferrer-Urbano Santos, localizado a norte-nordeste, delimita a Bacia do Parnaíba das bacias São Luis, Barreirinhas, Bragança-Viseu e Ilha Nova. O Arco de Tocantins ou Capim, situado a noroeste, separa as bacias do Parnaíba e Marajó, e o Arco do São Francisco, localizado a sul, separa a Bacia do Parnaíba da Bacia do São Francisco (MESNER; WOODRIDGE, 1964; REZENDE; PAMPLONA, 1970; RABINOWITZ; LABRECQUE, 1979; CAMPOS; LIMA, 1987 apud GÓES; TRAVASSOS; NUNES, 1993; GÓES, 1995; CAMPOS; DARDENNE, 1997; SGARBI et al., 2001).

As unidades sedimentares que preenchem a Bacia Intracratônica do Parnaíba foram depositadas, segundo Vaz et al. (2007), em cinco grandes ciclos deposicionais, separados por discordâncias regionais, e são agrupadas nas sequências (figura 2.2): siluriana (Grupo Serra Grande), mesodevoniana-eocarbonífera (Grupo Canindé), neocarbonífera-eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica (Formação Pastos Bons) e cretácea (formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru). Estas sequências foram cortadas por magmatismo básico Juro-Triássico e Eocretáceo. A figura 2.2 apresenta a coluna litoestratigráfica da Bacia do Parnaíba, de acordo com Vaz et al. (2007).

Do Siluriano até o Permiano (Formação Pedra de Fogo do Grupo Balsas) as sequências foram depositadas através de fases de transgressões marinhas, seguidas por consequentes regressões.

Os sedimentos da Sequência Siluriana (formações Ipu, Tianguá e Jaicós) foram depositados, inicialmente, em um ambiente glácio-fluvial e de leques deltaicos, seguido por um ambiente de plataforma rasa e finalizando com arenitos depositados por sistemas fluviais entrelaçados, deltaicos e plataformais (CAPUTO, 1984; CAPUTO; LIMA, 1984; GÓES; FEIJÓ, 1994; VAZ et al., 2007).

A Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera (formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti) tem um pacote sedimentar basal depositado em ambiente deltaico e plataformar, e folhelhos escuros, radioativos (superfícies de máxima inundação) com intercalações de siltitos e arenitos de plataforma rasa, da Formação Pimenteiras (YOUNG; BORGHI, 2003, 2006; DELLA FÁVERA, 1990 apud VAZ et al., 2007). Sobreposto a este pacote encontra-se uma sucessão que teria sido depositada em ambientes flúvio-estuarino e periglacial, de plataforma rasa e em deltas e planícies de marés (LIMA; LEITE, 1978; CAPUTO; LIMA, 1984; GÓES; FEIJÓ, 1994; VAZ et al., 2007).

A Sequência Neocarbonífera-Eotriássica (formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba), caracterizada por sedimentos de ambiente desérticos com contribuições fluviais, lacustres e eventuais incursões marinhas, com ciclos evaporíticos (LIMA; LEITE, 1978; VAZ et al., 2007).

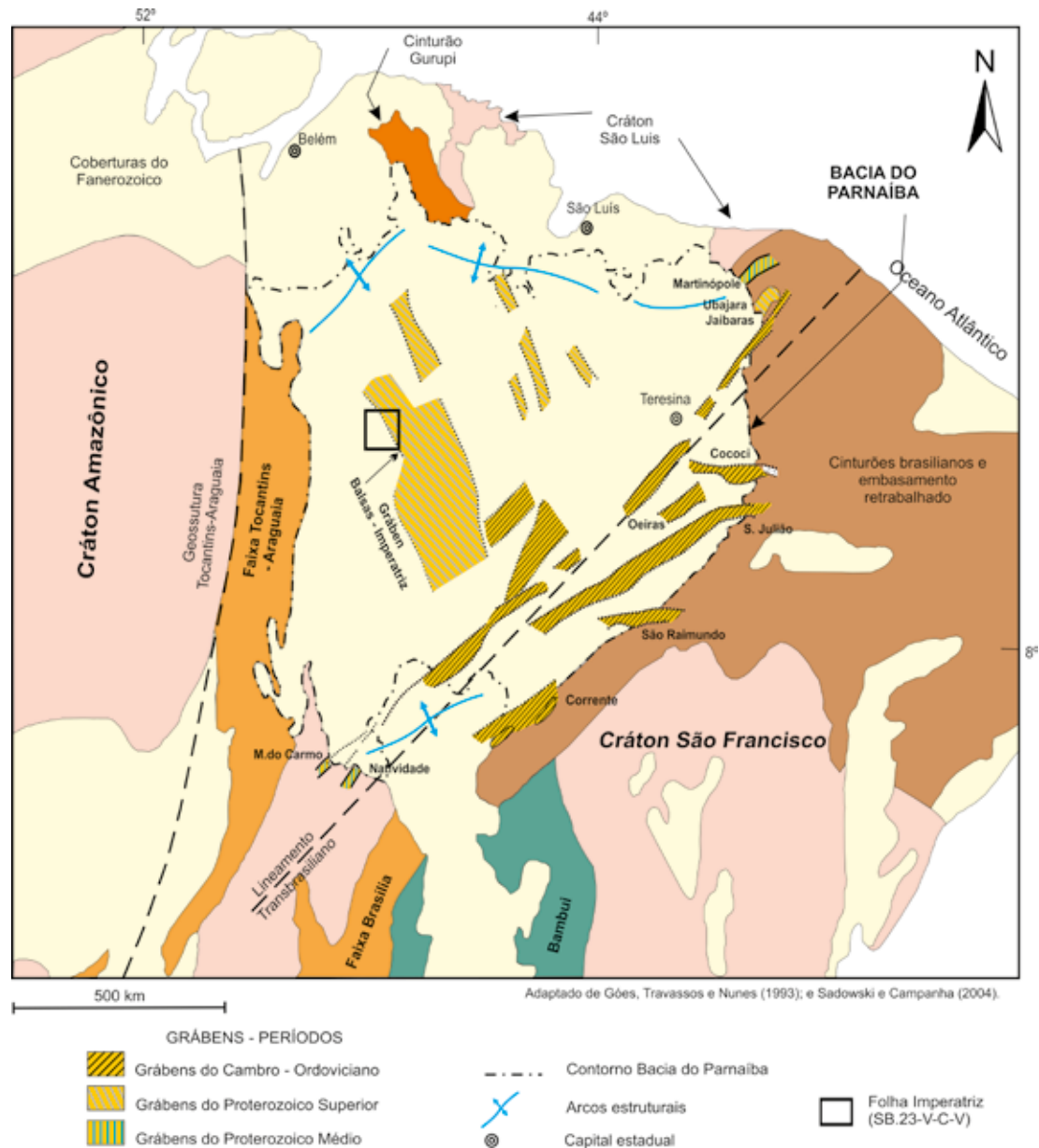


Figura 2.1 – Contexto geotectônico da Bacia do Parnaíba.

O preenchimento da bacia até o Eotriássico precedeu a ruptura do Pangea (estádio tectônico da Ativação (ZALÁN, 2004; VAZ, et al., 2007) e a abertura do Oceano Atlântico, que foi acompanhada por magmatismo basáltico no Triássico - Jurássico e Eocretáceo.

A Sequência Jurássica está representada apenas pela Formação Pastos Bons, com uma sedimentação depositada em paleodepressões continentais, lacustrinas, com contribuição fluvial (LIMA; LEITE, 1978; CAPUTO, 1984; VAZ et al., 2007).

As rochas da Sequência Cretácea afloram principalmente no setor noroeste-norte da bacia, sobrepostas discordantemente à Sequência Jurássica e rochas mais antigas. É composta pelas formações Corda, Grajaú, Codó e Grupo Itapecuru (VAZ et al., 2007). A Formação Corda é constituída por arenitos e subordinadamente por argilitos e folhelhos (REZENDE, 2002), depositados

em ambiente continental desértico, controlado por sistemas flúvio-lacustres e com contribuição eólica (LIMA; LEITE, 1978; GÓES; FEIJÓ, 1994). A Formação Grajaú é constituída por arenitos e pelitos subordinados, depositados em ambiente flúvio-deltaico e eólico. Ocorre interdigitada com a Formação Codó, conforme ratificado por Lima e Leite (1978). A Formação Codó constitui-se de folhelhos betuminosos, evaporitos (anidritas), calcários e arenitos lacustres, além de níveis de sílica e estromatólitos (LIMA; LEITE, 1978; ROSSETTI, 2001; VAZ et al., 2007). De acordo com Vaz et al. (2007) e Rezende (2002), existe uma relação de contemporaneidade entre as formações Codó, Corda e Grajaú.

Apenas os depósitos da Sequência Cretácea e corpos representantes do magmatismo básico Juro-Triássico e Eocretáceo afloram na área da Folha Imperatriz.

BACIA DO PARNAÍBA											
Ma	IDADE			SEDIMENTAÇÃO	AMBIENTE DEPOSICIONAL	DISCORDÂNCIAS	LITOESTRATIGRAFIA			ESPESSURAS MÁXIMAS (m)	SEQUÊNCIAS
	ERA PERÍODO	ÉPOCA	IDADE				GRUPO	FORMAÇÃO	MEMBRO		
65	MESOZOICO	CRETÁCEO	NEO	MAASTRICHTIANO	CONT./MAR	ESTUARINO LAGUNAR		ITAPECURU	724	CRETÁCEA	
				CAMPANHIANO							
100	MESOZOICO	CRETÁCEO	EO	SANTONIANO	CONT./MAR	DESERTICO/FLUVIO DELTAICO ALUVIAL/LACUSTRE/PLAT. RASA		GORDA	266		
				TUBONIANO							
150	MESOZOICO	CRETÁCEO	EO	ALBIANO	CONT./MAR	INTRUSIVAS E EXTRUSIVAS		SARDINHA	20		
				APTIANO							
200	MESOZOICO	JURÁSSICO	NEO	TITHONIANO	CONT.	FLÚVIO-LACUSTRE		PASTOS BONS	77	JURÁSSICA	
				KIMMERIDGIANO							
250	MESOZOICO	JURÁSSICO	MESO	CALOVIANO	CONT.						
				SATHOLIANO							
300	MESOZOICO	JURÁSSICO	EO	BALENCIANO	CONT.						
				TOARCIANO							
350	MESOZOICO	TRIÁSSICO	NEO	PLIENSCHACHIANO	CONT.						
				SINEMURIANO							
400	MESOZOICO	TRIÁSSICO	MESO	BALENCIANO	CONT.	DESERTICO	NEOTRIÁSSICA	SAMBAÍBA	440	NEOCARBONÍFERA-EOTRIÁSSICA	
				ANISIANO							
450	MESOZOICO	TRIÁSSICO	EO	BALENCIANO	CONT.	DESERTICO/LACUSTRE		MOTUCA	280		
				INDUANO							
500	PALEOZOICO	PERMIANO	LOPINGIANO	CHANGHSIANGIANO	CONT.	PLAT. RASA LITORÂNEO TEMPESTADES SABKHA		PEDRA DE FOGO	240		
				WUCHIAPINGIANO							
550	PALEOZOICO	PERMIANO	GUADALUPIANO	CAPITANIANO	CONT.	FLUVIAL DESERTICO LITORÂNEO		PIAUI	340		
				WORDIANO							
600	PALEOZOICO	PERMIANO	CISURALIANO	ROADIANO	CONT.						
				QUINZIANO							
650	PALEOZOICO	PERMIANO	CISURALIANO	ARTINSKIANO	CONT.						
				SAKMARIANO							
700	PALEOZOICO	CARBONÍFERO	PENNSYLVANIANO	ASSELIANO	CONT.	FLUVIAL DESERTICO LITORÂNEO					
				WOLFENBUTELIANO							
750	PALEOZOICO	CARBONÍFERO	MISSISSIPIANO	KASIMOVIANO	CONT.	DELTA DE PLAN. MARES-TEMPESTADES	MESOCARBONÍFERA	POTI	320	MESODEVONIANA-EOCARBONÍFERA	
				MOSCOVIANO							
800	PALEOZOICO	CARBONÍFERO	MISSISSIPIANO	SERPUKHOVIANO	CONT.	PLATAFORMA DOM. POR TEMPESTADE	EOCARBONÍFERA	LONGÁ	220		
				TOURNAISIANO							
850	PALEOZOICO	DEVONIANO	NEO	FAMENIANO	CONT.	PLATAFORMA DOMIN. POR MARES/ FLUVIO-ESTUARINO/ PERIGLACIAL		CABEÇAS	350		
				FRASNIANO							
900	PALEOZOICO	DEVONIANO	MESO	GIVETIANO	CONT.	PLATAFORMA DOM. TEMPESTADE		PIMENTEIRAS	320		
				EIFELIANO							
950	PALEOZOICO	DEVONIANO	EO	EMSIANO	CONT.	DELTA-MARES TEMPESTADES	EODEVONIANA	ITAIM	360		
				PRAGUEANO							
1000	PALEOZOICO	DEVONIANO	EO	LOCHKOVIANO	CONT.	FLUVIAL ENTRELAÇADO		JAICÓS	380		
				PRAGUEANO							
1050	PALEOZOICO	SILURIANO	NEO	PRIDOLI	CONT.	PLAT. RASA GLACIO-FLUVIAL LEQUE DELTAICO		TIANGUÁ	200	SILURIANA	
				LUDLOW							
1100	PALEOZOICO	SILURIANO	MESO	WENLOCK	CONT.			IPU	350		
				LIANDOVERY							
1150	PALEOZOICO	SILURIANO	EO	ROBESONIANO	CONT.						
				SEBAYOVIANO							
1200	PALEOZOICO	SILURIANO	EO	TELICHIANO	CONT.						
				ABERONIANO							
1250	PALEOZOICO	SILURIANO	EO	RHODIGANCIANO	CONT.						
				HIRNANTIANO							
1300	PALEOZOICO	ORDOVICIANO	NEO	KATIANO	CONT.						
				SANDBIANO							
1350	PALEOZOICO	ORDOVICIANO	MESO	DARRIWILIANO	CONT.						
				DAPINGIANO							
1400	PALEOZOICO	ORDOVICIANO	EO	FLOIANO	CONT.						
				TREMADOCIANO							
1450	PALEOZOICO	CAMBRIANO	NEO	TREMADOCIANO	CONT.	FLUVIAL ALUVIAL LACUSTRE		JAIBARAS	120		
				TREMADOCIANO							
1540				PRÉ-CAMBRIANO						EMBASAMENTO	

Figura 2.2 – Coluna litoestratigráfica da Bacia do Parnaíba (VAZ et al., 2007). Em amarelo estão destacadas as unidades litoestratigráficas que afloram na área da Folha Imperatriz.

Rochas sedimentares representadas por arenitos, pelitos e conglomerados, que recobrem discordantemente as formações Corda, Grajaú e Codó, são referidos como pertencentes ao Grupo Itapecuru, com sedimentos depositados em ambiente de canal fluvial, laguna, canal de maré e litorâneo, pertencentes a um sistema estuarino-lagunar (e.g. ANAISSE JR.; TRUKENBRODT; ROSSETTI, 2001).

O magmatismo toleítico que afetou a Bacia do Parnaíba, do Triássico Superior ao Cretáceo Inferior, teria se desenvolvido em três pulsos principais, entre 215 e 110 Ma, relacionados à fragmentação do continente Gondwana (REZENDE, 2002). Duas unidades litoestratigráficas relacionadas a este magmatismo foram definidas, as formações Mosquito e Sardinha. Segundo Góes, Travassos e Nunes (1993), ambas representam derrames basálticos, a primeira de idade juro-triássica, com ocorrência entre as cidades de Imperatriz e Balsas, e a segunda de idade eocretácea, com ocorrência restrita a região sul de Barra do Corda.

Caldasso e Hama (1978) propõem ainda um terceiro pulso magmático, de modo que, o mais antigo (entre 215-180 Ma) estaria associado com o enxame de diques do Amapá e com os movimentos de abertura do Oceano Atlântico Norte, o segundo estaria relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Equatorial, e o terceiro pulso magmático, mais jovem, seria contemporâneo com o magmatismo da Bacia do Paraná e estaria relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Sul.

A Bacia do Parnaíba foi ainda afetada por magmatismo kimberlítico, com a colocação de inúmeros corpos tendo sido favorecida pela estruturação tectônica, muitos deles encontrados alojados nas formações Cabeças, Pimenteira, Longá e Pedra de Fogo (CORREIA, 1990; SACHS; SILVEIRA, 2010).

A localização dos depocentros destas grandes sequências sedimentares sugere uma vinculação ao traçado das grandes estruturas tectônicas (grábens e lineamentos trans-brasilianos) herdadas do Brasiliano (Neoproterozoico), as quais podem ter controlado a deposição. Este vínculo parece mais evidente para as sequências mais antigas, do Siluriano e Devoniano (figuras 2.1 e 2.3).

As deposições sedimentares da bacia ocorreram associadas às orogenias Pré-cordilheirana, Chanica e Sanrafaélica, e aproximadamente coincidentes com as orogenias paleozoicas norte-americanas (Caledoniana, Acadiana / Antler, Ouachita, Variscana e Allegheniana).

A curva de subsidência tectônica (GALUSHKIN et al., 1996 apud ZALÁN, 2004), conforme figura 2.4, oferece uma contribuição ao entendimento dos reflexos da atividade tectônica na Plataforma Sul-Americana na Bacia do Parnaíba ao longo da sua evolução geológica. Segundo os autores citados, o longo período de subsidência da bacia é explicada por uma subsidência termal única (linha tracejada na figura 2.4).

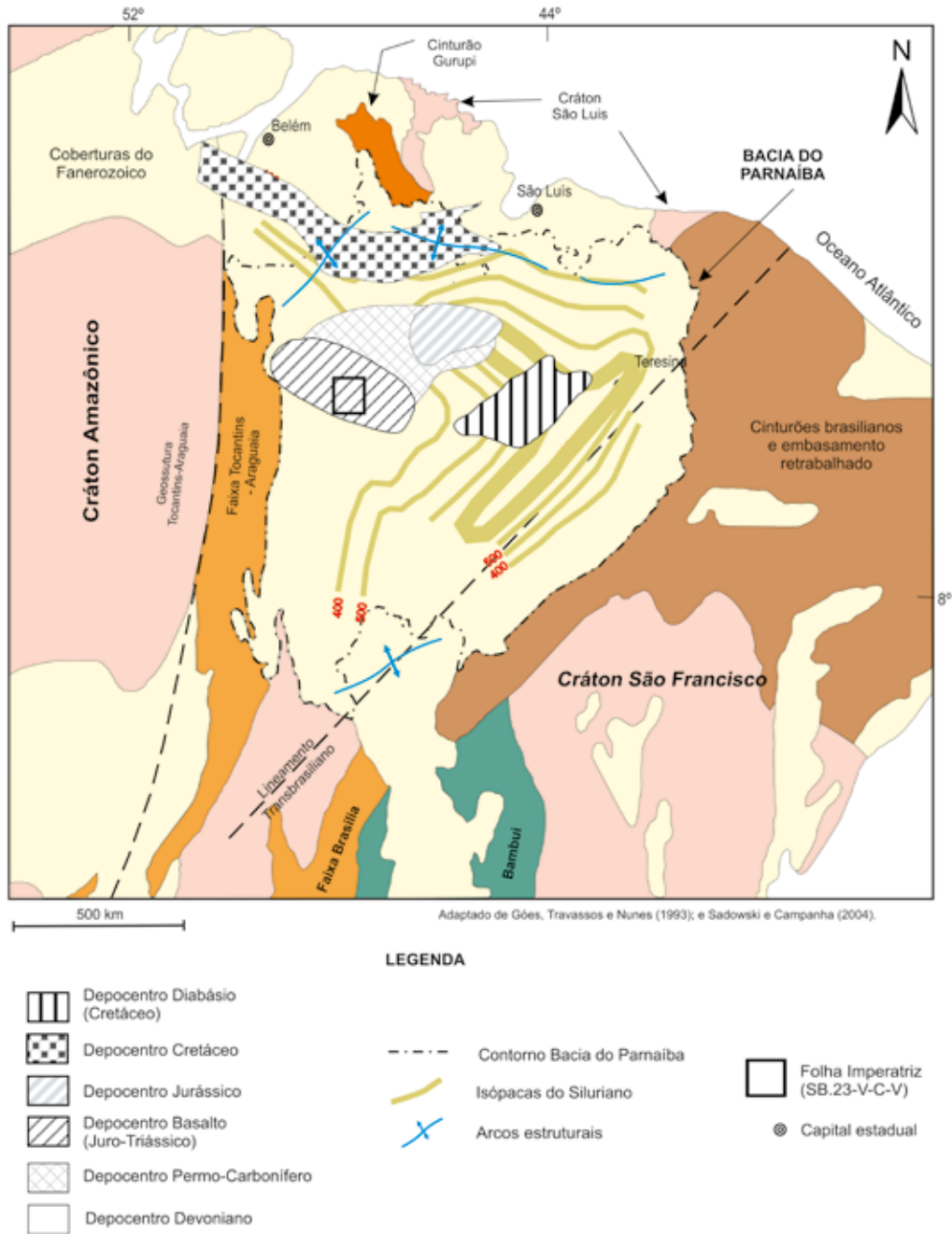
As sequências siluriana e mesodevoniana-eocarbonífera mostram as maiores taxas de sedimentação e representam um intervalo de maior subsidência tectônica da bacia (afundamento e sedimentação). Durante o grande intervalo de tempo em que foram depositados, os sedimentos das sequências seguintes, neocarbonífera-eotriássica e jurássica, a bacia experimentava soerguimento e erosão, com deflexões locais suficientes para a deposição de sedimentos.

Durante todo o Fanerozoico estes episódios de soerguimento e subsidência da bacia estariam associados, temporal e parcialmente, às orogenias sul-americanas. Esta associação pode ser observada principalmente para as Orogenias Norte-Americanas no Paleozoico.

No intervalo Triássico - Eo-Jurássico, marcado por uma sedimentação em ambiente desértico e magmatismo basáltico, a bacia estava em uma fase de soerguimento (curva de subsidência tectônica acima da curva termal). A Sequência Cretácea teria sido depositada em uma fase de afundamento / subsidência da bacia, com moderada taxa de sedimentação (figura 2.4). No Cretáceo (Albiano) teve início a fase de deriva continental contemporânea às orogenias sul-americanas pré-andinas.

SUB-DIVISÕES POSTERIORES DA BACIA DO PARNAÍBA

Góes (1995) propôs o desmembramento da Bacia do Parnaíba em bacias menores (figura 2.5), que segundo esse autor teriam gênese, estilos tectônicos, preenchimentos sedimentares e idades distintas, designadas de Bacia do Parnaíba (Siluriano-Triássico), Anfíclise das Alpercatas (Jurássico-Eocretáceo), Bacia do Grajaú e Bacia do Espigão Mestre, do Cretáceo (GÓES, 1995; GÓES; COIMBRA, 1996). A área correspondente à Bacia do Grajaú foi designada por Borges et al. (1997) de Bacia do Capim. Para Góes e Rossetti (2001), as bacias de Grajaú e São Luís inserem-se no contexto de uma mesma bacia, devendo ser referidas como Bacia de São Luís-Grajaú.



Figuras 2.3 – Depocentros, isópacas das seqüências sedimentares da Bacia do Parnaíba e principais traços de estruturas do embasamento.

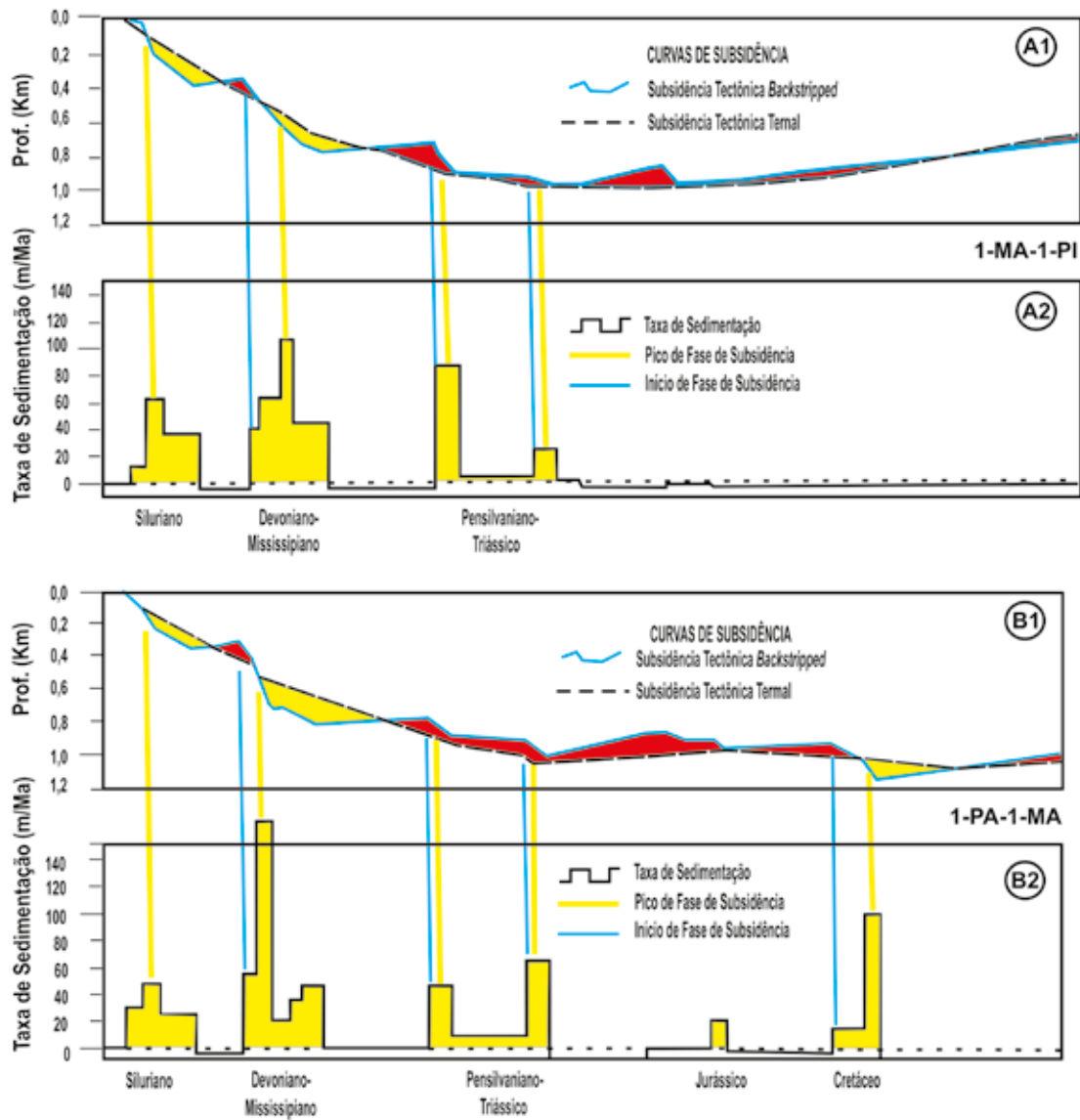


Figura 2.4 – Curvas de subsidência e taxas de sedimentação calculadas para a Bacia do Parnaíba ao longo de sua evolução geológica baseadas em dois poços. A linha de subsidência tectônica posicionada acima da subsidência termal representa períodos de soerguimento e erosão e abaixo dela representa afundamento e sedimentação. Os histogramas representam as taxas de sedimentação das cinco seqüências deposicionais nos períodos indicados. De acordo com Galushkin et al. (1996 apud ZALÁN, 2004).

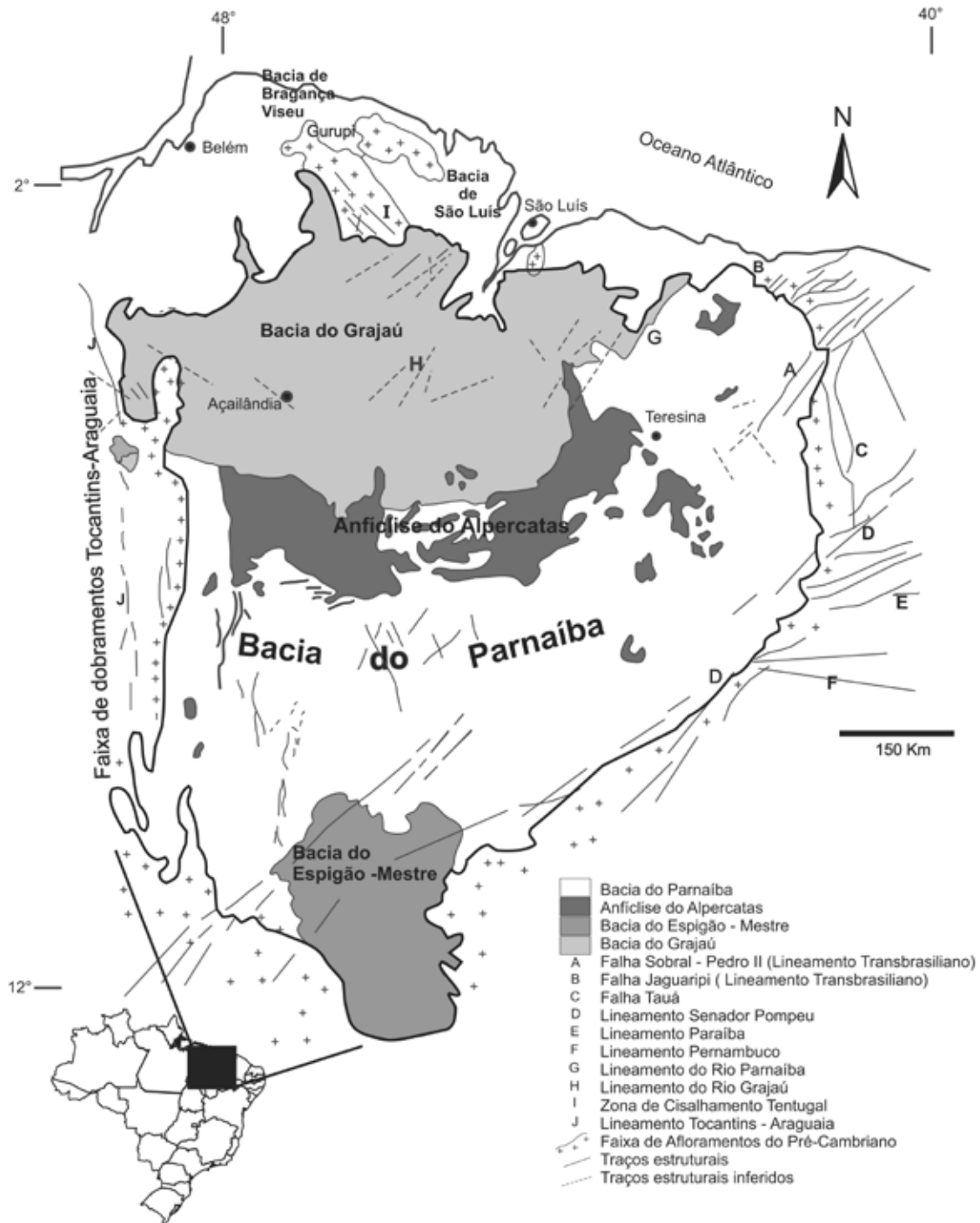


Figura 2.5 – Subdivisões sugeridas para a Bacia do Parnaíba (GÓES, 1995; GÓES; ROSSETTI, 2001; BORGES et al., 1997).

3 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Na região estudada afloram os basaltos da Formação Mosquito e apenas parte das rochas da Sequência Juro-Cretácea da Bacia do Parnaíba, as formações Corda, Grajaú, Codó e Grupo Itapecuru, além de unidades do Quaternário que recobrem as rochas mais antigas. Embora existam algumas propostas de arranjo litoestratigráfico para as unidades da Bacia do Parnaíba, este projeto propõe algumas modificações no empilhamento estratigráfico das unidades do Jurássico e Cretáceo mapeadas na área, como observado nas figuras 3.1 e 3.2.

A figura 1.2 mostra a localização das estações geológicas, algumas referidas a seguir, que serviram como base para o mapeamento da área do projeto.

3.1 FORMAÇÃO MOSQUITO (T3J1BM)

3.1.1 Introdução

A denominação de Formação Mosquito foi dada por Aguiar (1971) para representar os derrames basálticos, cinza-arroxeados, amigdaloides, aflorantes no rio de mesmo nome, a sul da cidade de Fortaleza dos Nogueiras. Segundo Lima e Leite (1978) basaltos com amígdalas preenchidas por calcedônia, zeólitas e material criptocristalino esverdeado constituem derrames com contato superior discordante com a Formação Corda e contato inferior interdigitado com a Formação Sambaíba, sugerindo contemporaneidade entre esta unidade e os derrames basálticos. Estes autores observaram que tal situação acontece apenas no flanco oeste da Bacia do Parnaíba.

Segundo Góes, Travassos e Nunes (1993) a atividade ígnea da Bacia do Parnaíba é a mais longa entre todas as bacias cratônicas brasileiras e é separada em três pulsos magmáticos principais, com base em datações radiométricas K-Ar e Ar-Ar em amostras de afloramentos e de poços da PETROBRAS, obtidas ao longo da Bacia do Parnaíba: o primeiro e segundo pulsos correspondem à Formação Mosquito e o terceiro pulso à Formação Sardinha (figura 3.3). O primeiro pulso ocorrido entre 220 e 180 Ma, é contemporâneo com enxames de diques do Amapá (Diabásio Cassiporé) e está relacionado à abertura do Oceano Atlântico Norte. O segundo pulso (180-150 Ma) seria concomitante com a fase de magmatismo da Bacia do Amazonas (Diabásio Penatecaua), e o terceiro pulso (150-110 Ma) é contemporâ-

neo com o magmatismo da Bacia do Paraná (Formação Serra Geral), relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Sul.

Trabalhos mais recentes se reportam a apenas dois pulsos principais: o primeiro é associado ao evento magmático Mosquito, correlacionado ao estágio de abertura do Oceano Atlântico Equatorial e Norte entre 200-190 Ma, mundialmente conhecido como CAMP - *Central Atlantic Magmatic Province* (MARZOLI et al., 1999). O segundo pulso é atribuído ao magmatismo Sardinha (130-120 Ma), correlacionado ao magmatismo Serra Geral da Bacia do Paraná (FODOR et al., 1990; BAKSI; ARCHIBALD, 1997), à abertura do Oceano Atlântico Sul e à separação dos continentes sul-americano e africano (BASIKI; ARCHIBALD, 1997; GÓES; TRAVASSOS; NUNES, 1993; MIZUSAKI et al., 2002; ZALÁN, 2004).

Há um provável pulso de idade intermediária entre as formações Mosquito e Sardinha, que segundo Góes, Travassos e Nunes (1993) está preferencialmente colocado nas unidades da sequência devoniana e não está agrupado em uma unidade formal.

Segundo Baksi e Archibald (1997), os basaltos da Formação Mosquito são geoquimicamente caracterizados como toleítos de baixo-Ti. Estes autores sugeriram, com base em suas datações Ar-Ar, que existam dois pulsos magmáticos principais da Formação Mosquito na Bacia do Parnaíba, corroborando com as proposições de Góes, Travassos e Nunes (1993) e Fodor et al. (1990).

Neste projeto adotaremos a idade de 200 Ma a 190 Ma (*Central Atlantic Magmatic Province*, cfe. reportado acima), para os basaltos da Formação Mosquito, já que não foi executada nenhuma nova datação neste trabalho. Este intervalo corresponde a um pequeno período dentro do primeiro pulso magmático ocorrido na bacia.

Na Folha Imperatriz a ocorrência da Formação Mosquito em superfície restringe-se à sua porção sul, onde aflora na forma de lajeiros (figura 3.4).

Esses basaltos são melanocráticos de cor cinza-escuro esverdeada, cinza a marrom-avermelhados, parcialmente alterados, maciços, afaníticos, geralmente com amígdalas preenchidas por calcedônia, zeólitas, ou calcita. Na estação GA-19 o basalto está recortado por vênulas de esmectita, e às vezes é possível identificar ripas milimétricas de plagioclásio espalhadas irregularmente.

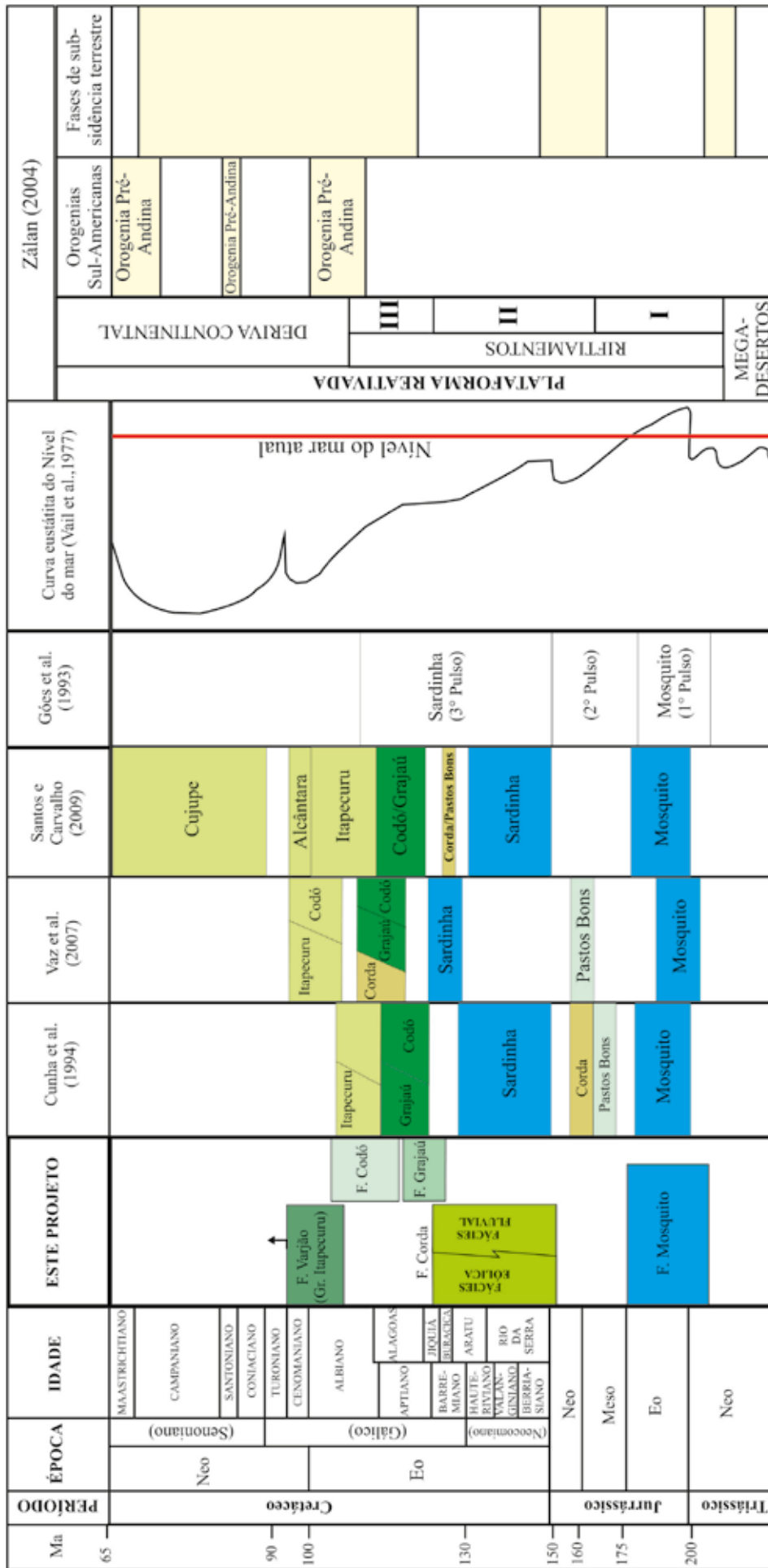


Figura 3.2 – Propostas de arranjo litostratigráfico das unidades juro-cretáceas da Bacia do Parnaíba, com a curva eustática do nível do mar e os principais eventos tectônicos do Cretáceo.

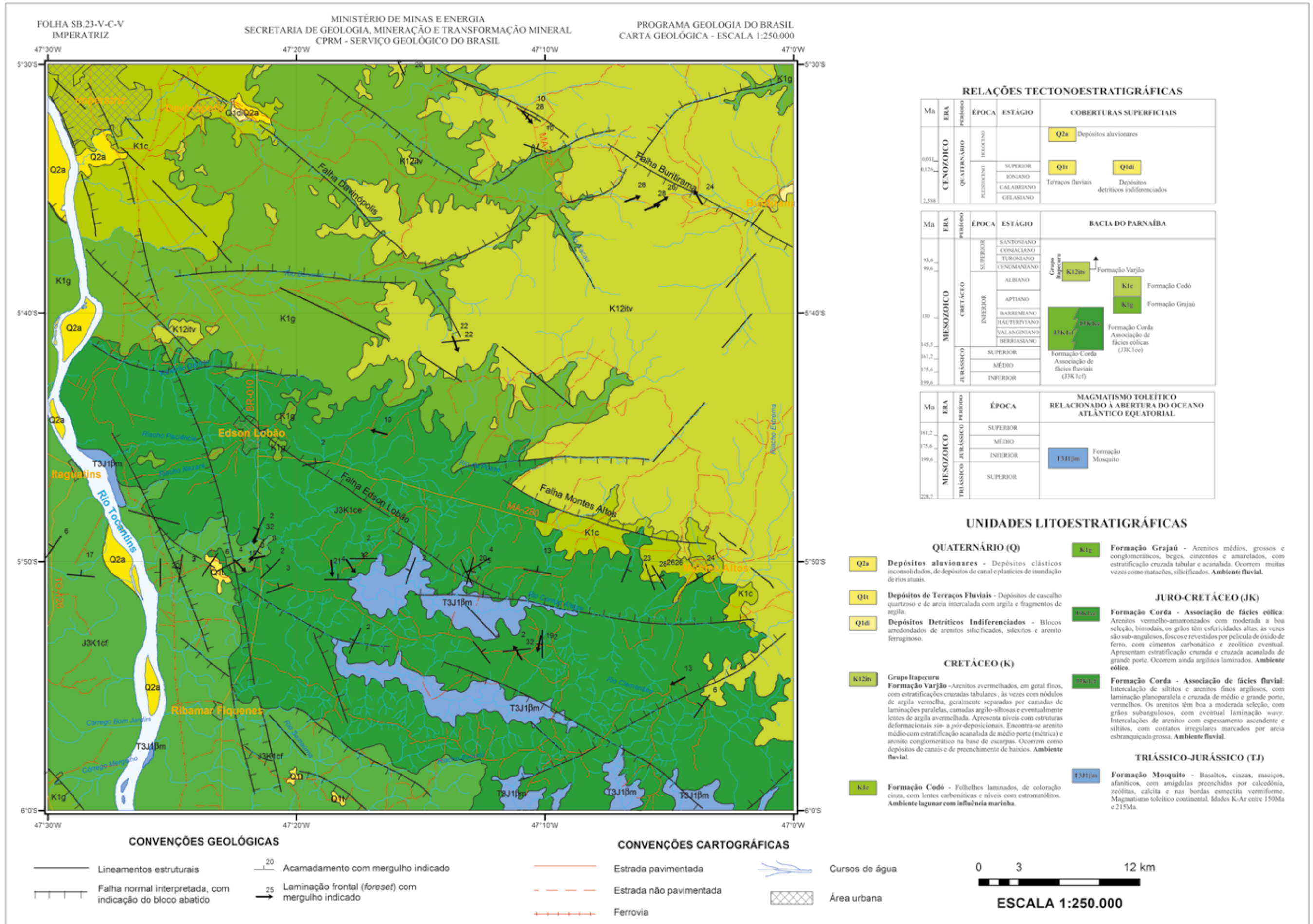


Figura 3.1 - Mapa geológico da Folha Imperatriz.

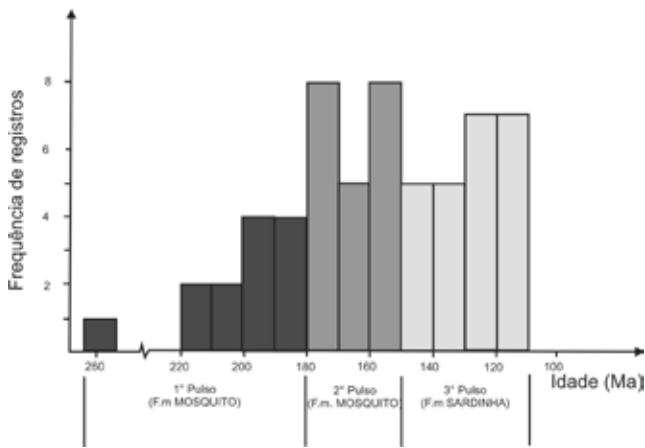


Figura 3.3 – Histograma com datações radiométricas K-Ar e Ar-Ar para os basaltos e diabásios da Bacia do Parnaíba (Góes; Travassos; Nunes, 1993).

No microscópio apresentam textura intergranular, intersetal e localmente amigdaloidal. São constituídos essencialmente por plagioclásio (andesina-labradorita) de 30% a 50%, 20% a 35% de clinopiroxênio (augita), e de 5% a 15% de minerais opacos (magnetita e ilmenita). Minerais secundários ocorrem preenchendo amígdalas e fraturas, como é o caso da esmectita e zeólita. As amígdalas são compostas mineralogicamente por esmectita de hábito vermiforme e zeólita de hábito fibroradial (figura 3.5). Geralmente a esmectita concentra-se na borda das amígdalas e o centro é preenchido por zeólitas. As esmectitas ora preenchem as amígdalas, ora aparecem como alteração dos feldspatos preenchendo os planos de clivagem do mineral (figura 3.6).

Em sub-superfície também foram detectados basaltos através de poços tubulares profundos executados na região pelos poderes públicos municipais e estadual, com a finalidade de abastecimento de água potável para a população, os quais ocorrem sotopostos aos litotipos da Formação Corda e apresentam uma espessura em torno de 200 a 250 m. Essas informações também propiciaram verificar-se a extensão da ocorrência do basalto em subsuperfície na Folha Imperatriz, possíveis falhamentos que o afetaram e as cotas em que ele foi interceptado, além de um melhor entendimento do empilhamento estratigráfico.



Figura 3.4 – Lajeiros de basaltos da Formação Mosquito (Rio Clementino, estação GA-15).

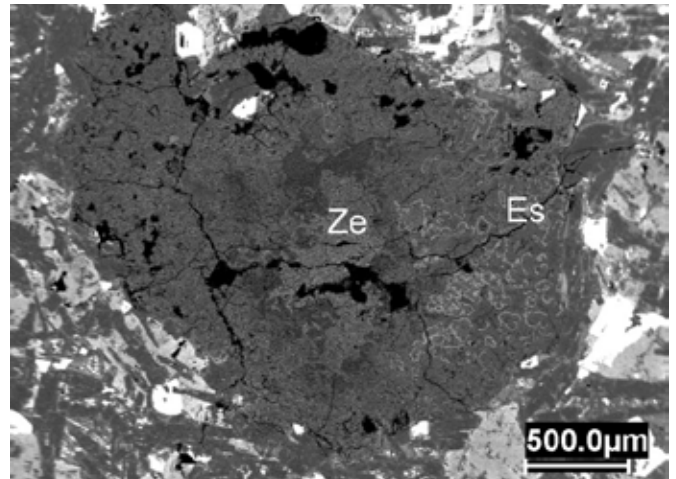


Figura 3.5 – Fotomicrografia (MEV) mostra amígdalas preenchidas por zeólita (Ze) no centro e esmectita (Es), nas bordas. Observe o hábito vermicular da esmectita. Aumento 100x, amostra GA-19A.

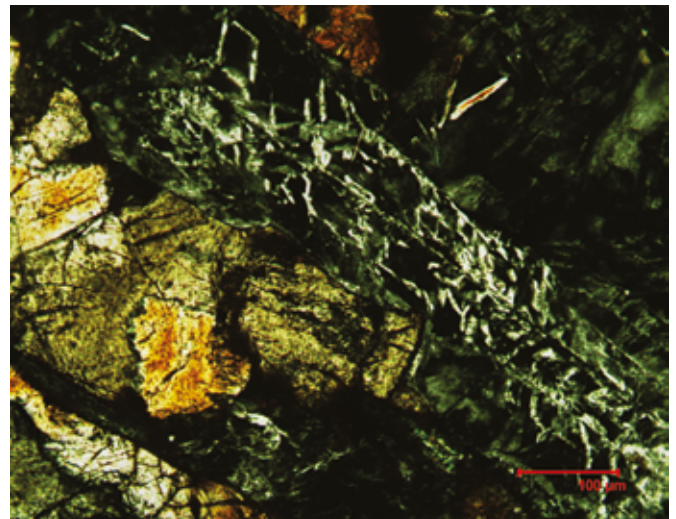


Figura 3.6 – Fotomicrografia de basalto da Formação Mosquito, mostrando cristal subédrico de plagioclásio, cujos planos de clivagem do mineral são preenchidos por filossilicatos (esmectita). Nicóis cruzados. Objativa:10X. Amostra GA-19A.

3.1.2 Litogeoquímica

As análises litogeoquímicas dos basaltos pertencentes à Formação Mosquito foram realizadas no ACME ANALYTICAL LABORATORIES LTD, no Canadá. A fusão com metaborato de lítio e determinação por ICP-ES (Induced Coupled Plasma – Emission Spectrometry) foi o método analítico utilizado para determinação dos elementos maiores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e Cr_2O_3), enquanto que os elementos menores e traços, inclusive os terras raras (Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) foram analisados por fusão com metaborato de lítio e determinação por ICP-MS (Induced Coupled Plasma-Mass Spectrometry). O Cu, Mo, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Hg, Tl e Se tiveram abertura realizada por diluição com

água régia e a dosagem por ICP-MS. Neste trabalho, o Fe_2O_3 foi recalculado para FeO, e Cr_2O_3 para Cr. Os softwares utilizados para construção dos diagramas foram o Minpet 2.02 e o Gcdkit 2.3.

Foram selecionadas para análise três amostras de basaltos, coletadas em afloramentos (GA-R-15, GA-R-49), e em testemunho de sondagem (MC-P-2). Para melhor entendimento das características litoquímicas desta unidade e em vista do reduzido número de amostras analisadas, foram considerados para comparação os dados analíticos obtidos por Fodor et al. (1990), que estudaram basaltos da Formação Mosquito em áreas adjacentes à Folha Imperatriz. Os resultados analíticos obtidos neste projeto estão apresentados na tabela 3.1.

3.1.2.1 Elementos maiores

No diagrama TAS para rochas vulcânicas (LE BAS et al., 1986) as amostras agrupam-se no campo de rochas subalcalinas/toleíticas e são classificadas como basalto e andesito basáltico (figura 3.7A). Já no diagrama

ma de Jensen (1976), as amostras inserem-se no campo dos basaltos toleíticos de alto Mg (figura 3.7B), sendo compatível com dados obtidos por Fodor et al. (1990), embora estes autores tenham caracterizado também basaltos toleíticos de alto Fe na Formação Mosquito.

No diagrama de Harker (figura 3.8) valores de TiO_2 para as amostras deste estudo variam de 1,28 a 1,34, enquanto que a variação do MgO é de 6,91 a 13,18. Estas amostras são mais enriquecidas em MgO se comparadas com as amostras de Fodor et al. (1990), que apresentam valores entre 2 a 5%, sugerindo que são menos evoluídas.

Fodor et al. (1990) classificam as rochas da Formação Mosquito como de baixo Ti, alto Mg e baixa razão FeO/MgO. Observa-se que as amostras de basaltos estudados neste projeto não possuem boa correlação com os campos definidos pelo referido autor (figura 3.8), com exceção do diagrama $\text{TiO}_2 \times \text{FeO/MgO}$ onde as amostras analisadas apresentam boa correlação e caem no campo das de baixo TiO_2 .

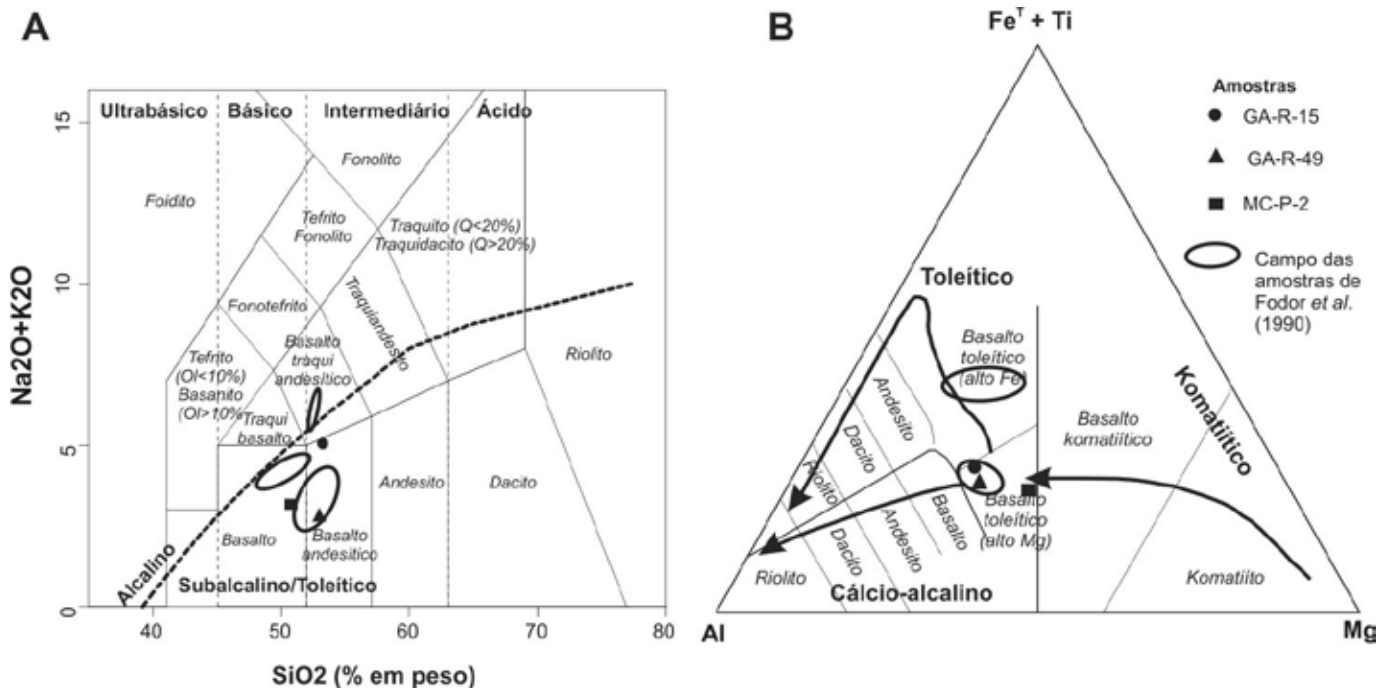


Figura 3.7 – Diagrama TAS (A) e diagrama catiônico de Jensen, 1976 (B) para classificação química dos basaltos da Formação Mosquito analisados neste trabalho, com os campos das amostras analisadas por Fodor et al. (1990).

3.1.2.2 Elementos traços

Ao analisar os diagramas de variação de elementos menores e traços versus TiO_2 , (figuras 3.9) juntamente com os campos das amostras de Fodor et al. (1990), observa-se que as amostras deste projeto mostram boa correlação para todos os elementos, e aparentemente correlação positiva entre TiO_2 versus Zr, V e P_2O_5 , além de caírem no campo dos basaltos baixo TiO_2 .

O diagrama dos padrões de distribuição dos Elementos Terras Raras, quando normalizados para o con-

drito de Boynton (1984), revela um leve enriquecimento de terras raras leves, com valores de $(\text{La/Lu})_n$ de 4,12 na amostra MC-R-02, de 3,40 na GA-15 e de 4,21 na GA-R-49 (figura 3.10).

No diagrama de multi-elementos, normalizados em relação ao manto primitivo de Sun e McDonough (1989), observa-se que as amostras obedecem a um certo padrão, embora se destaquem anomalias positivas para o U e K na amostra MC-P-02 e discreta anomalia positiva para Sr na amostra GA-14 (figura 3.11).

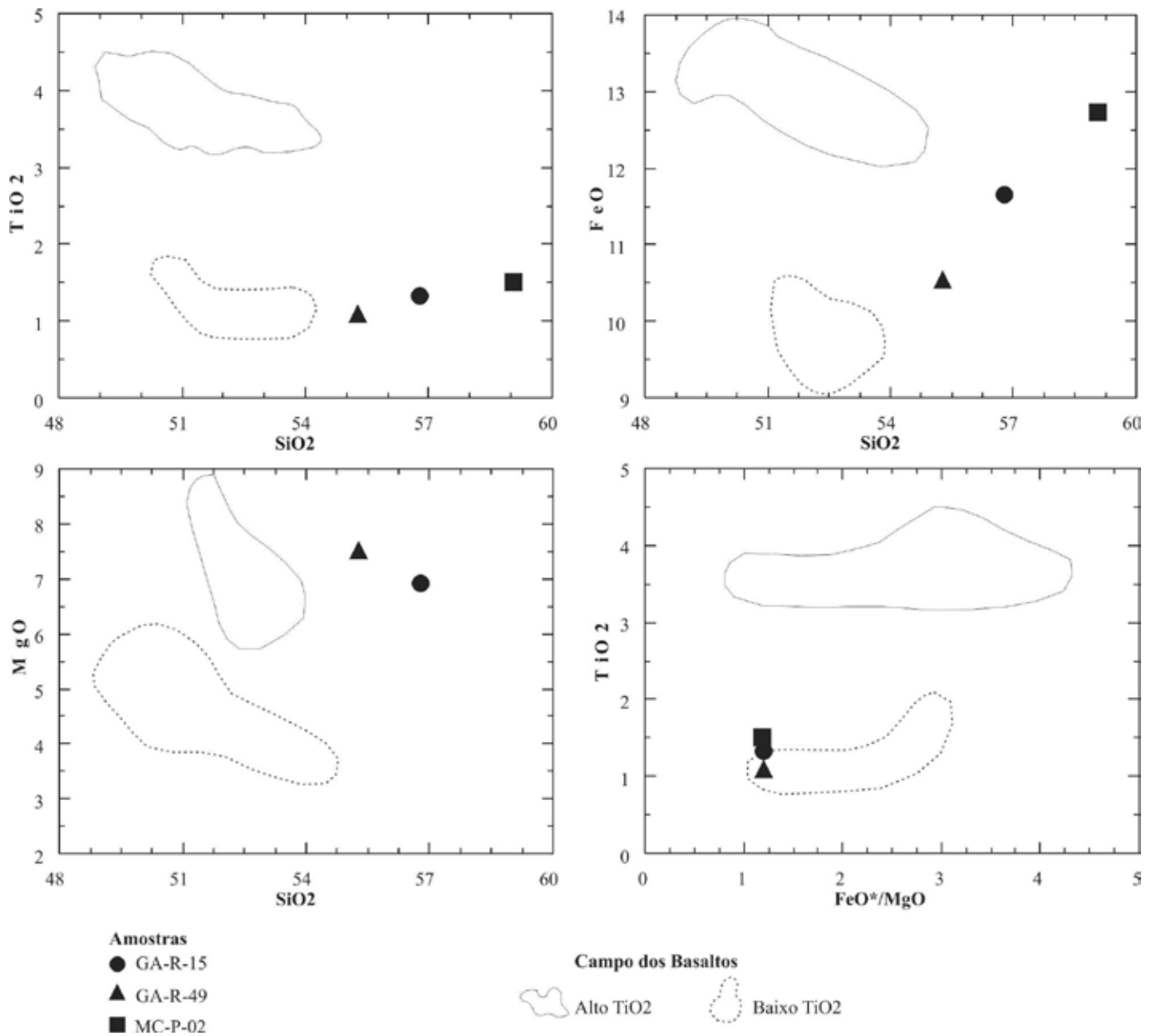


Figura 3.8 – Diagramas de Harker para elementos maiores para os basaltos analisados neste trabalho, com os campos das amostras estudadas por Fodor et al. (1990).

Amostras	Elementos																																																	
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	PF	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Hg	Sb	Zn	Rb	Cs	Ba	Sr	Ga	Ta	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sn	W	Mo	As	Au	Ag	Be	Bi	Cd
GAR-15	56,8	1,29	15,34	11,66	0,18	6,91	8,55	4,62	0,85	0,16	92,98	5,6	0	36	41,2	147,6	3,9	<0,01	<0,1	35	31,3	1	146	597,7	16,4	0,4	6,8	11,8	25,8	3,69	16	3,96	1,28	4,51	<0,01	5,02	0,94	2,87	0,42	2,52	0,36	1	<0,5	0,2	<0,5	1,5	<0,1	1	<0,1	<0,1
GAR-49	55,27	1,34	15,71	10,54	0,14	7,52	11,25	2,21	0,63	0,15	94,51	4,1	0,02	46	41,6	68,5	2,8	<0,01	<0,1	30	9,3	<0,1	200	285,8	17,2	0,5	9	15,8	28,1	3,91	16,8	3,9	1,3	4,78	0,85	5,07	1,01	3,18	0,44	2,67	0,39	<1	<0,5	0,2	<0,5	1,3	<0,1	1	<0,1	<0,1
MCP-2	59,05	1,28	17,25	12,72	0,19	13,18	8,56	1,61	2,03	0,16	86,54	12,1	0,03	56	41,3	104,7	4,7	0,01	<0,1	105	32,5	0,8	206	263,3	17,4	0,5	8,5	13,5	27,3	3,87	16,6	3,9	1,24	4,32	0,75	4,62	0,89	2,65	0,39	2,34	0,34	1	0,5	0,3	0,8	5	<0,1	1	<0,1	<0,1

Tabela 3.1 – Dados químicos das amostras de basaltos da Formação Mosquito.

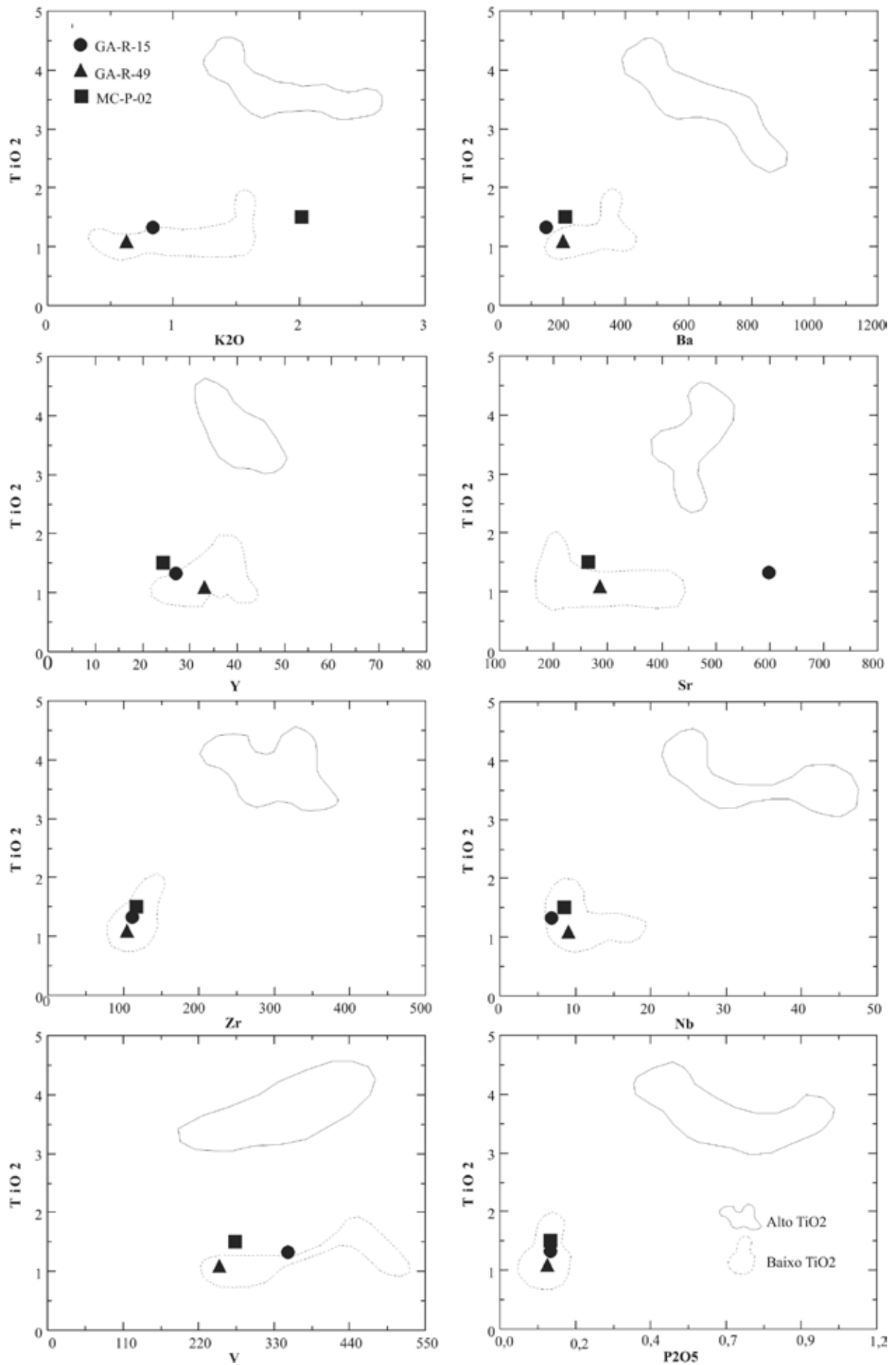


Figura 3.9 – Diagrama de variação composicional dos elementos menores e traços versus TiO_2 para basaltos da Formação Mosquito analisados neste trabalho com os campos das amostras de Fodor et al. (1990).

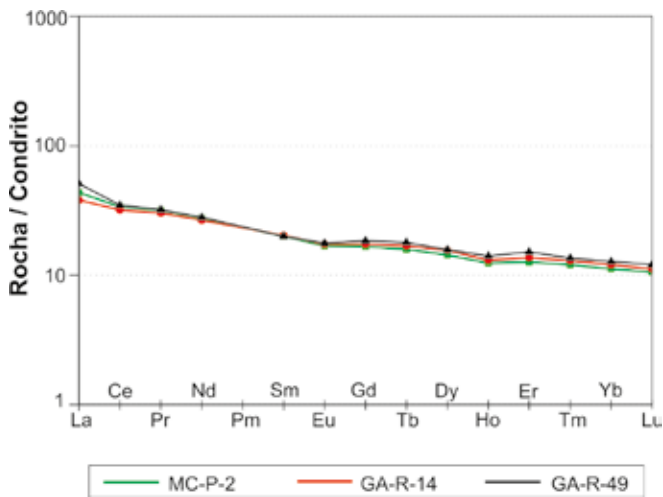


Figura 3.10 – Diagrama de ETR normalizados ao condrito (BOYTON, 1984) para os basaltos analisados.

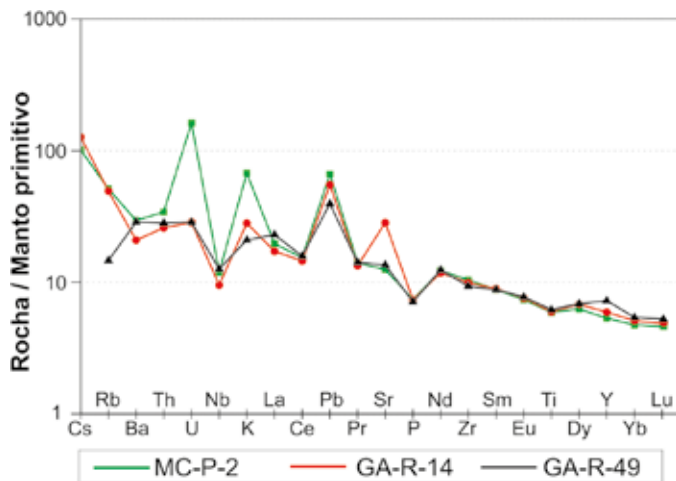


Figura 3.11 – Diagrama de ETR normalizados ao manto primitivo (SUN; MCDONOUGH, 1989) para os basaltos analisados.

3.1.2.3 Discussões

As províncias de basaltos toleíticos são descritas em domínios intraplaca continentais e oceânicos, sendo que os continentais subdividem-se em sub-províncias, enriquecidas ou não em TiO_2 , definindo respectivamente os BAT (basaltos alto titânio) e BBT (basaltos baixo titânio). Essas variações são indicativas da existência de heterogeneidades composicionais no manto litosférico subcontinental e/ou da existência de diferentes estágios de fusão de um mesmo protólito (WERNICK, 2004).

Fodor et al. (1990) definiram os basaltos da Formação Mosquito como continentais, dos tipos BAT e BBT, e apresentaram duas hipóteses para a fonte do magma desses basaltos: na primeira os BBT e BAT seriam provenientes de magmas de diferentes zonas do manto subcontinental, enquanto que na segunda, os basaltos seriam originados de uma mesma fonte, com modificações na sua composição isotópica, em função de contaminação crustal. A primeira hipótese requer processos geológicos especiais para criar heterogeneidades no manto subcontinental enquanto que a segunda requer

diferentes porcentagens de fusão parcial de uma única fonte para poder gerar basaltos de alto e baixo titânio.

Na região central da Bacia do Parnaíba magmas toleíticos com baixo-Ti da Formação Mosquito estão relacionados à abertura do oceano Atlântico Norte e Atlântico Sul (FODOR et al., 1990) e fazem parte da CAMP – Central Atlantic Magmatic Province (MARZOLI et al., 1999).

No diagrama da figura 3.12 os basaltos mais evoluídos estão claramente posicionados nos campos dos intraplaca. No caso dos basaltos classificados como menos evoluídos por Fodor et al. (1990), a maioria das amostras estão plotadas, também, no campo intraplaca, mas algumas caem no campo de rochas de cadeia meso-oceânica.

Nas amostras estudadas o enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP, geneticamente pode indicar que o magma foi gerado a partir de um protólito enriquecido em ETRL, ou que o magma foi gerado a partir de uma fonte rochosa por fusão parcial incipiente (FODOR et al., 1990).

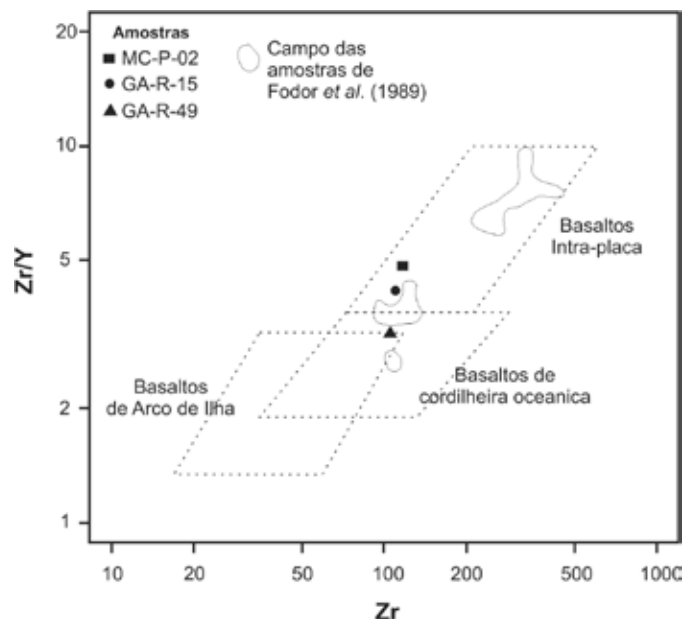


Figura 3.12 – Diagrama bivalente $\text{Zr}/\text{Y} \times \text{Zr}$ de Pearce e Norry (1979) para discriminação de ambiente geotectônico, utilizado para os basaltos da Formação Mosquito, incluindo-se os campos das amostras de Fodor et al. (1990).

3.2 FORMAÇÃO CORDA (J3K1c)

Esta denominação foi usada inicialmente por Lisboa (1914) para designar os arenitos vermelhos que ocorrem intercalados em basaltos no vale do rio Meirim. Os trabalhos mais recentes consideram Formação Corda essencialmente os arenitos vermelhos e castanho-avermelhados, muito finos a médios, de seleção regular a boa, semi-friáveis a semi-coesos, ricos em óxido de ferro e zeólitas (VAZ et al., 2007; REZENDE, 2002), sobrepostos concordantemente à Formação Pastos Bons,

e discordantemente aos basaltos da Formação Mosquito (LIMA; LEITE, 1978; SCHOBENHAUS et al., 1981, 1984).

Para Lima e Leite (1978) na região de Imperatriz esta unidade recobre discordantemente os basaltos da Formação Mosquito e unidades paleozoicas, e apenas com a Formação Pastos Bons tem contato concordante e gradacional. O contato superior da Formação Corda é discordante com as formações Codó, Grajaú e com o Grupo Itapecuru. Para Rezende (2002) e Vaz et al. (2007) a Formação Corda representa a porção proximal de um amplo sistema sedimentar integrando as formações Codó e Grajaú, sugerindo uma relação de contemporaneidade e interdigitação para estas três unidades. Rezende (2002) sugere ainda o desmembramento informal da Formação Corda em Corda I e Corda II, respectivamente para as porções oeste e centro-leste da bacia, baseado em relações de campo, correlações entre poços e no conteúdo mineralógico. Este mesmo autor sugere que o termo “Formação Corda” seja atribuído apenas para o segmento da porção oeste. O segmento da porção centro-leste, associado com a Formação Pastos Bons, carece de observações complementares e outro nome.

O conteúdo fóssilífero da Formação Corda é limitado. Lima e Leite (1978) registraram a ocorrência de conchostráceos e ostracodes em níveis pelíticos da unidade. Leonardi (1994) descreve pegadas de répteis saurópodos em camadas de arenito situadas na margem esquerda do Rio Tocantins, 20km a sul da cidade de Imperatriz.

Datações paleontológicas realizadas nos depósitos da Formação Pastos Bons indicaram idade Buracica para a mesma (LIMA; CAMPOS, 1980). O fato de as formações Pastos Bons e Corda apresentarem a mesma ocorrência de conchostráceos dos gêneros *Lioestheria* e *Macrolimnadiopsia*, identificados próximo da região da Folha Imperatriz (Montes Altos e Porto Franco), sugere forte tendência das duas unidades serem contemporâneas. Caldasso (1978) já aventava a possibilidade de as formações Corda e Pastos Bons serem equivalentes cro- noestratigráficos.

Adota-se neste trabalho o intervalo do Jurássico Superior ao Eocretáceo (Barremiano) para a deposição dos sedimentos da Formação Corda.

A Formação Corda aflora em toda a porção sul e centro-sul da Folha Imperatriz tendo sido identificadas e cartografadas duas associações de fácies nesta unidade, denominadas Associação de Fácies Eólica e Associação de Fácies Fluvial (figura 3.1).

3.2.1 Associação de fácies eólica (J3K1ce)

Compreende duas fácies: arenito com estratificação acanalada de grande porte (Aa) e argilito laminado com intercalações de arenito (PI).

3.2.1.1 Arenito com estratificação acanalada de grande porte (Aa)

Trata-se de arenito vermelho-marrom, semi-consolidado, moderadamente a bem selecionado, bimodal, constituído predominantemente por grãos de quartzo de granulação média, foscos e revestidos por uma película de óxido de ferro. Apresenta-se pintalgado de branco quando possui cimento zeolítico (figura 3.13). A zeólita encontra-se na fase intersticial preenchendo os poros dos arenitos, juntamente com calcita e esmectita. Estratificação cruzada tabular e cruzada acanalada de grande porte são as estruturas que caracterizam a fácies (figura 3.14). Interpreta-se esta fácies como de deposição em ambiente dominado por dunas eólicas.



Figura 3.13 – Aspecto mesoscópico do arenito com cimento zeolítico. Estação EL-35.



Figura 3.14 – Arenito zeolítico com estratificação cruzada acanalada de grande porte. Estação GA-08.

3.2.1.2 Argilito laminado com intercalações de arenito (Pl)

Esta litofácies é definida por intercalações centimétricas de argilito vermelho, composto por esmectita detrítica, com camadas milimétricas a centimétricas de arenito bimodal, arredondado e bem selecionado, com laminação plano-paralela, sua principal estrutura deposicional (figura 3.15A e B). Localmente, são observadas marcas onduladas incipientes no arenito e feições de gretas de contração no argilito. Nas porções sudeste e oeste da Folha Imperatriz esta litofácies mostra gradação, nos sentidos sul e oeste, para arenito fino a médio com estratificação horizontal plano-paralela, intercalado regularmente com camadas centimétricas de arenito muito fino. Estes litotipos vão se adelgaçando até desaparecerem, aflorando apenas os basaltos da Formação Mosquito. Esta é a única litofácies que não possui a fase

intersticial autigênica na forma de cimento zeolítico, possuindo apenas esmectitas autigênicas, que se formam preferencialmente em clima árido ou semi-árido e são típicas de ambiente neutro a alcalino, mal drenados e com abundância de íons (TARDY, 1969).

Interpreta-se esta fácies como depositada em ambiente subaquoso, em regime de fluxo de baixa energia e sob condições árida a semi-árida, com transporte predominantemente suspensivo, indicado pelo amplo domínio de esmectitas detríticas, com variações no influxo, ligada a sazonalidade, que propiciam a deposição de finas camadas de areia, produzindo alternância de sedimentação clástica argilosa e arenosa. Esta configuração é interpretada como típica de sistema lacustre interdunas, que gradam para lençóis de areia.



Figura 3.15 – (A) Visão geral do afloramento, com destaque para a laminação plano-paralela; (B) Detalhe da estruturação da fácies argilito laminado com intercalações de arenito. Estação GA-45.

3.2.2 Associação de fácies fluvial (J3K1cf)

Trata-se de uma associação constituída de arenitos com pelitos, que aflora no centro-sudoeste da Folha Imperatriz (figura 3.1).

3.2.2.1 Arenito com camadas heterolíticas (Ah)

Nesta fácies predomina arenito fino a médio, argiloso, avermelhado, mal selecionado, com laminação ondulada, com lentes de areia média, branca, de grãos

bem arredondados, na base do pacote (figura 3.16A), que passam em direção ao topo para acamamentos heterolíticos ondulados (figura 3.16B), com areia fina, argilosa, avermelhada, com lentes de areia média esbranquiçada. Esta gradação é feita através de camadas centimétricas e onduladas de arenito fino, ferruginoso, bem litificado (figura 3.16C). Estes acamamentos heterolíticos e as lentes de areia grossa são representativos de oscilações de corrente, e as camadas onduladas de arenito fino indicam um fluxo mais contínuo, ocorrendo interrupção no influxo para ferruginização e cimentação destas camadas.

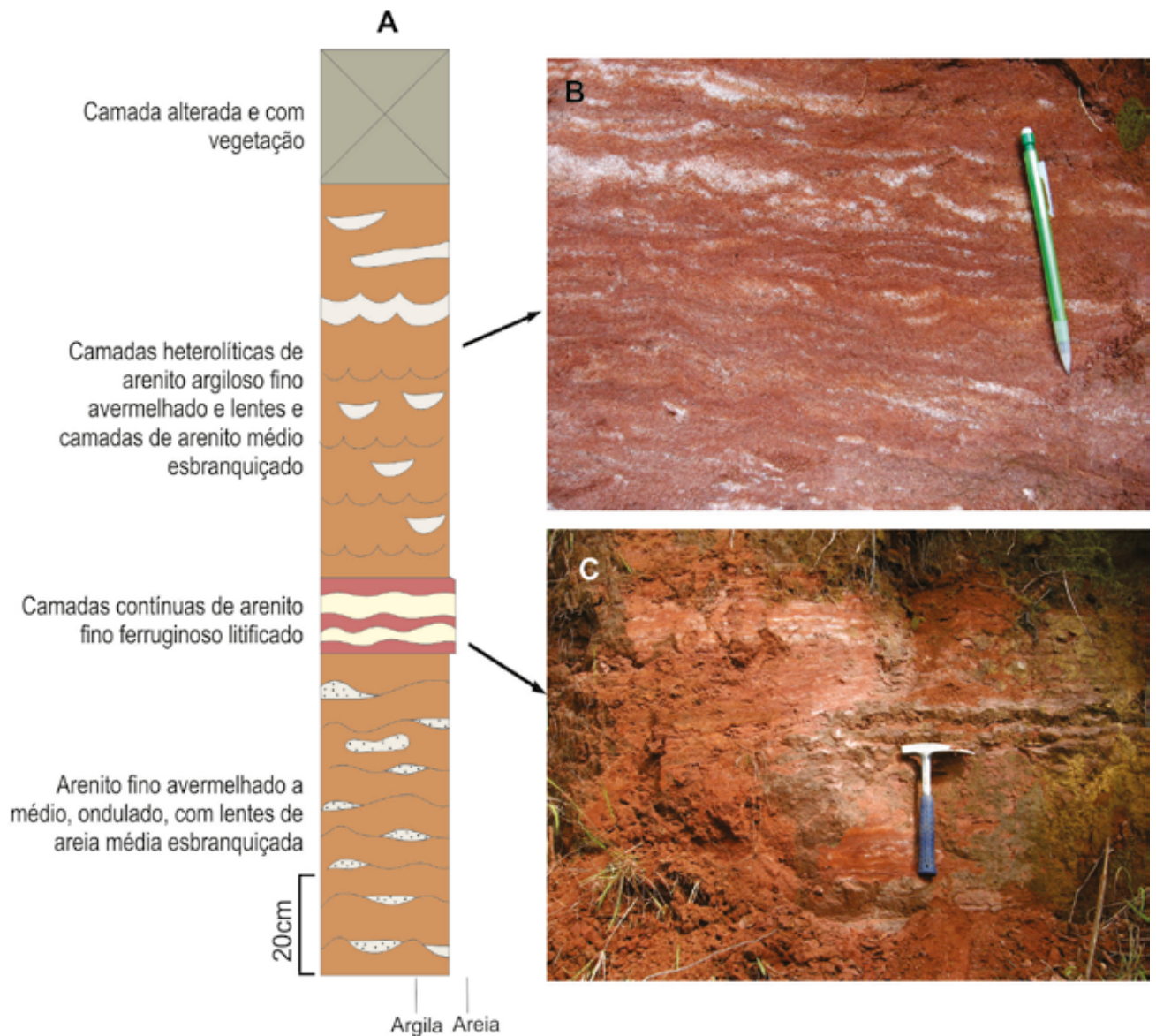


Figura 3.16 – (A) Perfil esquemático da fácies arenito com camadas heterolíticas; (B) Detalhe do acamamento heterolítico; (C) Detalhe do arenito ferruginoso com camadas onduladas (topo do martelo). Estação EL-19.

3.2.2.2 Argilito-siltoso e arenito médio intercalado (Pa)

Esta fácies compreende argilito-siltoso, vermelho, laminado, intercalado com arenito de granulação média, vermelho, de grãos sub-arredondados, com estratificação cruzada tabular de médio porte. As camadas do arenito são centimétricas a métricas, se espessam em direção ao topo (figura 3.17) e têm base e topo ligeiramente irregulares, indicando erosão e possivelmente retrabalhamento das litofácies Aa e Pl, da Associação Eólica. Esta litofácies predomina em toda extensão sudoeste da área mapeada, sendo indicativa de variações de descargas, alternando enxurradas (depositando areia) e fluxos de pouca intensidade (depositando argila-siltosa).

3.2.2.3 Arenito com estratificação acanalada de pequeno porte (Aac)

A estação GA-04 mostra algumas das fácies que compõem a Associação Fluvial (figura 3.18). Na base do afloramento ocorre a fácies Aac, que é definida por arenito vermelho de granulação média a fina, com cimento zeolítico, e com estratificação cruzada acanalada de pequeno porte. Este arenito grada verticalmente para a fácies Al. Interpreta-se que a fácies Aac é de regime de fluxo contínuo e moderado, podendo indicar depósitos de canais.

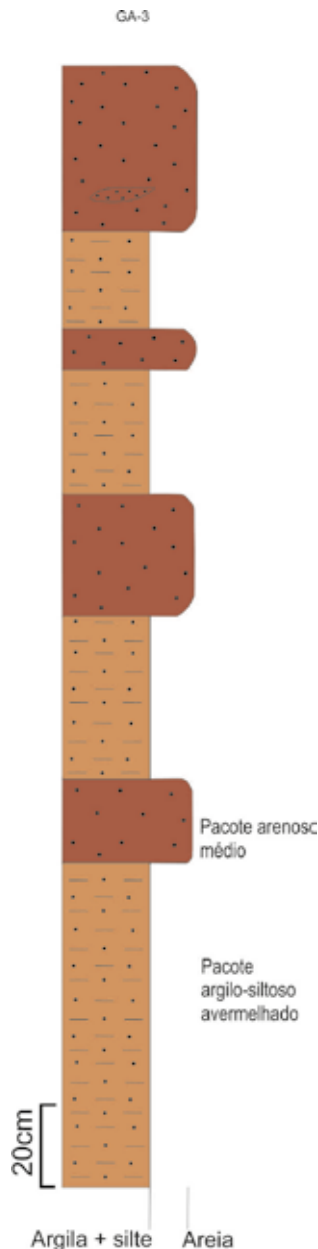


Figura 3.17 – Perfil vertical mostrando intercalação de argilito-siltoso e arenito, com espessamento das camadas de arenito para o topo. Estação GA-03.

3.2.2.4 Arenito fino com laminação cruzada de baixo ângulo (Al)

Arenito fino, argiloso, com laminação cruzada de baixo ângulo e tangencial nos limites inferior dos sets, e no limite superior apresenta laminação cruzada tabular. Estes arenitos apresentam contato irregular com uma camada lenticular de arenito grosso, maciço e esbranquiçado, que limita o topo da camada (figura 3.18). Esta fácies indica que o regime de fluxo era pouco intenso com pequenas variações na intensidade, gerando laminação cruzada e cruzada tangencial, passando a laminação cruzada tabular no topo dos sets. Durante as variações de fluxo houve enxurradas que geraram depósitos arenosos grossos e maciços.

3.2.2.5 Argilito-siltoso com laminação cruzada de baixo ângulo (Plm)

Argilito-siltoso esbranquiçado e vermelho, com laminação cruzada e cruzada tangencial na porção superior do pacote. Esta litofácies grada verticalmente para a litofácies Ga, em contato brusco e levemente irregular (figura 3.18). Fluxos menos intensos favoreceram a deposição do pacote argilo-siltoso laminado (Plm).

3.2.2.6 Arenito médio a grosso (Ga)

Arenito médio a grosso, vermelho, zeolítico, com incipiente estratificação plano-paralela na base do pacote (figura 3.18), depositado sob regime de fluxo superior.

As variações de regime de fluxo interpretadas nas fácies da Associação Fluvial e as estruturas formadas são indicativas de sistema fluvial, provavelmente de rios efêmeros, com variações sazonais, que influenciam no regime de fluxo dos canais, implantados em ambiente desértico de clima árido a semi-árido.

3.2.3 Camadas e paleodireções de fluxos

Na Formação Corda, no domínio da Associação de Fácies Eólica, as paleodireções de ventos mostram sentidos para os quadrantes W-NW e N-NE (figuras 3.19A e B). No domínio da Associação de Fácies Fluvial os baixos mergulhos das camadas agrupam-se nos quadrantes sudeste e noroeste (figuras 3.20A e B) e as paleodireções de correntes medidas em extratos cruzados mostram sentidos preferenciais dos mergulhos para sudoeste (figuras 3.20C e D).

3.3 FORMAÇÃO GRAJAÚ (K1g)

Lisboa (1914) usou o termo “Série Grajaú” para designar os arenitos que ocorrem no topo do platô Grajaú, e Aguiar (1971) denominou esses arenitos de Formação Grajaú. Para Lima e Leite (1978) o contato inferior da Formação Grajaú é discordante com as formações Corda e Mosquito, e interdigitado com a Formação Codó. Trabalhos de Rezende (2002) e Rossetti, Góes e Truckenbrodt (2001) também afirmam esta interdigitação e contemporaneidade entre as formações Grajaú e Codó.

A Formação Grajaú é afossilífera, sendo considerada como pertencente ao Aptiano/Albiano por sua relação de contemporaneidade com a Formação Codó (LIMA; LEITE, 1978; ROSSETTI; GÓES; TRUCKENBRODT, 2001; REZENDE, 2002; VAZ et al., 2007), e é de origem flúvio-deltaica e eólica, de acordo com Mesner e Woolridge (1964) e Lima e Leite (1978).

Na área da Folha Imperatriz, a Formação Grajaú aflora em lajeiros em trechos ao longo do Rio Tocantins, nas proximidades da cidade de Imperatriz, e do Rio Bananal, e nas regiões da Gameleira e Buritirana. Ao longo da estrada MA-280 aflora na forma de blocos silicificados dispersos na superfície.



Figura 3.18 – Visão geral do afloramento e distribuição das litofácies Aac, Al, Plm e Ga, da Associação de Fácies Fluvial. Estação GA-04.

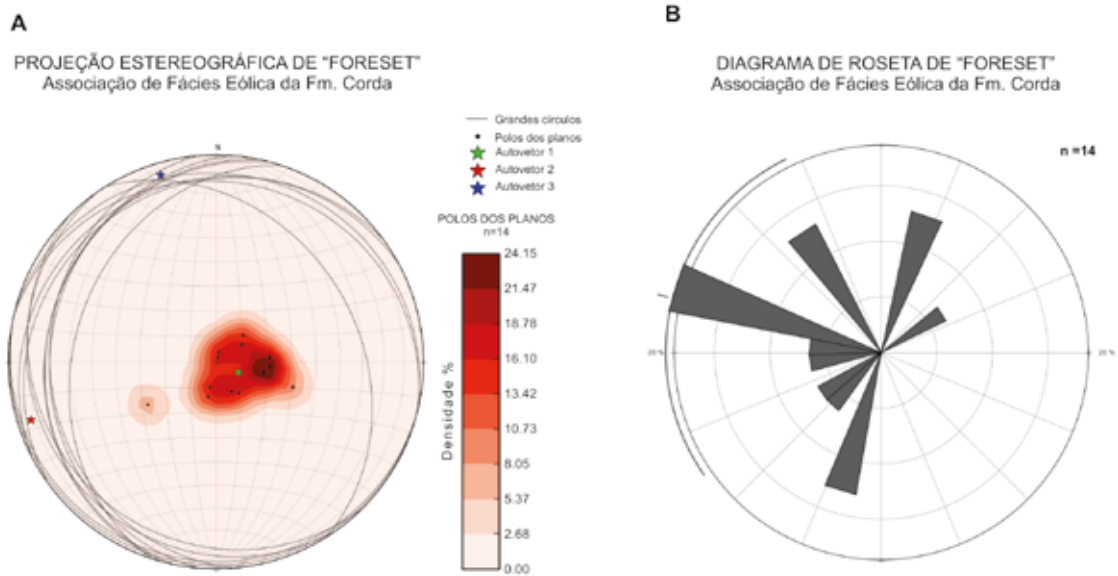


Figura 3.19 – (A) Representação gráfica das paleodireções de ventos da Associação de Fácies Eólica da Formação Corda, com as atitudes das lâminas frontais; (B) Sentidos de ventos, dados pelos mergulhos das laminações.

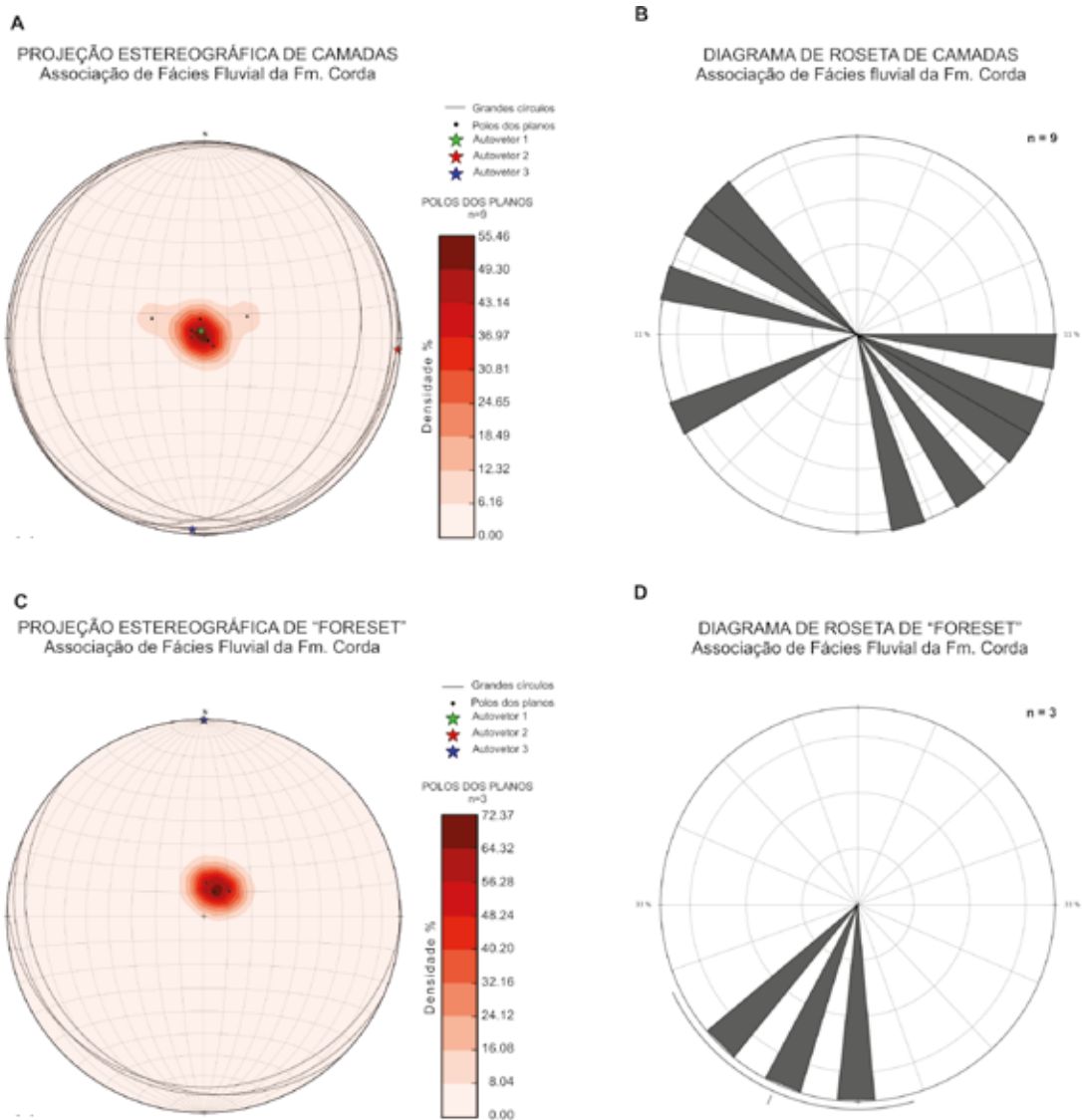


Figura 3.20 – A) Representação gráfica das atitudes das camadas da Associação de Fácies Fluvial da Formação Corda; B) sentidos dos mergulhos; C) atitudes das paleodireções de correntes (laminações frontais); e D) sentidos de paleocorrentes, dados pelos mergulhos das laminações.

A Formação Grajaú na área mapeada é composta por arenito médio a grosso e arenito conglomerático, semi-coeso e bege. O arenito médio a grosso possui grãos de quartzo sub-arredondados, seleção moderada e laminação plano-paralela. O arenito conglomerático está na parte basal do pacote, tem estratificação cruzada acanalada marcada por seixos milimétricos a centimétricos de quartzo, grãos mal selecionados e subangulosos. Por vezes as rochas aflorantes no barranco do Rio Bananal encontram-se muito fraturadas (figura 3.21). Em afloramento na margem do Rio Tocantins, estes arenitos exibem depósitos conglomeráticos compatíveis com depósitos de canal e residuais de canal fluvial (figuras 3.22 e 3.23). Ao longo do perfil do Rio Tocantins, próximo da cidade de Imperatriz, observa-se que estes arenitos passam abruptamente para os folhelhos e carbonatos da Formação Codó.

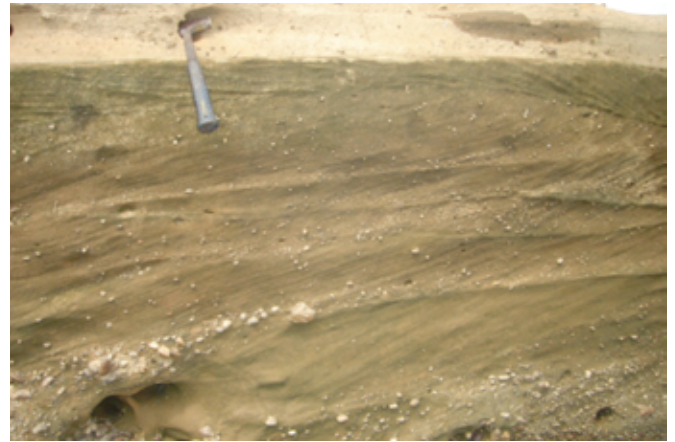


Figura 3.23 – Arenito conglomerático com estratificação cruzada típica de depósitos de canais. Estação NR-106.



Figura 3.21 Afloramento exibindo arenito com laminação plano-paralela no topo e arenito conglomerático com estratificação cruzada acanalada na base, intensamente fraturados. Estação EL-54.



Figura 3.22 – Afloramento na margem do rio Tocantins, onde observa-se arenito conglomerático com estratificação cruzada acanalada, e camadas conglomeráticas mais espessas, configurando depósitos de canal. Estação NR-106.

Também são correlacionados à Formação Grajaú, matacões e blocos dispersos na superfície (figura 3.24A), que ocorrem geralmente no sopé dos morros da Formação Varjão (Grupo Itapecuru), nas planícies e sobre os lajeiros da Formação Corda, constituídos por arenito médio silicificado, cinza-esbranquiçado, muito litificado, composto de grãos de quartzo de granulação média e subarredondados, com alguns grãos de feldspato alterados para caulinita. Esta rocha possui aproximadamente 5% de matriz argilosa, esbranquiçada e fosca. Boa parte dos matacões de arenito tem aspecto brechoide, cor rosa, e estão muito litificados (figura 3.24B), e contêm grãos angulosos de quartzo e alguns fragmentos líticos de uma rocha muito fina e cinza escura (basalto?), com feições drusiformes irregulares (figura 3.24C). Alguns matacões são de chert e/ou quartzo microcristalino com aspecto maciço e homogêneo, extremamente litificado.

O moderado a elevado grau de arredondamento dos grãos (discutido no Capítulo 5) observado em algumas amostras sugere que parte dos clastos que compõem o arcabouço da Formação Grajaú é oriunda do retrabalhamento dos arenitos eólicos da Formação Corda, indicando que estes não foram transportados a grandes distâncias.

3.4 FORMAÇÃO CODÓ (K1c)

A denominação “folhelhos Codó” foi empregada pela primeira vez por Lisboa (1914) ao se referir aos folhelhos betuminosos associados a calcários que ocorrem no vale do Rio Itapecuru, na região de Codó, no Maranhão. Mesner e Wooldridge (1964) elevaram essas rochas à categoria de Formação.

Segundo Leite, Aboarrage e Daemon (1975), Lima e Leite (1978) e Paz e Rossetti (2001), na região próxima de Imperatriz, ao longo do Rio Tocantins, a Formação Codó compreende três associações de fácies: a basal, composta por folhelho cinza-escuro com intercalações de leitos calcários; a intermediária, composta por siltito argiloso cinza-esverdeado com intercalações subordinadas de folhelho e arenito calcífero; e a superior, constituída essencialmente de arenito fino, cinza-claro e esverdeado, calcífero, com intercalações delgadas de folhelho e siltito.



Figura 3.24 – (A) blocos de arenito silicificado e/ou chert. Detalhe das feições vesiculares (B) e drusiformes (C) presentes nos blocos. Estações MC-01, EL-31 e GA-22.

De acordo com Paz e Rossetti (2001), nas proximidades da cidade de Codó, a Formação Codó é dividida nas associações “lago central” (folhelho negro e evaporitos), transicional (argilito, *mudstone* calcífero e calcário) e “marginal” (pelito, calcário, gipsita-arenito, turfa e ritmito de calcário/folhelho). No entanto, a análise palinológica feita por Rossetti, Góes e Arai (2001) nesta região, determina a existência de duas unidades separadas por discordância erosiva: a Unidade Inferior, de idade neoptiana, que é predominantemente lacustre, e corresponde aos depósitos tradicionalmente relacionados à Formação Codó; a Unidade Superior, de idade meso/neoalbiana, que é interpretada como de ambiente costeiro parálico, típico de lagunas e baías interdistributárias, que seria correlacionada ou a partes da “Unidade Indiferenciada”, ou à Formação Alcântara, ambas definidas na Bacia de São Luís.

Mendes e Borghi (2005) identificaram uma discordância erosiva na Formação Codó, subdividindo-a em Sequência 1 e Sequência 2, baseados em análise faciológica em testemunhos de sondagem. Estes mesmos autores consideraram esta discordância erosiva como um limite de sequência de origem tectônica dentro da Formação Codó, sem desmembrar a formação em unidades diferentes. A interpretação de tal atividade tectônica é suportada com base na identificação de estruturas deformacionais admitidas, por Góes e Rossetti

(2001), como de origem sísmica.

Santos e Carvalho (2009) encontraram uma fauna diversificada de peixes na Formação Codó, idêntica à encontrada por Ponte e Ponte Filho (1996) nas bacias do Araripe e Sergipe/Alagoas. Estes autores identificaram dois eventos biológicos nestas bacias, o primeiro no Aptiano, e o segundo no Albiano, interpretando que o último evento é atribuído a uma superfície de inundação marinha. Correlacionando os peixes da Formação Codó com os das bacias do Araripe e Sergipe/Alagoas, Santos e Carvalho (2009) não admitem o desmembramento da Formação Codó em depósitos diferentes (Aptiano e Albiano), como postulado por Rossetti, Góes e Arai (2001) e Paz e Rossetti (2001), até que estudos mais detalhados sejam realizados.

O contato inferior da Formação Codó com a Formação Corda é discordante, evidenciado por uma mudança litológica brusca através de uma superfície irregular e ondulada (LIMA; LEITE, 1978). O contato inferior com a Formação Grajaú é gradacional e o contato superior com o Grupo Itapecuru é concordante, com discordâncias locais (LIMA; LEITE, 1978).

Na área estudada a ocorrência da Formação Codó restringe-se à região de Imperatriz e Montes Altos, na porção NW da Folha Imperatriz, estando exposta em cortes de estrada, cavas e na margem do Rio Tocantins (figura 3.25).

Ocorre predominantemente folhelho cinza escuro, ou avermelhado quando alterado, laminado, intercalado com níveis carbonáticos centimétricos (figuras 3.25 e 3.26) com feições estromatolíticas, com diâmetro de 3 a 5 m, e espessura de 1m (figuras 3.27A e B). Há frequentes concentrações oxidadas, que são produtos de alteração da pirita e, talvez pontualmente, da esfalerita. Na porção basal do afloramento NR-148 ocorre arenito fino, argiloso, cinza-plúmbeo, contendo fragmentos vegetais carbonizados.

As litofácies da Formação Codó observadas na Folha Imperatriz são indicativas de deposição em ambiente lagunar com alguma influência marinha, em concordância com os estudos de Paz e Rossetti (2001) e Lima e Leite (1978).

3.5 GRUPO ITAPECURU (K12it)

Arenitos com siltitos e folhelhos intercalados, que recobrem concordantemente a Formação Codó, foram denominados de “Camadas Itapecuru” por Lisboa (1914), tendo sido posteriormente redefinidos por Campbell (1949) como Formação Itapecuru. A partir de então os depósitos sedimentares delimitados pelas associações Grajaú/Codó (Aptiano) na base, e Pirabas/Barreiras (Oligo-Mioceno) no topo, no estado do Maranhão e nordeste do Pará têm sido referidos como Formação Itapecuru (e.g. MESNER; WOOLDRIDGE, 1964; CUNHA; CARNEIRO, 1973; LIMA; LEITE, 1978; SCHOBBE-NHAUS et al., 1981).

Posteriormente, Rossetti (1997) e Rossetti e Truckenbrodt (1997) propuseram a elevação da Formação à categoria de Grupo, designação adotada neste trabalho. Estes autores, em estudos realizados na Bacia de São Luís, englobaram a Formação Cujupe (Turoniano-Terciário Inferior?), correlacionada com a Formação Ipixuna (Sub-Bacia de Cametá), a Formação Alcântara (Albiano Superior-Cenomaniana) e a “Unidade Indiferenciada” (Albiano Inferior a Médio) (figura 3.28). O ambiente deposicional da Formação Alcântara teria sido



Figura 3.25 – Visão geral do afloramento de folhelho intercalado com carbonato, nas margens do Rio Tocantins. Estação NR-148.



Figura 3.26 – Intercalações de folhelho com níveis centimétricos de carbonato (seta). Estação NR-148.

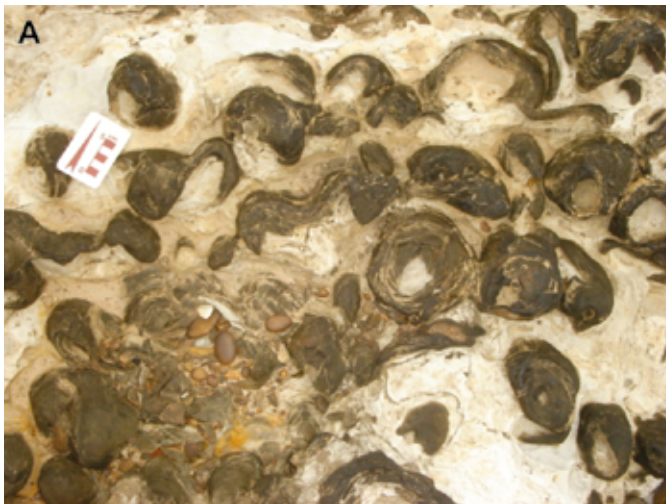


Figura 3.27 – Nível com feições estromatolíticas vistas em planta (A) e em perfil (B). Estação NR-148.

principalmente lagunar e canais de maré, enquanto que a deposição da Formação Cujupe teria se dado em ambiente de correntes de maré.

Rossetti (2001) dividiu informalmente o Grupo Itapecuru no norte da Bacia do Parnaíba em 2 sequências deposicionais (S2 e S3), limitadas por superfícies discordantes de caráter regional, em que a sequência basal S2 possui organização interna compatível com tratos de sistemas, tem idade eo/mesoalbiana, e mostra uma subdivisão interna tripartida (S2a, S2b, S2c), enquanto a sequência superior S3 é de idade mesoalbiana-maastrichtiana, possuindo seis unidades cíclicas superpostas (S3a a S3f), que podem estar associadas às frequentes transgressões marinhas no Neolábiano ao Cenomaniano.

Anaisse Jr. (1999) correlaciona os Depósitos Itapecuru à Formação Alcântara, no sentido de Rossetti e Truckenbrodt (1997), em função das similaridades faciológicas e do posicionamento estratigráfico (figura 3.28).

Na região de Açailândia, no Maranhão, foram definidos ambientes de canal fluvial, laguna, canal de maré e litorâneo, que integram um sistema estuarino-lagunar para a deposição de sedimentos correlacionados ao Grupo Itapecuru (ANAISSE JR.; TRUCKENBRODT; ROSSETTI, 2001). Na região centro-leste da Bacia do Parnaíba foram identificados depósitos de delta de baía (LIMA; ROSSETTI, 2001). Para o sul, Lima e Leite (1978) afirmam que a deposição do Grupo Itapecuru seria predominantemente fluvial.

Idade		Estratigrafia								
		Rossetti (2001)		Rossetti e Truckenbrodt (1997)	Anaisse Jr. (1999)					
Cenomaniano/ Maastrichtiano	Albiano	S3	f	GRUPO ITAPECURU	Fm. Cujupe	Fm. Ipixuna				
			e		Fm. Alcântara	Depósitos Itapecuru				
			d		Unidade Indiferenciada (não aflorante)					
			c							
			b							
			a							
	Meso	S2	c							
			b							
			a							
		Neo	S1		S1	c	Formações Codó e Grajaú	Formações Codó e Grajaú		
						b				
						a				
Eo	S1			S1		Formações Codó e Grajaú			Formações Codó e Grajaú	
										b
										a
Aptiano	S1	S1	Formações Codó e Grajaú	Formações Codó e Grajaú						
					b					
					a					

Figura 3.28 – Síntese das propostas definidas na Bacia de São Luís-Grajaú, segundo Rossetti (2001) e sua correlação com Rossetti e Truckenbrodt (1997) e Anaisse Jr. (1999), com ênfase no Grupo Itapecuru. Modificado de Rossetti (2001).

O contato do Grupo Itapecuru com as formações Codó e Grajaú é concordante, apresentando discordâncias locais (LIMA; LEITE, 1978). Na região noroeste da Bacia do Parnaíba este grupo é recoberto discordantemente por material argilo-arenoso do Terciário-Quaternário. De acordo com Lima e Leite (1978), o Grupo Itapecuru extrapola os limites geológicos da Bacia do Parnaíba, assentando diretamente sobre o embasamento cristalino e sobre as unidades paleozoicas.

O Grupo Itapecuru possui diversificado conteúdo fóssilífero, como impressões de folhas, palinóforos, peixes, bivalvíos, conchostráceos, ostracóides, carófitas, carapaças de tartaruga, ossada de crocodilos, fragmentos de ovos, de dentes, ossadas e pegadas de dinossauros (SANTOS; CARVALHO, 2009).

Os trabalhos que enfocaram os ambientes deposicionais do Grupo Itapecuru nas últimas décadas o têm associado com ambientes marinhos litorâneos de estuários, canais de maré e lagunas. No entanto, no contexto da Folha Imperatriz, as rochas sedimentares pertencentes ao Grupo Itapecuru caracterizam uma sedimentação de caráter predominantemente continental fluvial, como já destacado por Lima e Leite (1978).

Neste trabalho propõe-se a designação de Formação Varjão para representar os registros desta sedimentação continental, relacionada ao Grupo Itapecuru. As exposições em que se baseia a proposta são aquelas observadas ao longo da rodovia MA-122, no trecho entre os municípios de Senador La Rocque e Buritirana, a leste-sudeste do município de Imperatriz, no estado do Maranhão.

3.5.1 Formação Varjão (K12itv)

As rochas sedimentares incluídas na Formação Varjão estão expostas em toda a porção nordeste/leste da área do projeto, em cortes de estrada e sustentando morros escarpados. Verticalmente e lateralmente foram distinguidas quatro litofácies, conforme descrição abaixo.

3.5.1.1 Arenito fino com estratificação plano-paralela e cruzada acanalada (Apa)

Esta fácies localiza-se na base do pacote da Formação Varjão, compreende arenitos finos, vermelhos, com grãos subarredondados e com estratificações cruzada tabular e cruzada acanalada de pequeno a médio porte. Os arenitos ocorrem em camadas que variam de 1,5 m a 2 m de espessura e que não possuem boa continuidade lateral (figura 3.29). Apresentam contato superior brusco e irregular com a litofácies argilito-siltítico vermelho maciço (Am). As características desta fácies indicam deposição em dunas subaquosas de crista sinuosa em fundo de canal.

3.5.1.2 Argilito-siltítico vermelho maciço (Am)

Esta fácies apresenta-se em camadas com espessura em torno de 1 m e com excelente continuidade



Figura 3.29 – Arenito fino com estratificação cruzada acanalada. Estação MC-39.

lateral, sendo mapeável por dezenas de metros. É composta por argilito vermelho, plástico, maciço, às vezes com pacote irregular de siltito argiloso vermelho no topo. Geralmente apresenta marcas indicativas de bioturbação (figura 3.30). Interpreta-se que esta fácies se depositou por mecanismos de suspensão e decantação em planície de inundação ou em canais abandonados.



Figura 3.30 – Argilito-siltítico vermelho maciço, apresentando marcas indicativas de bioturbação. Estação MC-34.

3.5.1.3 Arenito fino com estruturas sin- e pós-deposicionais (Asp)

Esta fácies ocorre em camadas com espessura de 1 a 3 m e formato acunhado. Apresenta contatos ondulados com a fácies inferior Am, e com a fácies superior Aag. É definida por arenito fino a muito fino, siltoso, amarelado, avermelhado e esbranquiçado e cinza escuro, mal selecionado e com grãos subarredondados. Possui laminação cruzada incipiente (figura 3.31A), camadas convolutas (figura 3.31B), estruturas *ball-and-pillow*, e é seccionada por planos de escorregamentos (*slump*), que a coloca em contato com outras fácies. A porção basal da fácies apresenta-se ondulada, e com seixos dispersos

de argilito (figura 3.31C), indicando retrabalhamento da fácies Am.

Essas características são indicativas de depósitos de canal fluvial com variações de fluxo. A ocorrência de estruturas deformacionais sin- e pós-deposicionais atesta forte perturbação dos sedimentos ainda em estado inconsolidado ou semi-consolidado, e mostra similaridade com as estruturas interpretadas por Rossetti (1999) e

Rossetti et al. (2000), que estariam ligadas a eventos paleossísmicos registrado em depósitos albianos da Bacia de São Luís-Grajaú. Porém, o pacote aflorante na Folha Imperatriz representa um sistema deposicional favorável a instabilidades gravitacionais, devido a altas taxas de deposição e com sobrecarga de depósitos arenosos em sedimentos mais finos, bem diferentes do processo proposto para os depósitos albianos.

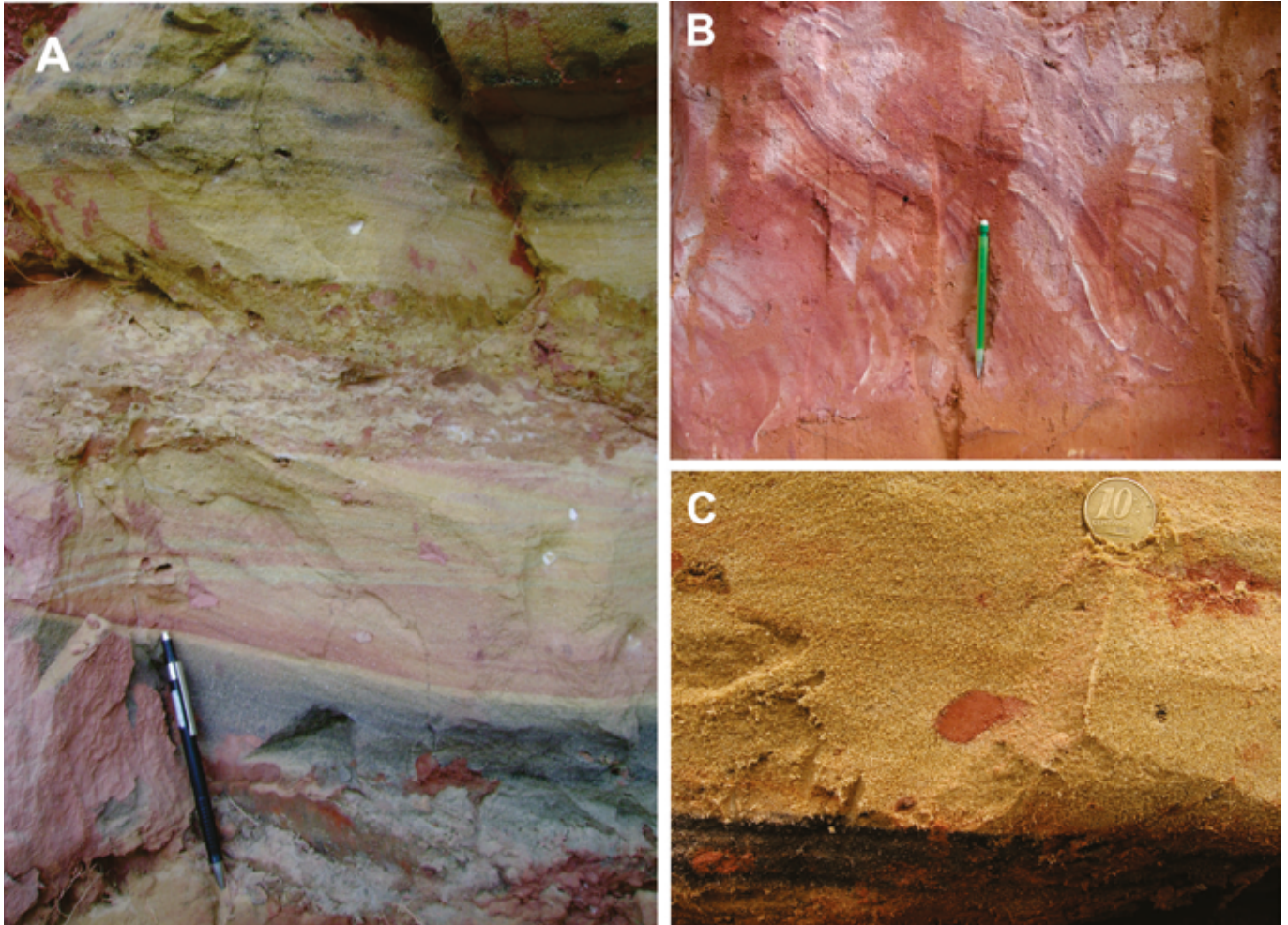


Figura 3.31 - (A) Camadas de arenito com laminação cruzada incipiente, cinza escuro devido à presença de matéria orgânica. (B) Camadas convolutas; (C) Porção basal da camada de arenito com seixos de argilito. Estações MC-33, EL-48 e EL-24.

3.5.1.4 Arenito fino estratificado intercalado com camadas e lentes de argilito vermelho (Aag)

Esta fácies geralmente está no topo do pacote da Formação Varjão, ocorre em estratos com aproximadamente 3 m de espessura, com boa continuidade lateral. É definida por arenito fino, amarelado e avermelhado, com estratificação cruzada e plano-paralela, intercalado com camadas de 20 cm e lenticulares de argilito vermelho maciço. Para o topo, grada para um arenito fino

vermelho e amarelado, com estratificação plano-paralela e cruzada (figura 3.32). Estas características indicam frequente diminuição do fluxo no canal, ora decantando argila e ora depositando areia.

A sucessão de fácies da Formação Varjão é separada por superfícies de erosão que limitam canais e/ou planícies de inundação (figura 3.33). Todo este conjunto, que caracteriza a Formação Varjão no âmbito da Folha Imperatriz, é interpretado como depositado em ambiente fluvial meandrante.

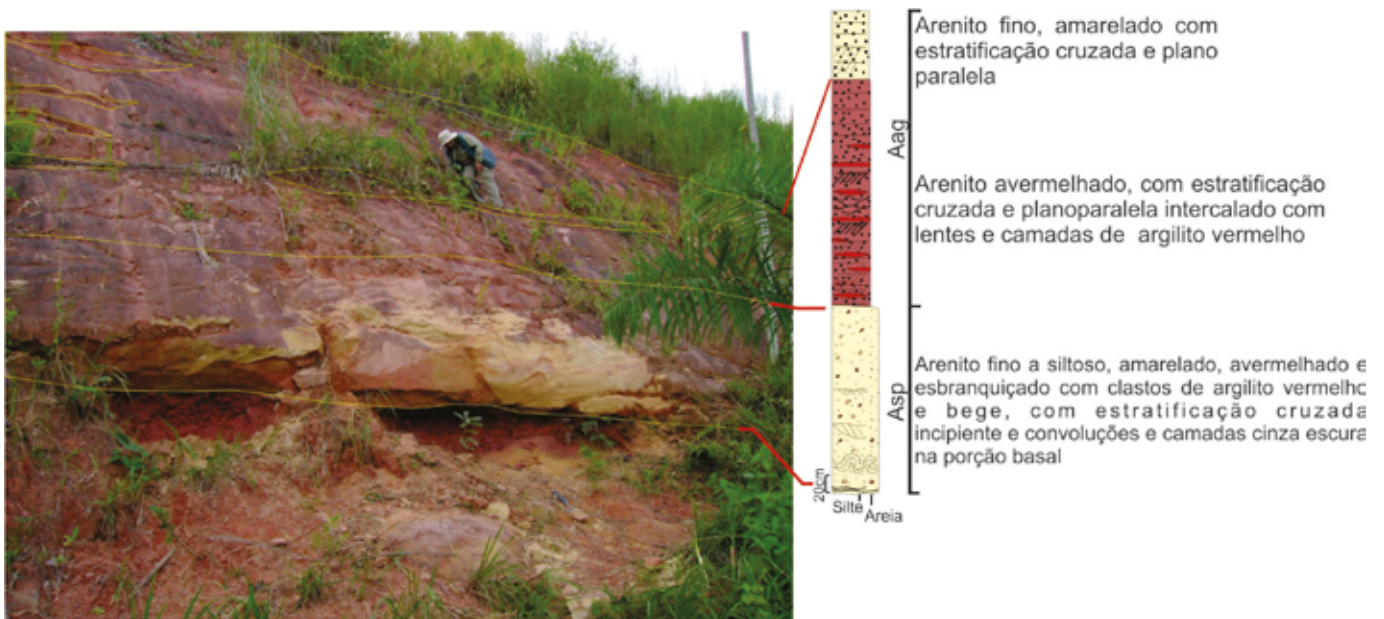


Figura 3.32 – Afloramento de corte de estrada exibindo a litofácies arenito fino com intercalações de camadas e lentes de argilito vermelho (Aag) e seu respectivo perfil litológico. Na base do perfil a presença da fácies arenito fino com estruturas sin e pós-deposicionais (Asp). Estação EL-24.

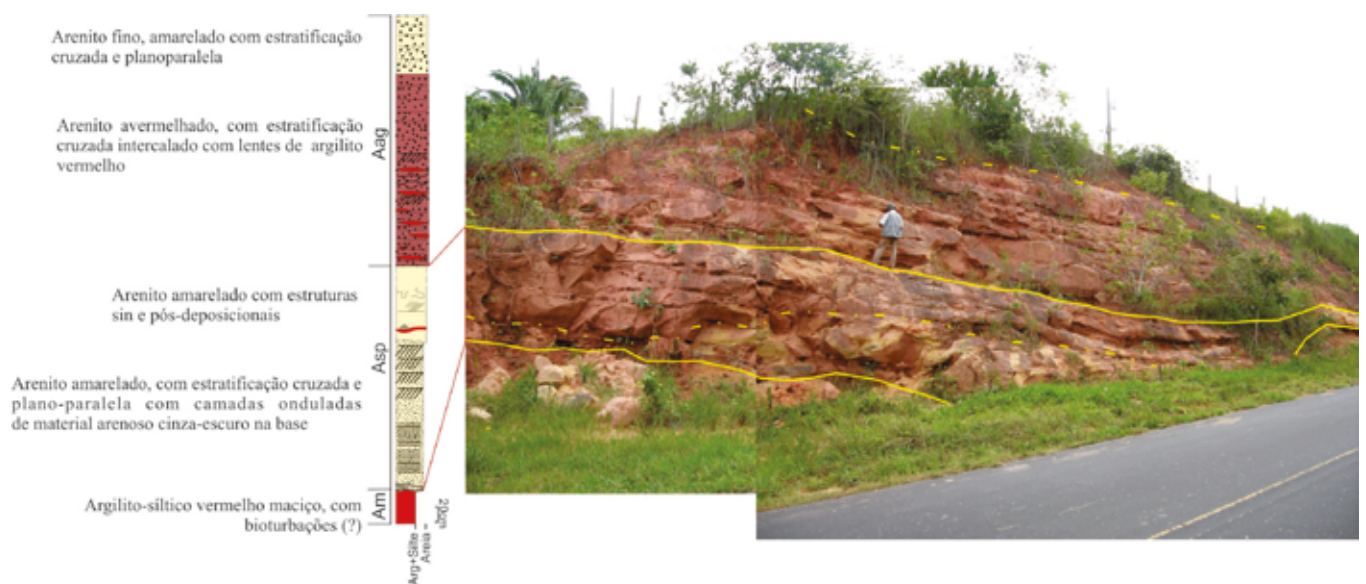


Figura 3.33 – Perfil vertical e afloramento mostrando as fácies Am, Asp e Aag da Formação Varjão. Estação MC-33. Linha amarela contínua: limites entre canais e/ou planície de inundação. Linha amarela pontilhada: mudanças de estrutura e/ou de cor dentro da mesma litofácies.

3.5.2 Camadas e paleodireções de fluxos

Na Formação Varjão os mergulhos das camadas são para SW e subordinadamente para NW (figuras 3.34A e B), e as paleocorrentes, obtidas em canais fluviais (figuras 3.34C e D) estão direcionadas para o quadrante E-NE a E-SE.

3.6 DEPÓSITOS DE TERRAÇOS FLUVIAIS (Q1t)

Lima e Leite (1978) fizeram a primeira referência aos terraços aluvionares do Rio Tocantins, onde encontraram depósitos de areia e cascalho de até 12 m de espessura. Na área da Folha Imperatriz, estes depósitos não ultrapassam 6 m de espessura, ocorrem em uma faixa que acompanha o rio Tocantins, no entanto, distante 5 km a leste de seu leito atual. São representados

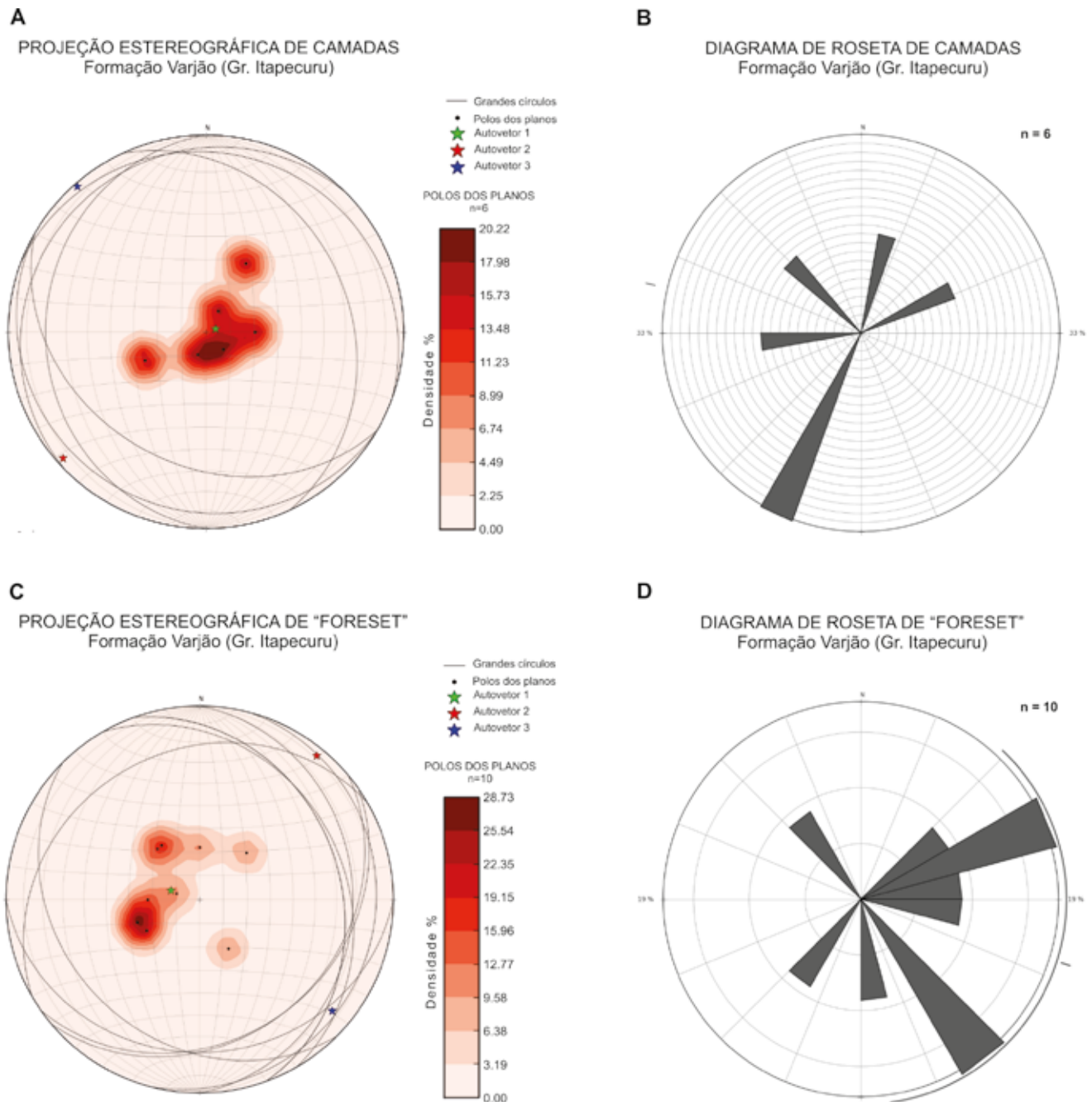


Figura 3.34 – (A) Representação gráfica das atitudes das camadas da Formação Varjão; (B) principais sentidos dos mergulhos; (C) atitudes das paleodireções de correntes (laminações frontais); e (D) sentidos de paleocorrentes, dados pelos mergulhos das laminações.

por cascalhos semi-consolidados, que recobrem discordantemente as formações Corda, Codó e Grajaú, constituídos por seixos de quartzo, e mais raramente de sillexito, com granulação variando de 1 a 10 cm. Os seixos são mal selecionados, arredondados e suportados por uma matriz areno-siltosa, mal selecionada, de coloração amarelada.

Estes depósitos possuem estratificação plano-paralela marcada pelo imbricamento dos seixos (figura 3.35). Localmente possuem intercalações de areia média a grossa maciça e encontram-se ferruginizados no topo (figura 3.36).

O pacote possui variações granulométricas verticais (figura 3.37) que podem estar associadas com variações no regime de fluxo do antigo paleovale do Rio

Tocantins. Medidas de paleocorrentes indicam direção preferencial SE-SW, sugerindo que o sentido do fluxo no paleovale era inverso do atual.

3.7 DEPÓSITOS DETRÍTICOS INDIFERENCIADOS (Q1di)

Esta unidade é constituída por matações de arenito silicificado, sillexito e arenito ferruginoso, às vezes brechóides, relacionados a colúvios holocênicos, que recobrem irregularmente as formações Itapecuru e Codó, na porção norte da Folha Imperatriz. (figura 3.38).

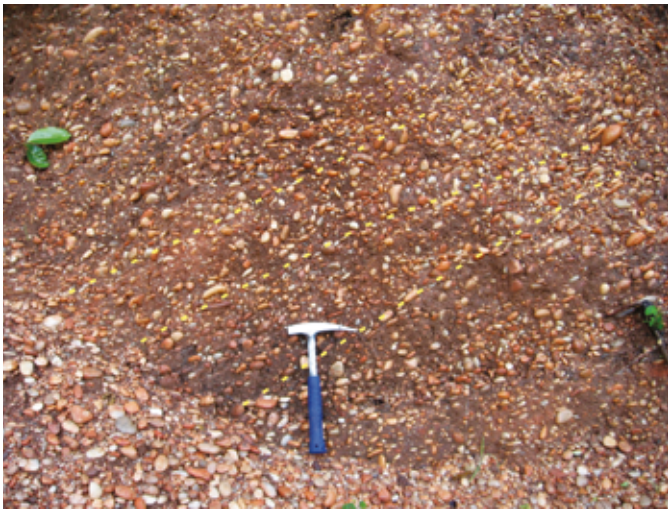


Figura 3.35 – Estratificação plano-paralela (linhas tracejadas) e seixos imbricados presentes nos Depósitos de Terraços Fluviais. Estação EL-06.



Figura 3.37 – Variações granulométricas verticais ligadas a variações no regime de fluxo. Estação EL-07.



Figura 3.36 – Porções ferruginizadas presentes no topo dos Depósitos de Terraços Fluviais. Estação EL-04.



Figura 3.38 – Aspecto dos Depósitos Detriticos Indiferenciados presentes na área mapeada. Estação MC-49.

3.8 DEPÓSITOS ALUVIONARES (Q2a)

Esta unidade é constituída pelos sedimentos clásticos arenosos e argilosos, com raros níveis de cascalho e matéria orgânica, inconsolidados, relacionados às planícies aluvionares atuais dos rios Tocantins, Campo Alegre, Bananal e Clementino, e de igarapés de pequeno porte. Constituem depósitos de canais (barras em pontal, barras de canais e barras laterais) e de planícies de inundação, de origem estritamente fluvial.

Os depósitos de barras laterais mais expressivos ocorrem em faixas contíguas ao rio Tocantins, formando

linhas alongadas, que representam a migração lateral do canal (figura 3.39). São constituídos predominantemente por silte e argila esbranquiçados e, mais raramente, cascalho.

Ao longo do Rio Tocantins é possível distinguir, em imagem Geocover, várias barras de canais (ilhas) bem desenvolvidas, cobertas por vegetação arbórea (figura 3.39), com meandros abandonados. São compostas predominantemente por material arenoso fino, esbranquiçado, sem estrutura, com raros cascalhos.



Figura 3.39 – Imagem Geocover evidenciando os depósitos de barras laterais (setas) e barras de canais (ilhas), coberta por vegetação, ao longo do Rio Tocantins.

4 GEOLOGIA ESTRUTURAL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados especialmente os falhamentos presentes na área da Folha Imperatriz. Os traçados desses elementos estruturais foram subsidiados pela análise de imagens de sensoriamento remoto às quais se incorporou as interpretações das feições geomorfológicas (relevo sombreado – Modelo Digital de Terreno), e de imagens geofísicas, principalmente as do sinal analítico e primeira derivada vertical do campo magnético, com alguma contribuição de imagens radiométricas de contagem total, de composição ternária, e dos canais do U, Th e K, oriundas dos dados do Projeto Aerogeofísico Parnaíba, área Parnaíba (ANP, 2006). Para o processamento dos dados geofísicos foi utilizado o *software* Geosoft, 2011.

As análises dos perfis de poços tubulares também forneceram informações de possíveis falhamentos que afetaram as formações sedimentares presentes na área e basaltos da Formação Mosquito.

Evidências de falhamentos observadas em campo foram matações de aspecto brechóide e brechas compostas por arenitos, siltitos e argilitos, silicificados, com estruturas drusiformes, geralmente associados espacialmente aos traçados de falhamentos de direções NW-SE.

4.2 FALHAMENTOS

O conjunto de falhamentos mais proeminentes dentro da área do projeto apresenta uma configuração de falhas gravitacionais, de direções NNW-SSE, NW-SE, W-E e NE-SW (figuras 3.1 e 4.1).

Os falhamentos de direção NNW-SSE estão traçados no oeste da quadrícula, aproximadamente paralelos ao leito do Rio Tocantins, os quais estão interpretados como falhas normais, gravitacionais (componentes de rejeito verticalizado).

Os falhamentos normais de direção NW-SE distribuem-se amplamente na área, e geralmente cortam aqueles de direção NNW-SSE.

Na área central da folha, ao longo do Rio Bananal, Ribeirão Dantas, Rio da Posse e Campo Alegre, estão traçadas falhas normais de direções aproximadamente E-W. Este sistema de falhas afetou os falhamentos NW-SE.

Nos cantos nordeste e sudeste da quadrícula fo-

ram traçados falhamentos com direção NE-SW. Em afloramento a leste da quadrícula (fora da área, a leste de Montes Altos) observou-se plano de falha normal, de direção nordeste e bloco abatido a noroeste, o qual confirma a falha traçada dentro da área.

4.3 SEÇÕES GEOLÓGICAS

Seção geológica C-D

A seção geológica C-D, com orientação NE-SW (figura 4.1), foi elaborada com base nas informações obtidas em poços tubulares das regiões urbanas de Imperatriz e Davinópolis, no intervalo entre a falha Davinópolis e o limite oeste da Folha Imperatriz. Esta seção (figura 4.2) mostra em subsuperfície, na sua parte central, uma abertura profunda no basalto da Formação Mosquito. Esta feição não foi detectada como um lineamento estrutural em imagens de sensoriamento remoto e está interpretada como falha encoberta, com provável direção norte-sul e de idade mais antiga que os blocos abatidos a sudoeste dela. Este falhamento teria produzido uma fenda profunda no basalto, que aparentemente, foi preenchida por sedimentos da Formação Codó.

Seção geológica A-B

A seção geológica A-B, também com orientação NE-SW (figura 4.1), é mostrada conjuntamente com o traço do perfil geofísico magnetométrico, oriundo do sinal analítico ao longo da seção geológica (figura 4.2).

O intervalo entre a falha Buritirana e a falha de Montes Altos, que representa um pacote formado pelas formações Varjão (com lentes de Codó), Grajaú, Corda, Mosquito e Sambaíba, corresponde aos mais baixos valores e menores amplitudes do sinal analítico. Na extremidade nordeste da seção os valores de sinal analítico elevam-se a patamares relativamente muito altos.

O intervalo entre a falha de Montes Altos e a falha marcada pelo Rio Samaúma (porção sudoeste da seção) corresponde aos maiores valores e maiores amplitudes do sinal analítico e, basicamente, representa um pacote formado por testemunhos da Formação Corda sobre o basalto (Formação Mosquito), por sua vez sobreposto à Formação Sambaíba.

O nítido contraste de padrão magnético entre os dois setores respondem, provavelmente, pela ocorrência do derrame basáltico (Formação Mosquito) em níveis mais superficiais na porção sudoeste da seção geológica, e em maiores profundidades no setor nordeste, limitada pela Falha de Buritirana (figura 4.2).

Do ponto de vista tectônico, de fato, a seção geológica A-B sugere uma configuração do tipo *horst* - gráben naquela parte da área da Folha Imperatriz. A porção do quadrante sudoeste da folha, entre os núcleos urbanos de Edson Lobão e Ribamar Fiquenes, representariam um *horst* com direção noroeste. Neste setor encontram-se os afloramentos do basalto da Formação Mosquito.

4.4 DISCUSSÃO

O Rio Tocantins, o qual bordeja o limite oeste da quadrícula com direção geral norte-sul, aparentemente é controlado, em parte, pelos falhamentos com direção NNW-SSE. Em escala regional estas falhas ocorrem associadas ao conjunto de lineamentos estruturais de

direções submeridianas e representam uma reativação de estruturas pertencentes à borda leste da Faixa de Dobramentos Tocantins – Araguaia, ou está relacionada à Geossutura Tocantins-Araguaia (Sutura Marginal Tocantins-Araguaia, de ALMEIDA, 1974 apud SADOWSKI; CAMPANHA, 2004), a oeste da Folha Imperatriz.

O conjunto de falhas de direção NW-SE foi afetado pelos falhamentos de direções E-W, que apresenta componente vertical (abatimento de blocos) e, possivelmente, uma movimentação diferencial de blocos, com componentes de rejeitos direcionais tanto de sentidos levógiros (sinistral), quanto dextrógiros. Na região nos rios da Posse e Campo Alegre pode-se observar as relações geométricas entre as falhas NW-SE e E-W (figura 4.1).

Este processo seria parte de um sistema de tectônica transtensiva, de caráter regional e de direção N-S, com prolongamento para noroeste da área.

O quadro estrutural exposto representa uma tectônica em condições rúpteis que, no mínimo em parte, foi produzida por reativações de estruturas tectônicas antigas (pré-cambrianas e brasilianas) que afetaram a infra-estrutura da Bacia do Parnaíba.

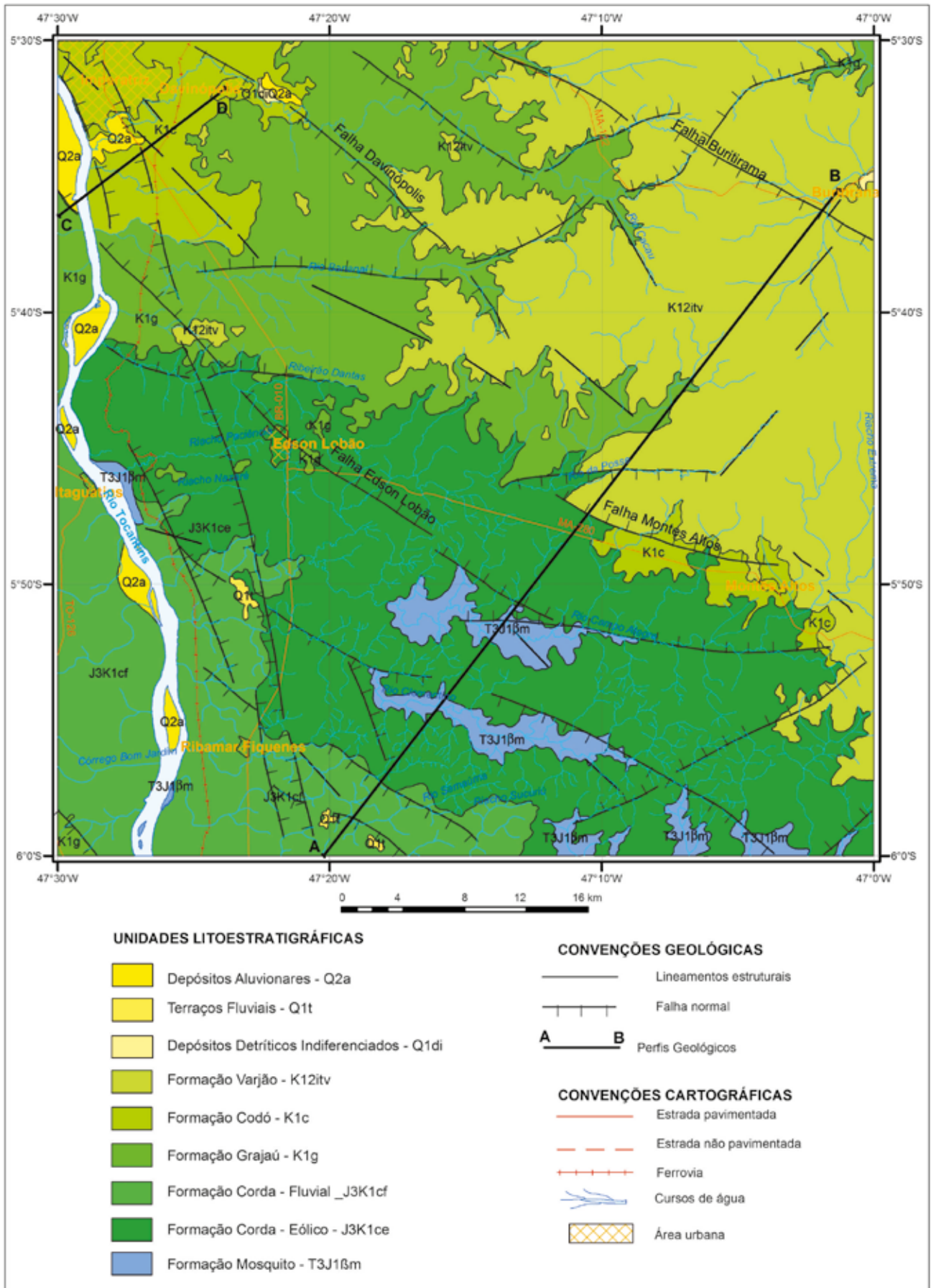


Figura 4.1 – Mapa geológico da Folha Imperatriz, com a localização das seções geológicas A-B e C-D.

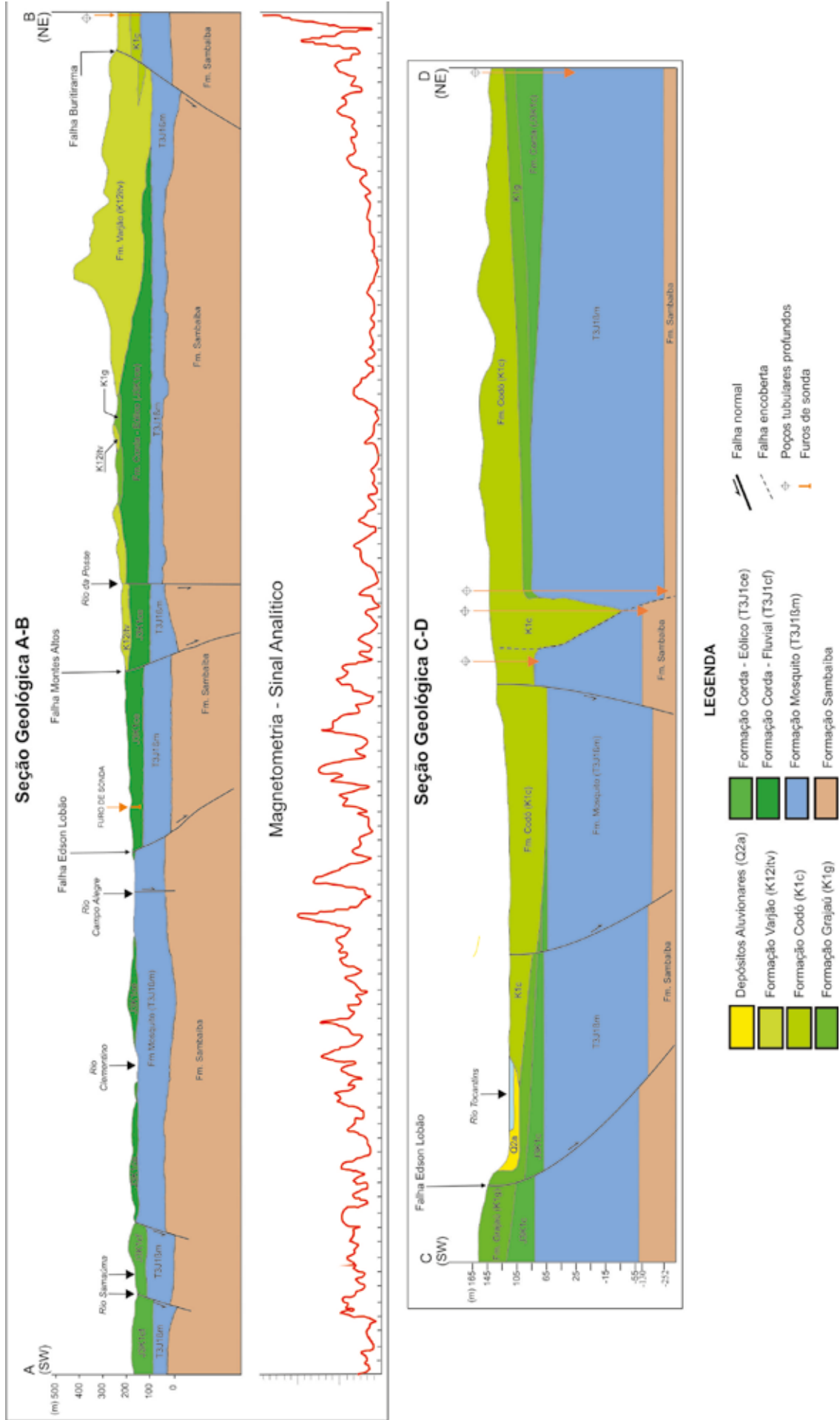


Figura 4.2 – Seções geológicas A-B e C-D da Folha Imperatriz. Na seção A-B consta o perfil geofísico (sinal analítico), elaborado sobre o traçado longitudinal da seção.

5 PETROLOGIA SEDIMENTAR E MINERAIS PESADOS

5.1 PETROLOGIA SEDIMENTAR

O estudo petrográfico das rochas da Folha Imperatriz foi realizado em doze amostras de arenitos da Formação Corda, e em dezoito amostras da Formação Grajaú. Destas, catorze são de arenitos silicificados e quatro são de sílex. Os arenitos foram caracterizados por contagem mineralógica com base em proporção modal estimada. A classificação dos arenitos foi feita segundo Folk (1980) e o índice de empacotamento estimado segundo Kahn (1956), o qual propôs que o índice de empacotamento (P), é dado pela equação: $P = 100 \times q / n$, onde q = nº de contatos grão-grão e n = total de contatos.

Os intervalos utilizados para classificação dos resultados foram empacotamento frouxo ($P < 40$), empacotamento normal ($40 < P < 55$), e empacotamento fechado ($P > 55$).

Para caracterização mais refinada da fase autigênica dos arenitos da Formação Corda utilizou-se imageamento em Microscópio Eletrônico de Varredura, com realização de análises qualitativas por sistema de dispersão de energia (EDS).

As descrições de lâminas delgadas foram realizadas no laboratório de petrografia da CPRM (Superintendência de Belém), utilizando-se microscópio petrográfico Olympus BX41. As fotomicrografias foram capturadas utilizando-se câmera acoplada infinity1 e o software image pro Express 6.0.

A análise da evolução diagenética das rochas siliciclásticas das formações Grajaú e Corda foi baseada nas relações texturais e mineralógicas observadas em lâminas delgadas. Desta forma, foi feita uma descrição dos eventos diagenéticos, seguindo uma ordem aproximadamente cronológica para os mesmos, de acordo com De Ros e Moraes (1984) e Stradioto, Kiang e Caetano-Chang (2008).

5.1.1 Formação Corda

5.1.1.1 Classificação e textura dos arenitos

Os arenitos da Formação Corda em geral são bem selecionados, exceto nas amostras NR-04 (intervalo 20-

28m), GA-01 e GA-06, que são pobremente selecionadas, e GA-07 e GA-08, que são moderadamente selecionadas. A granulometria varia de areia fina a média. Alguns arenitos são bimodais e apresentam laminação plano-paralela e laminação cruzada, observáveis em nível microscópico, por exemplo, as amostras EL-18 e GA-08.

Em geral esses arenitos exibem grãos de quartzo monocristalinos com alto grau de arredondamento e esfericidade, e mais raramente são subarredondados a subangulosos. Os grãos do arcabouço formam contatos pontuais, retos, poucos contatos côncavo-convexos e mais raramente suturados, e exibem empacotamento normal a frouxo, com índice de empacotamento (P) variando de 35 a 45.

Quanto à composição detrítica, os arenitos da Formação Corda são classificados como quartzarenitos, e subordinadamente como sublitarenitos e subarcóseos (figura 5.1).

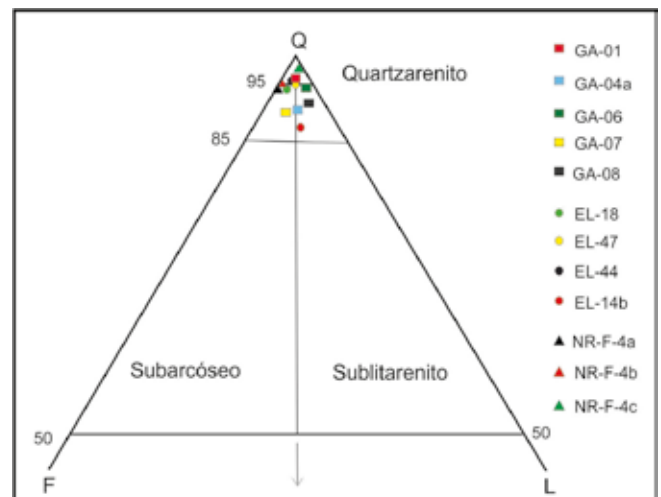


Figura 5.1 – Classificação dos arenitos da Formação Corda no diagrama de Folk (1980).

5.1.1.2 Composição do arcabouço mineralógico

Fração detrítica

A fração detrítica dos arenitos da Formação Corda compreende, em geral, mais de 60% da rocha, sendo os grãos de quartzo os constituintes majoritários, seguidos

de feldspatos e fragmentos de rocha. O quartzo detrítico monocristalino é o principal constituinte, enquanto que o policristalino ocorre em menor proporção. Os feldspatos ocorrem frequentemente variando de 1 a 5 % do volume total, sendo representados principalmente por microclina e plagioclásio, alguns grãos encontram-se alterados para zeólitas.

Os constituintes acessórios (fragmentos líticos e minerais acessórios) foram identificados em pequenas quantidades nas lâminas, correspondendo a 4% do volume total, com exceção das amostras EL-R-18 e EL-R-14, que possuem maior percentual de fragmentos líticos, em torno de 5 e 7%. Os fragmentos líticos são compostos predominantemente por rochas vulcânicas (basaltos da Formação Mosquito) e, em menor quantidade, fragmentos de chert e rochas metamórficas, e alguns encontram-se alterados para zeólitas. O percentual médio de ocorrência de minerais acessórios é < 1%, e os mais comuns observados foram turmalina, rutilo, opacos, estauroлита e zircão.

Fase autigênica

A diagênese compreende os processos físicos, bioquímicos e químicos atuantes sobre os sedimentos após a deposição (MORAD, 1991). O campo da diagênese é subdividido em eodiagênese, mesodiagênese e telodiagênese, estendendo-se desde a superfície até cerca de 5 a 7 km de profundidade, em geral abrangendo variações de 21 a 200°C e de 1 a 2000 atm (DAPPLES, 1979). No caso de arenitos, entre os principais fenômenos que operam no ambiente diagenético está o preenchimento dos espaços intergranulares por precipitados químicos, que podem resultar no sobrecrecimento em grãos detríticos ou cimentação (PETTIJOHN; POTTER; SIEVER, 1973).

Nos arenitos da Formação Corda predomina a dissolução dos grãos e precipitação de cimento na fase intersticial. É constatada pouca evidência de compactação mecânica, pois o arcabouço é predominantemente frouxo, com grãos flutuantes e contatos pontuais, provavelmente indicando que estas rochas não sofreram grande efeito da pressão litostática, predominando os efeitos da diagênese rasa.

Cimento

As fases autigênicas que constituem o cimento nas amostras de arenito estudadas são óxido de ferro, esmectita, carbonato e zeólita. O óxido de ferro ocorre como uma fina película vermelha no entorno dos grãos detríticos e confere cor avermelhada à rocha. (figura 5.2). Compreende uma porção muito pequena da rocha total, pois é a fase não identificável nas análises por difração de raios-x.

As esmectitas ocorrem como revestimento dos poros. É a fase mais externa do invólucro vermelho

(óxido de ferro) que envolve os grãos, mostrando configuração de franjas (*pore lining*) contínuas depositadas perpendicularmente sobre a superfície dos grãos (figura 5.3). As esmectitas autigênicas do cimento, associadas com zeólitas, são ricas em Al, Mg e Fe de acordo com as análises de EDS, e compatíveis com a composição de montmorillonitas (figura 5.4). Estes dados estão de acordo com os encontrados por Rezende (2002).

O carbonato possui cor de interferência alta, ocorre como um mosaico cristalino grosseiro, com textura poiquilotópica, em que grandes cristais com maclas englobam diversos grãos (figura 5.5).

As zeólitas são incolores, com relevo baixo e ocorrem preenchendo os espaços intergranulares. Cristais bem desenvolvidos apresentam-se com hábito prismático englobando diversos grãos detríticos do arcabouço (figura 5.5).

O cimento zeolítico da Formação Corda é composto por estilbita, laumontita e heulandita, com distribuição irregular e sem padrão definido, podendo ocorrer somente uma destas zeólitas e/ou a combinação entre elas, juntamente com esmectita e carbonato (figura 5.5).

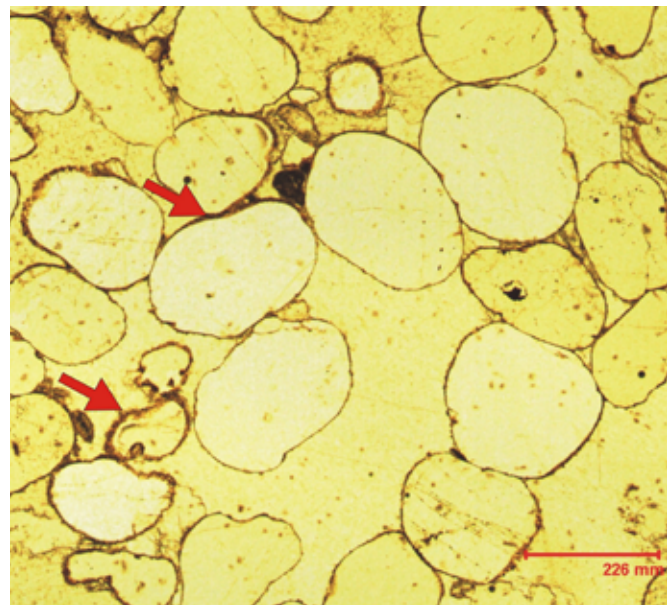


Figura 5.2 – Fotomicrografia de arenito da Formação Corda. O cimento de óxido de ferro ocorre como uma fina película vermelha (setas) em torno dos grãos detríticos. Luz natural, objetiva 20x, amostra GA-R-07.

Dissolução ocorre principalmente nos feldspatos e raramente nos fragmentos líticos presentes no arcabouço. Os feldspatos mostram dissolução com transformação para cimento zeolítico e esmectítico (Figura 5.6) e os fragmentos líticos mostram alteração/substituição para esmectita. Possivelmente alguns minerais pesados foram totalmente substituídos por cimento carbonático, restando apenas o contorno do grão.

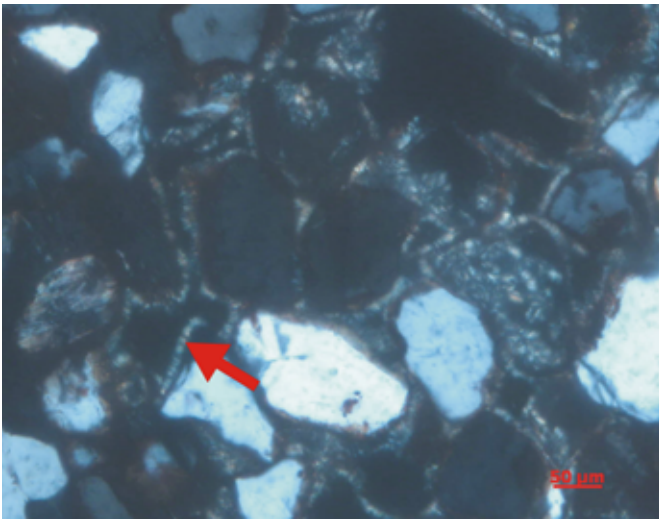


Figura 5.3 – Fotomicrografia de arenito da Formação Corda mostrando aspecto em franja (pore lining) das esmectitas (seta), fase posterior ao óxido de ferro que envolve os grãos. Luz polarizada, objetiva 10x, amostra EL-R-47.

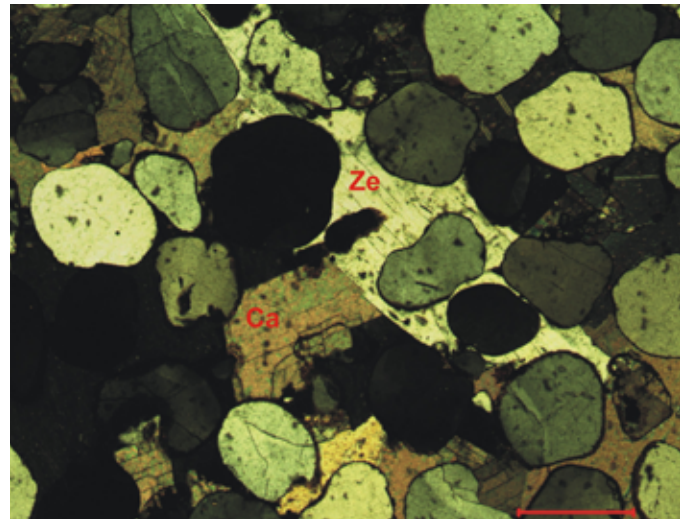


Figura 5.5 – Fotomicrografia de arenito da Formação Corda com cimento zeolítico (Ze - cor de interferência baixa) e carbonático (Ca - cor de interferência alta). Luz polarizada, objetiva 4x, amostra NR-R-04C.

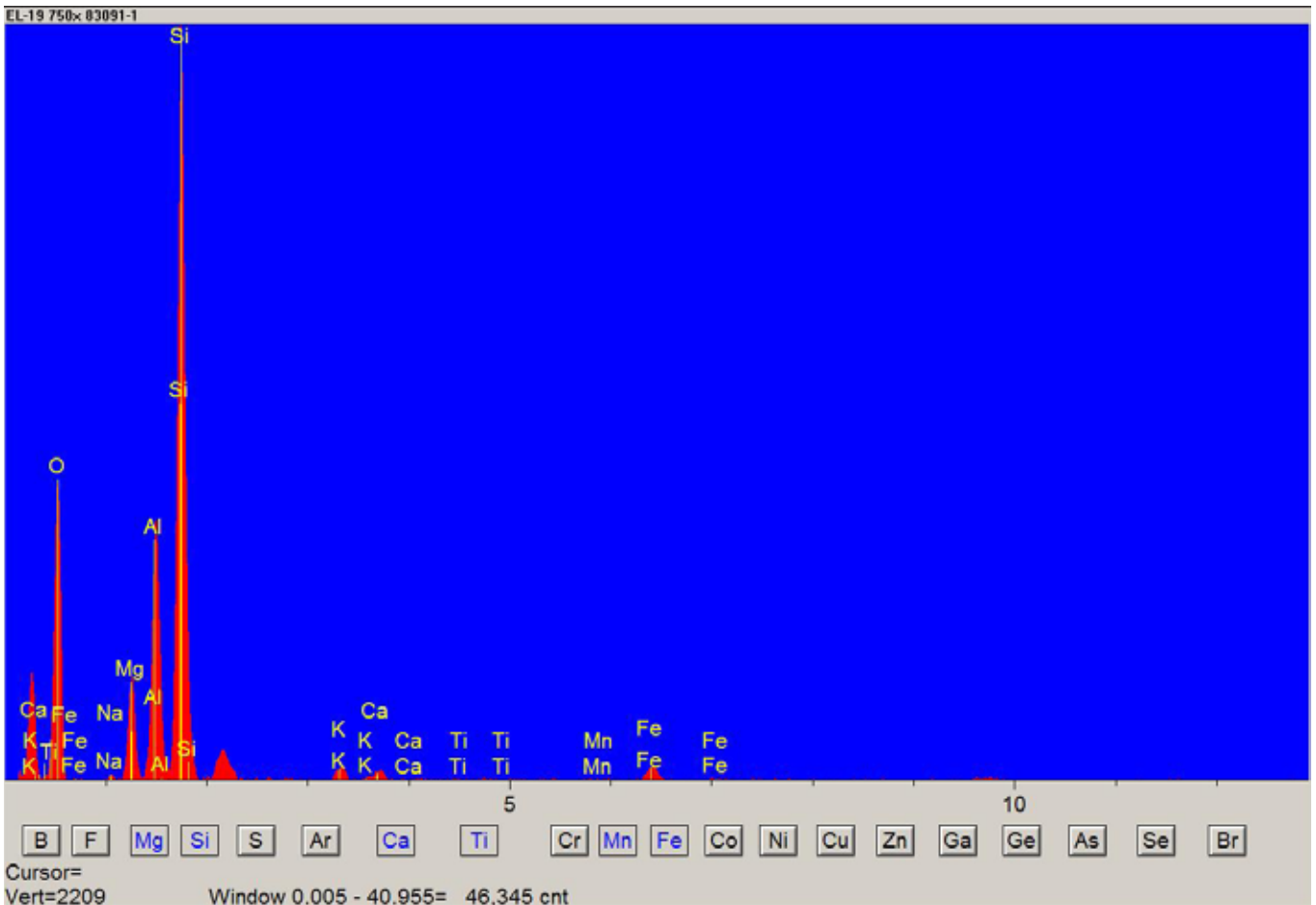


Figura 5.4 – Difratograma de análise EDS do cimento esmectítico de arenito da Formação Corda, mostrando distribuição dos picos compatível com a montmorillonita. Amostra EL-R-19.

5.1.1.3. Discussão

As características dos arenitos da Formação Corda indicam que eles foram submetidos a uma diagênese rasa e muito intensa. A eodiagênese, precoce a tardia,

única fase diagenética presente nesses arenitos, foi caracterizada por fraca compactação mecânica com índices de empacotamento variando de 34 a 49, indicando arcabouço normal a frouxo.

O cimento carbonático é típico de condições vadósas. Flügel (1982) definiu o ambiente diagenético vadoso como caracterizado por condições subaéreas nos quais o ar e a água coexistem no espaço poroso do sedimento. Neste ambiente a percolação de água da chuva, saturada em CO₂, pode promover a cimentação por calcita, como observado nas amostras estudadas.

Análises isotópicas efetuadas por Rezende (2002) no cimento calcífero de arenitos da Formação Corda revelaram valores médios compatíveis com os de carbonatos diagenéticos, sugerindo que a diagênese dos arenitos desenvolveu-se sob certa influência de águas meteóricas, a baixas temperaturas (condições próximas à superfície), e com elevada razão mineral/água de formação.

Já as esmectitas são argilominerais quimicamente complexos, hidratados e com grande riqueza iônica, formam-se preferencialmente em clima árido ou semi-árido e são típicas de ambiente neutro a alcalino, mal drenado e com abundância de íons (TARDY, 1969). Esmectitas autigênicas são produzidas principalmente pela alteração de feldspatos, e mais raramente por minerais ferromagnesianos detríticos presentes no arcabouço, em ambientes eodiagenéticos continentais de clima seco (WALKER, 1976; KESLER II, 1978; WALKER; WAUGH; CRONE, 1978; WINSPEAR; PYE, 1995). Nas amostras da Formação Corda as esmectitas se originaram da dissolução dos feldspatos (figura 5.6B) e raramente de minerais ferromagnesianos, pois não foram encontradas quantidades significativas destes.

O cimento zeolítico, de acordo com Gottardi e Galli (1985), é comum em sedimentos ricos em fragmentos de rochas vulcânicas com síntese em meio alcalino (pH 14 a 8,5). Durante a diagênese, o vidro vulcânico, ao interagir com as águas de formação e meteóricas, libera elementos químicos que promovem a precipitação de zeólitas. Gottardi e Galli (1985), Hay (1981), Mumpton (1981a), interpretam que a fonte de Si, Na, Ca, Al e Mg é a dissolução de plagioclásios e fragmentos líticos vulcânicos.

No caso das amostras da Formação Corda estes elementos químicos teriam a mesma origem a partir dos próprios elementos que compõem o arcabouço (feldspatos e fragmentos líticos), pois foram observadas alterações significativas dos feldspatos para zeólita e raras alterações dos fragmentos líticos do basalto. Isso está de acordo com as interpretações de Rezende (2002), que afirma que os arenitos da Formação Corda constituíam um sistema hidrológico aberto, porém de dinâmica limitada.

Com base no exposto, podemos afirmar que a dinâmica limitada do sistema, o meio alcalino, o ambiente árido e a composição do arcabouço favoreceram para liberação e reprecipitação dos íons presentes nos minerais. Além disso, esses íons que compõem os minerais do cimento podem ter origem externa, provavelmente associada à alteração das rochas basálticas subjacentes (Formação Mosquito), ou à interação dos fluídos de origem meteórica com fluídos da atividade vulcânica da Formação Sardinha, aqui considerada contemporânea com a sedimentação da Formação Corda.

5.1.2 Formação Grajaú

5.1.2.1 Classificação e texturas dos arenitos

Os arenitos desta formação estudados microscopicamente apresentam granulometria variando de areia fina a média, são em geral bem a moderadamente selecionados, com predomínio de grãos de quartzo monocristalinos, subarredondados e subangulosos, e com alto e baixo grau de esfericidade.

Os grãos do arcabouço formam contatos retos e pontuais, apresentando poucos contatos côncavo-convexos e mais raramente suturados, exibindo predominantemente empacotamento normal ($40 < P < 55$), com índice de empacotamento variando entre 40 e 55.

Os arenitos da Formação que Grajaú consistem basicamente de grãos de quartzo e raramente fragmentos de rocha, correspondem a quartzarenitos, segundo a classificação de Folk (1980) (figura 5.8).

5.1.2.2 Composição do arcabouço mineralógico

Fração detrítica

Esta fração corresponde a 95% da rocha, sendo o quartzo detrítico monocristalino o principal constituinte, com o quartzo do tipo policristalino ocorrendo mais raramente. Fragmentos de rochas são raros, representados por fragmentos de *chert* e rocha metamórfica. Os constituintes acessórios representam menos de 1% da composição dos arenitos da Formação Grajaú e são caracterizados por uma assembleia de minerais pesados ultraestáveis, discutidas no item 5.2, como zircão, turmalina e rutilo, além de minerais opacos.

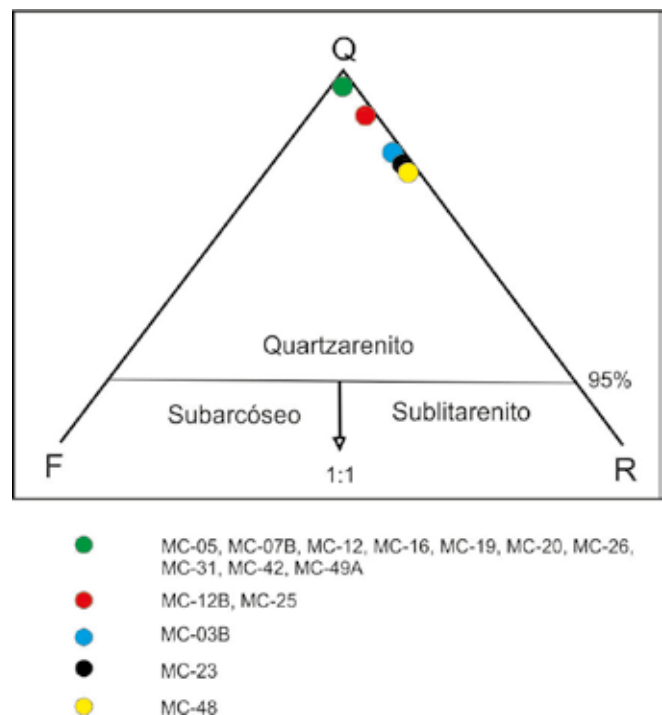


Figura 5.8 – Classificação dos arenitos da Formação Grajaú, no diagrama de Folk (1980).

Cimento

O sobrecrescimento de sílica e, de forma menos abundante, de óxido de ferro, foram os principais tipos de cimento reconhecidos. O cimento de sílica ocorre na forma de sobrecrescimento sintaxial ou em franjas em torno dos grãos detríticos, sendo reconhecido pela linha de sujeira (figura 5.8). Também ocorre sob a forma de amígdalas, ou como sobrecrescimento de calcedônia e de quartzo microcristalino (figura 5.9).

O cimento de óxido de ferro ocorre como sobrecrescimento em torno dos grãos detríticos, e modifica frequentemente o arredondamento destes grãos, correndo suas bordas (figura 5.10).

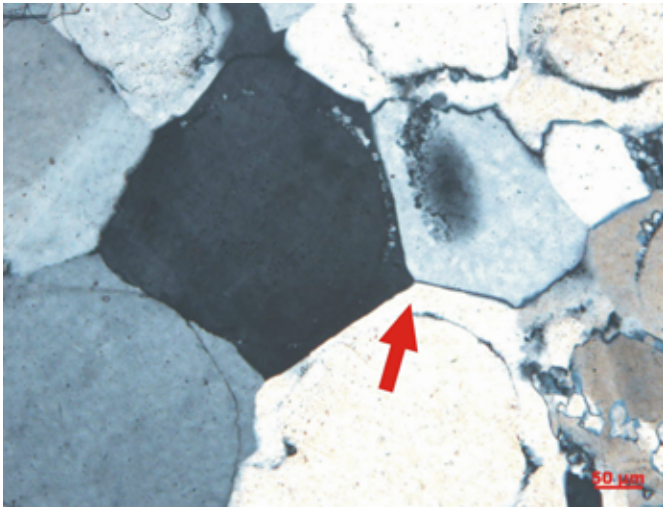


Figura 5.9 – Fotomicrografia de quartzarenitos exibindo cimento de sílica na forma de sobrecrescimento sintaxial (seta). Luz polarizada, objetiva 10x, amostra MC-R-42E.

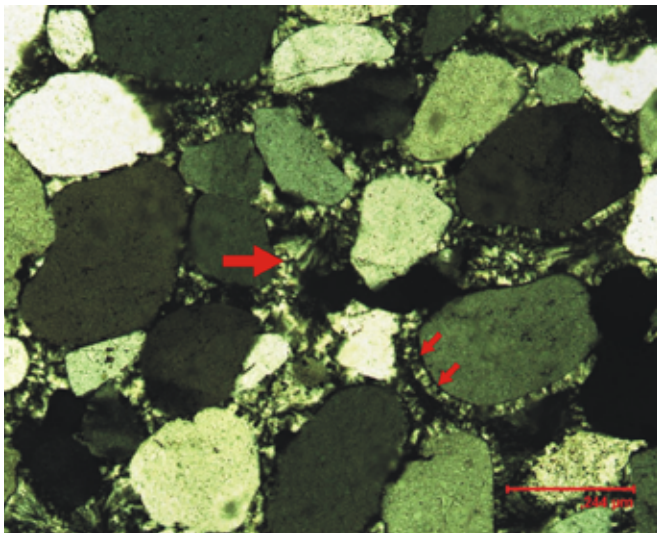


Figura 5.10 – Fotomicrografia de quartzarenito exibindo cimento de sílica na forma de sobrecrescimento de calcedônia e quartzo microcristalino. Luz polarizada, objetiva 10x, amostra MC-R-25.

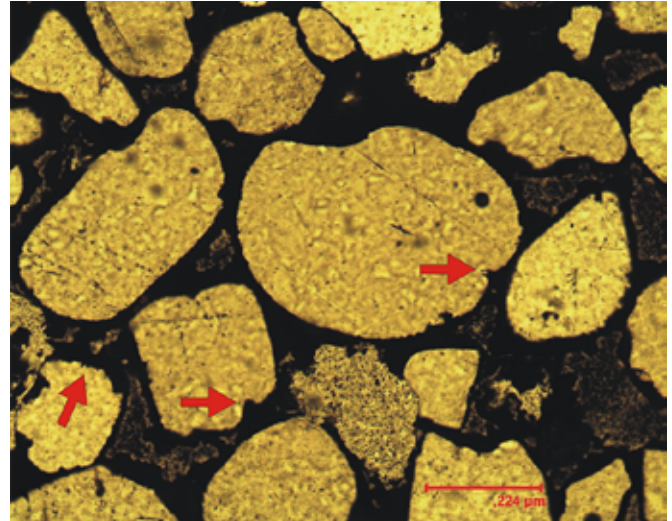


Figura 5.11 – Fotomicrografia de quartzarenito exibindo cimento de óxido de ferro em torno dos grãos de quartzo com feições de corrosão (setas). Luz polarizada, objetiva 10x, amostra MC-R-48.

5.1.2.3 Discussão

Os aspectos texturais, a exemplo do moderado grau de arredondamento e esfericidade, além da assembleia restrita de minerais pesados ultraestáveis, indicam que a área-fonte se posicionava relativamente distante do sítio deposicional dos arenitos, e que os sedimentos formadores dessas rochas foram submetidos a longos períodos de transporte. A hipótese aceitável, e que já foi discutida no Capítulo 3, é que parte dos sedimentos que deram origem aos arenitos da Formação Grajaú seja proveniente do retrabalhamento de arenitos eólicos da Formação Corda.

O índice de empacotamento (P), obtido através da contagem grão a grão em lâminas delgadas, confirma compactação mecânica moderada nos estágios iniciais da eodiagênese, com índices variando entre 40 e 55.

A compactação química refere-se à dissolução por pressão dos grãos, ao longo de seus contatos tangenciais, onde a concentração de tensões é máxima, e o resultado é o desenvolvimento de contatos intergranulares côncavo-convexos e suturados. De acordo com De Ros e Moraes (1984), a compactação química marca o final da eodiagênese. Nos arenitos analisados o efeito da compactação química foi moderada. Algumas amostras exibem poucos contatos suturados, e em outras amostras esses contatos são mais frequentes, indicando que os efeitos da compactação química foram heterogêneos.

A cimentação por crescimento secundário de quartzo é observado em torno dos grãos do arcabouço dos arenitos da Formação Grajaú e, segundo De Ros e Moraes (1984), marca os estágios iniciais da mesodiagênese na maioria dos arenitos. A origem da sílica que envolve os grãos como cimento vem sendo amplamen-

te discutida na literatura (MCBRIDE, 1979, 1989; WORDEN; MORAD, 2000), tendo como principais hipóteses: dissolução por pressão de grãos, alteração de minerais de argila durante a compactação, fragmentos de quartzo produzidos por abrasão eólica, sílica proveniente de água meteórica e fluidos hidrotermais.

Embora os arenitos da Formação Grajaú careçam de estudos mais detalhados no sentido da origem da sílica para a formação dos cimentos, a ocorrência restrita de contatos suturados, a ausência de níveis pelíticos e de feições eólicas, sugerem que esta cimentação provém, em sua maioria, de fluidos meteóricos ou hidrotermais ricos em sílica. Estima-se que principal fonte de sílica corresponde à dissolução parcial de grãos de quartzo presentes no arcabouço ou, alternativamente, está relacionada ao magmatismo da Formação Sardiinha, possivelmente contemporânea à sedimentação da Formação Grajaú.

Associados ou não a essa silicificação, ocorrem os processos de ferrificação evidenciados pela precipitação

de óxido de ferro. Estes processos podem ocorrer tanto na eodiagênese (em condições muito próximas a superfície de deposição) ou após certo soterramento e consequente soerguimento do pacote sedimentar, portanto, sob condições telodiagênicas (MORAD, 1991).

A precipitação de óxido e hidróxido de ferro parece ser posterior à silicificação. Este processo substitui a sílica em alguns locais e corroe as bordas de grãos de quartzo, preenchendo total ou parcialmente o espaço intergranular. De acordo com De Ros e Moraes (1984), a precipitação de óxido de ferro tem origem da oxidação de minerais de Fe^{+2} e é um dos eventos da telodiagênese.

As poucas evidências do evento de compactação podem induzir à interpretação de que o pacote sedimentar estudado sofreu uma compactação mecânica pouco pronunciada e passou das condições eodiagênicas para telodiagênicas, sem sofrer um pronunciado efeito de soterramento e da mesodiagênese, segundo esquema proposto na figura 5.12.

EVENTOS	Eodiagênese	Mesodiagênese	Telodiagênese
Compactação mecânica moderada (índice de empacotamento 40 a 55)	■		
Compactação química (contatos suturados e côncavo-convexos)		■	
Crescimento secundário de quartzo (sintaxial, microcristalino e calcedônia)		■	
Cimentação por óxido hidróxido de ferro			■

Figura 5.12 – Sequência para os principais eventos diagenéticos dos arenitos da Formação Grajaú.

5.1.2.4 Classificação e texturas dos arenitos silicificados e *cherts*

Na Formação Grajaú arenitos silicificados e *cherts* ocorrem em blocos isolados no topo da Formação Corda e base do Grupo Itapecuru. Petrograficamente estas rochas apresentam, em geral, feição de sílica microcristalina e criptocristalina e alguns bolsões de textura poligonal em mosaico (figura 5.13A e B) e radiada (calcedônia). Quartzo monocristalino com extinção ondulante ocorre em algumas amostras como grãos do arcabouço. Feições posteriores de percolação de fluidos ricos ferro e/ou manganês formam hábito dendrítico (figura 5.14).

talina e criptocristalina e alguns bolsões de textura poligonal em mosaico (figura 5.13A e B) e radiada (calcedônia). Quartzo monocristalino com extinção ondulante ocorre em algumas amostras como grãos do arcabouço. Feições posteriores de percolação de fluidos ricos ferro e/ou manganês formam hábito dendrítico (figura 5.14).

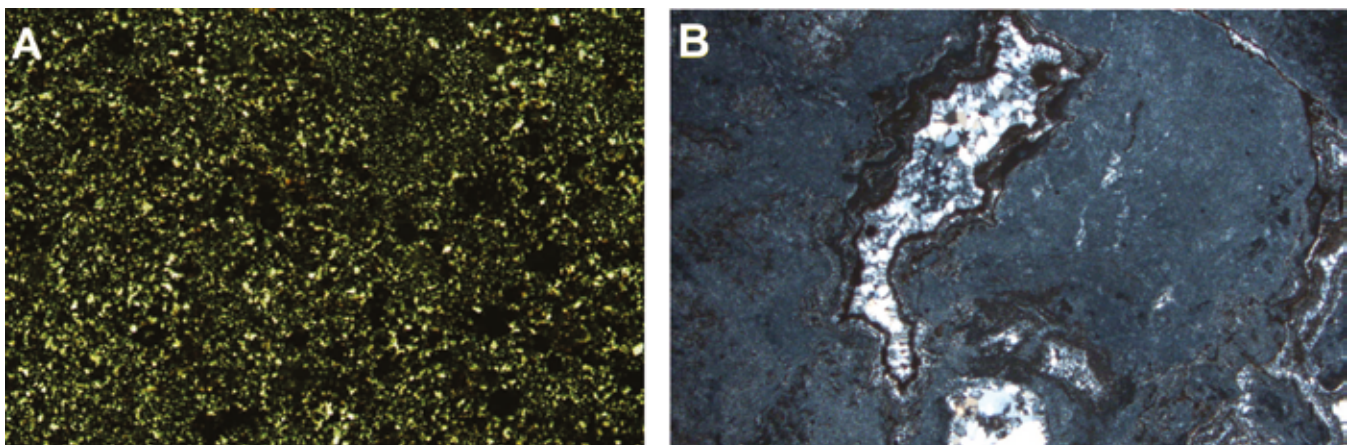


Figura 5.13 – Fotomicrografias de silexito com quartzo microcristalino (A) e com bolsão de quartzo poligonal em mosaico (B). Luz polarizada, objetiva 10x, amostra MC-R-09.

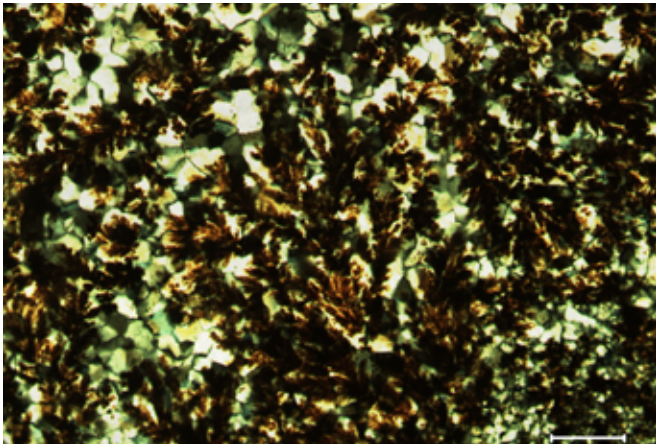


Figura 5.14 – Fotomicrografia de sílex composto por quartzo microcristalino possuindo hábito dendrítico de óxido de ferro/mangânês. Luz polarizada, objetiva 4x amostra MC-01.

Folk (1980), assim como McBride (1963), incluem o sílex (*chert*) no campo dos quartzarenitos no diagrama de classificação de rochas siliciclásticas.

Na área estudada, o sílex pode ser produto de percolação de fluido rico em sílica nos arenitos, produzindo a precipitação de quartzo microcristalino e calcedônia em algumas porções da Formação Grajaú.

5.2 MINERAIS PESADOS

A análise de minerais pesados vem sendo utilizada há muito tempo em estudos estratigráficos e na determinação da proveniência de arenitos (HUBERT, 1962; MORTON, 1985; MORTON; HALLSWORTH, 1994). No estudo enfocando a estratigrafia é possível separar e definir unidades de diferentes tipos utilizando a proporção desses minerais. Já no estudo de proveniência, estes minerais formam assembleias que fornecem dados cruciais sobre tipos de rochas-fonte, que não podem ser adquiridos por outros meios (MORTON; HALLSWORTH, 1994, 1999). Para estes autores, além da paleogeografia e petrologia da área-fonte, a distribuição de minerais pesados em depósitos sedimentares também é controlada por fatores como intemperismo, comportamento hidráulico e diagênese, que causam fracionamento destes minerais e levam à perda parcial das assembleias.

Neste projeto foram analisadas 34 amostras de arenitos para minerais pesados, sendo 6 amostras da Formação Corda, 10 amostras da Formação Grajaú e 19 amostras da Formação Varjão, do Grupo Itapecuru.

5.2.1 Formação Corda

A assembleia de minerais pesados da Formação Corda é dominada pela associação granada-epídoto-turmalina-zircão, ocorrendo ainda raramente o rutilo. As granadas são frequentes e possuem quantidades significativas, geralmente variando de 40 a 85% do total de pesados das amostras estudadas. Em uma amostra observou-se esta mesma associação, mas com propor-

ção de granada inferior a 10%. Os grãos de granada são geralmente incolores a levemente acastanhados, frequentemente apresentando superfície recoberta por fina película de ferro. Formas irregulares subarredondadas/arredondadas e equidimensionais (figura 5.15) são as mais comuns. Com menor frequência, ocorrem grãos prismáticos com bordas arredondadas. Fraturas são comuns, poucas inclusões foram observadas e raros grãos apresentam feições de dissolução superficiais.

Grãos de epídoto possuem quantidades que variam de 10 a 20% (figura 5.16). Apresentam formas prismáticas tabulares com bordas arredondadas, sendo por vezes alongados. Têm cor verde intensa, além de inclusões de minerais opacos. Ocorrem também formas equidimensionais arredondadas/subarredondadas (figura 5.16).

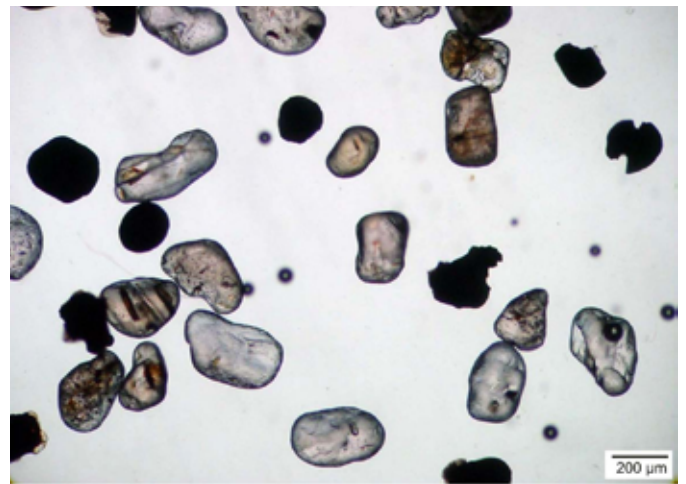


Figura 5.15 – Fotomicrografia exibindo o aspecto das granadas presentes da Formação Corda. Amostra GA-R-51, luz natural, objetiva 10x.

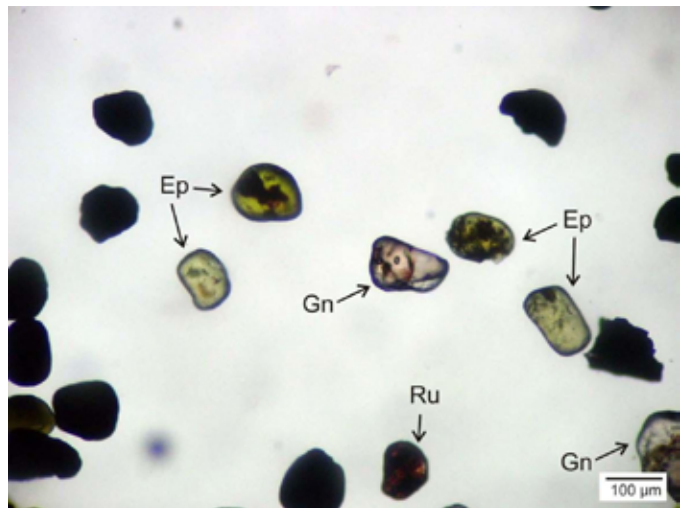


Figura 5.16 – Formas arredondadas/subarredondadas dos epídotos, e sua associação com granadas, e raros grãos de rutilo, observadas em amostras da Formação Corda. Amostra GA-R-51, luz natural, objetiva 10x.

Os grãos de turmalina constituem menos de 10% do total de pesados nas amostras estudadas, com formas principalmente arredondadas/subarredondadas,

predominando colorações marrom esverdeadas e raramente azuladas. Em alguns grãos é possível observar, sob microscópio petrográfico, a dissolução da superfície do grão.

O zircão e rutilo são raros e possuem percentuais inferiores a 10% e 4%, respectivamente. Os grãos de zircão são predominantemente incolores, alongados e com bordas arredondadas / subarredondadas. Os rutilos são vermelho escuros e possuem formas subarredondadas.

5.2.2 Formação Grajaú

A Formação Grajaú mostra uma assembleia dominada por estauroлита-turmalina-zircão-rutilo-cianita, com variações nos percentuais desses minerais. As estauroлитas constituem de 15 a 60%, são irregulares, subangulosas, com cores que variam de amarelo pálido a avermelhado, com frequentes fraturas e feições de dissolução química (figura 5.17).

As turmalinas possuem percentuais variando de 10 a 88%, são prismáticas e irregulares, com cores marrom e esverdeada. Os grãos de zircão variam de 5 a 57%, são prismáticos, tabulares com bordas arredondadas, variando de incolores a levemente rosados (figura 5.17).

As cianitas possuem percentuais variando de 5 a 20%, são irregulares subédricas, incolores, apresentando intensa corrosão química. Os rutilos são raros, geralmente com percentual inferior a 2%, com somente uma amostra possuindo percentual de 30%, têm forma prismática subédrica, com coloração variando de vermelho escuro a amarelo escuro.

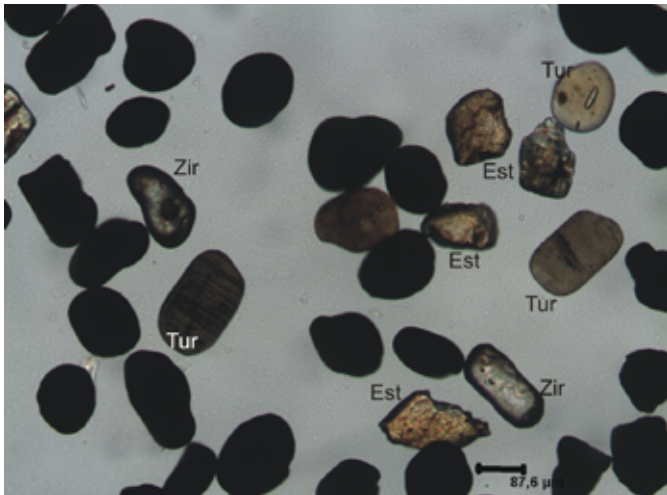


Figura 5.17 – Fotomicrografia mostrando grãos de estauroлита, turmalina e zircão, que dominam a assembleia de pesados dos arenitos da Formação Grajaú. Amostra MC-R-52, luz natural, objetiva 10x.

5.2.3 Formação Varjão

Na Formação Varjão os minerais pesados, oriundos de diferentes fácies arenosas (Apa, Am, Asp, Aag,

capítulo 3) demonstram grande similaridade mineralógica e apresentaram uma assembleia dominada por estauroлита-turmalina-zircão-cianita-rutilo, com variações significativas dos percentuais desses minerais entre as amostras estudadas.

As estauroлитas variam de 20 a 30%, são irregulares, subangulosas, com grãos arredondados observados localmente, variam de amarelo pálido, amarelo claro a amarelo avermelhado (figuras 5.18 e 5.19). Fraturas são frequentes, enquanto inclusões de minerais opacos são raras. É possível observar na estauroлита feições de dissolução química.

As turmalinas possuem percentuais de 60 a 80%, apresentam-se principalmente em grãos irregulares arredondados/subarredondados, com formas prismáticas e por vezes tabulares alongadas (figuras 5.18 e 5.19). Apresentam normalmente cor marrom, além de tons esverdeados e azuis. Fraturas conchoidais e inclusões de minerais opacos são pouco frequentes, e em alguns grãos é possível observar feições de dissolução química.

As cianitas são pouco frequentes, apresentam percentuais inferiores a 4%, possuem forma irregular, subédrica, subarredondada a subangulosa. São incolores, embora exibam superfície suja com películas de ferro, inclusões de minerais opacos, e intensa corrosão química superficial. Menos frequentes são formas prismáticas subédricas alongadas, com poucas fraturas.

Grãos de zircão variam de 10 a 60%, normalmente são prismáticos, tabulares, com bordas arredondadas e, com menos frequência, são alongados (figura 5.19). Variam de incolores a levemente rosados, apresentam zoneamento, inclusões de minerais opacos e mais raramente, sobrecrecimento. Ocorrem também formas irregulares, subarredondadas, incolores, rosadas a levemente castanho, com inclusões de minerais opacos.

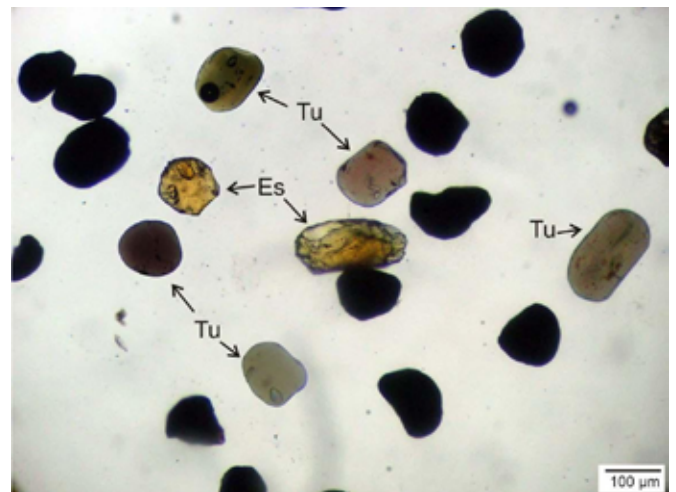


Figura 5.18 – Aspecto das estauroлитas presentes na assembleia de pesados de arenitos da Formação Varjão. Observam-se também grãos de turmalina. Amostra EL-R-15, luz natural, objetiva de 4x.

O rutilo é pouco frequente nas amostras estudadas, com percentual inferior a 4%, tem formas prismáticas subédricas, com cores vermelho escuro a

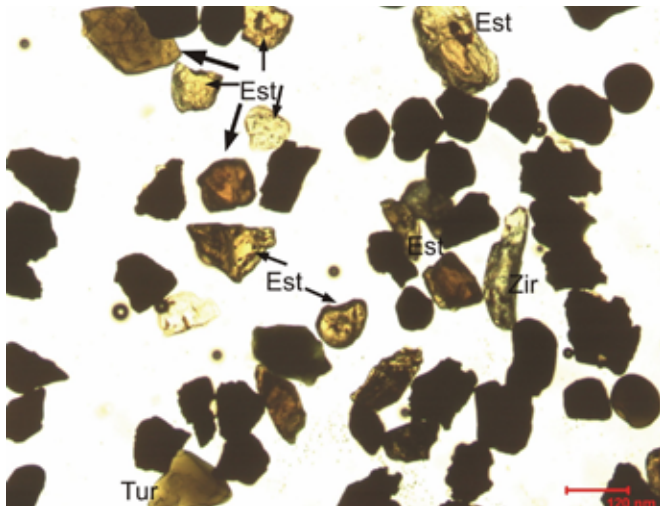


Figura 5.19 – Fotomicrografia mostrando a forma dos grãos de turmalina, estauroлита e zircão presentes na assembleia de pesados da Formação Varjão. Amostra MC-R-43, luz natural, objetiva de 4x.

amarelo escuro. Ocorre também grãos irregulares, subarredondados, alongados ou não, vermelhos, com algumas fraturas conchoidais.

5.2.4 Discussão

Comparando-se as assembleias de minerais pesados dos arenitos estudados, verifica-se distinção na composição da assembleia da Formação Corda, em relação às das formações Grajaú e Varjão. Segundo Morton e Hallsworth (1994), isso pode indicar proveniência de fontes diferentes, influência do clima e do tipo de transporte, da diagênese e do intemperismo.

A associação de minerais pesados da Formação Corda é dominada por grãos arredondados e subarre-

dondados, principalmente de granada e epídoto, com destaque para a quantidade de granada, que representa 40 a 85% do total de pesados, sendo ambos moderadamente estáveis. Estes minerais não foram observados nas assembleias de pesados de amostras das formações Grajaú e Varjão.

Segundo Morton (1984), a granada é relativamente estável sob condições alcalinas, mas pouco estável em fluidos com $\text{pH} < 7$. Este autor admite que em áreas áridas ou semi-áridas, as bases fortes de Na, K, Ca e Mg são retidas, tornando o ambiente intempérico alcalino. Condições semelhantes explicam o elevado percentual de granada nas rochas da Formação Corda, uma vez que se considera um ambiente desértico (dunas, interdunas e rios efêmeros) para a deposição desses depósitos. Neste caso, o clima e o tipo de transporte (eólico) também devem ter sido fatores importantes na preservação das granadas, assim como dos epídotos.

Nas formações Varjão e Grajaú as assembleias de minerais pesados são compostas principalmente por minerais ultraestáveis, com a predominância de grãos arredondados e subarredondados, e algumas texturas superficiais confirmando um caráter deposicional multicíclico para os sedimentos. Uma área-fonte possível para fornecer material seriam as rochas de unidades paleozoicas da Bacia do Parnaíba.

No caso dos arenitos de origem fluvial da Formação Grajaú, foi possível identificar um moderado a elevado grau de arredondamento e esfericidade dos grãos do arcabouço. Isto reforça a ideia discutida no item 3.3, de que as rochas da Formação Corda serviram de fonte para os sedimentos que originaram os depósitos da Formação Grajaú. Esta situação assemelha-se com os depósitos albianos estudados por Nascimento e Góes (2007) na Bacia de São Luis-Grajaú.

6 RECURSOS MINERAIS E GEOQUÍMICA PROSPECTIVA

6.1 RECURSOS MINERAIS

Na área correspondente a Folha Imperatriz (SB. 23-V-C-V) foram registrados 127 depósitos minerais e 95 ocorrências (tabela 6.1 e figura 6.1), cujas classes utilitárias estão assim distribuídas:

- a) Minerais Industriais (22 ocorrências de zeólitas, 33 ocorrências de argilas esmectíticas e 21 ocorrências de caulín);
- b) Materiais de uso na construção civil (brita / basalto: 10 ocorrências; cascalho: 7 depósitos sendo 1 não explorado; seixo: 1 depósito/mina e 1 ocorrência; areia: 7 depósitos sendo 1 não explorado e 1 ocorrência; argila: 7 depósitos sendo 2 não explorados e 5 ocorrências);
- c) Insumos para agricultura (2 ocorrências de calcário); e
- d) Água potável de mesa (cadastro de 105 poços tubulares).

Vale ressaltar que embora na área não existam ocorrências de diamante e de fosfato, Correia (1990) e Sachs e Silveira (2010) se referem à existência de *pipes* kimberlíticos juro-cretáceos na borda sul e noroeste da Bacia do Parnaíba. Com relação ao fosfato, a existência de folhelhos estromatolíticos na área, em princípio, pode servir de fundamento para futuras investigações.

Consignando a importância do presente estudo como instrumento norteador de política mineral da região, vale destacar os seguintes pontos:

- as zeólitas são minerais que apresentam amplo espectro de aplicação industrial com utilização, inclusive, na agricultura, setor cuja baixa produtividade regional reclama pelo emprego desses produtos como fator de melhoria deste ramo de atividade;

- as argilas esmectíticas apresentam também um multivariado campo de aplicação industrial, além da possibilidade de uso como condicionadores/corretivos de solos ácidos e arenosos do cerrado;

- há na região crescente *déficit* habitacional cuja solução passa, necessariamente, pelo aumento substancial da utilização de materiais da construção civil;

- a necessidade de dinamização das atividades econômicas da região confere especial importância aos insumos minerais para agricultura, tais como calcários e fosfatos;

- as águas subterrâneas para abastecimento público têm importância crescente na região, por suas reconhecidas vantagens em relação às superficiais.

Sobre os materiais citados, destaca-se que não se dispõe de dados estatísticos atuais de reservas e produção especificamente na área da Folha Imperatriz. No entanto, na avaliação dos dados estatísticos para o Estado do Maranhão no período entre 2005 e 2008 (BRASIL, 2006-2009), observa-se que a quase totalidade dos bens citados (argilas comuns, rochas britadas/conglomeráticas, areias e água potável de mesa) foi consumida no âmbito interno, isto é, no próprio Estado do Maranhão. No que se refere aos materiais de construção civil, os dados demonstram uma demanda existente em decorrência do reconhecido *déficit* habitacional da população maranhense, especialmente a de mais baixa renda. Nesse sentido, não há como justificar o aparente descaso com que são tratados os minerais industriais pelo poder público, entre os quais se incluem os de uso na construção civil, reconhecidamente ligados às necessidades básicas do ser humano.

De acordo com informações coletadas no Sistema de Informação Geográfica da Mineração – SIGMINE/DNPM, referentes ao mês de abril de 2014, em termos de processo minerários, na área da Folha Imperatriz dominam amplamente, em número, os processos relacionados a substâncias minerais não metálicas, utilizadas na construção civil ou como insumos agrícolas (figura 6.2 e tabela 6.2). Isto é facilmente compreensível considerando-se a natureza das unidades litológicas presentes na folha.

GRAU DE IMPORTÂNCIA /STATUS ECONÔMICO		CLASSES UTILITÁRIAS											
		MATERIAIS DE USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL				MINERAIS INDUSTRIAIS			INSUMOS PARA AGRICULTURA	ÁGUA POTÁVEL			
DEPÓSITOS	MINA	AGREGADOS MINERAIS				ARGILA	ZEÓLITAS	ESMECTÍTA	CAULIN	CALCÁRIO	10 (F)	28 (G)	67 (H)
		BRITA (BASALTO)	CASCALHO	SEIXO	AREIA						-	-	-
OCORRÊNCIA		10	1	1	1	5 (C)	22 (D)	33 (E)	21	2	-	-	
TOTAL POR BEM MINERAL		10	7	2	8	12	22	33	21	2	-	105	

(A) Inclui 1 ocorrência sem amostra analisada; (B) Amostras não analisadas; (C) Inclui 1 ocorrência sem amostra analisada; (D) Em associação com a zeólita ocorre esmectita; (E) Associada ou não a argila ou zeólita; (F) Poços cadastrados pela equipe do projeto; (G) e (H) Poços compilados do SIA-GAS- Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da CPRM e outras fontes(SOUZA et al., 1990; VILLAS BOAS; ARAÚJO, 1999; SOARES FILHO, 1979).

Tabela 6.1 – Jazimentos minerais cadastrados na Folha Imperatriz (SB.23-V-C-V).

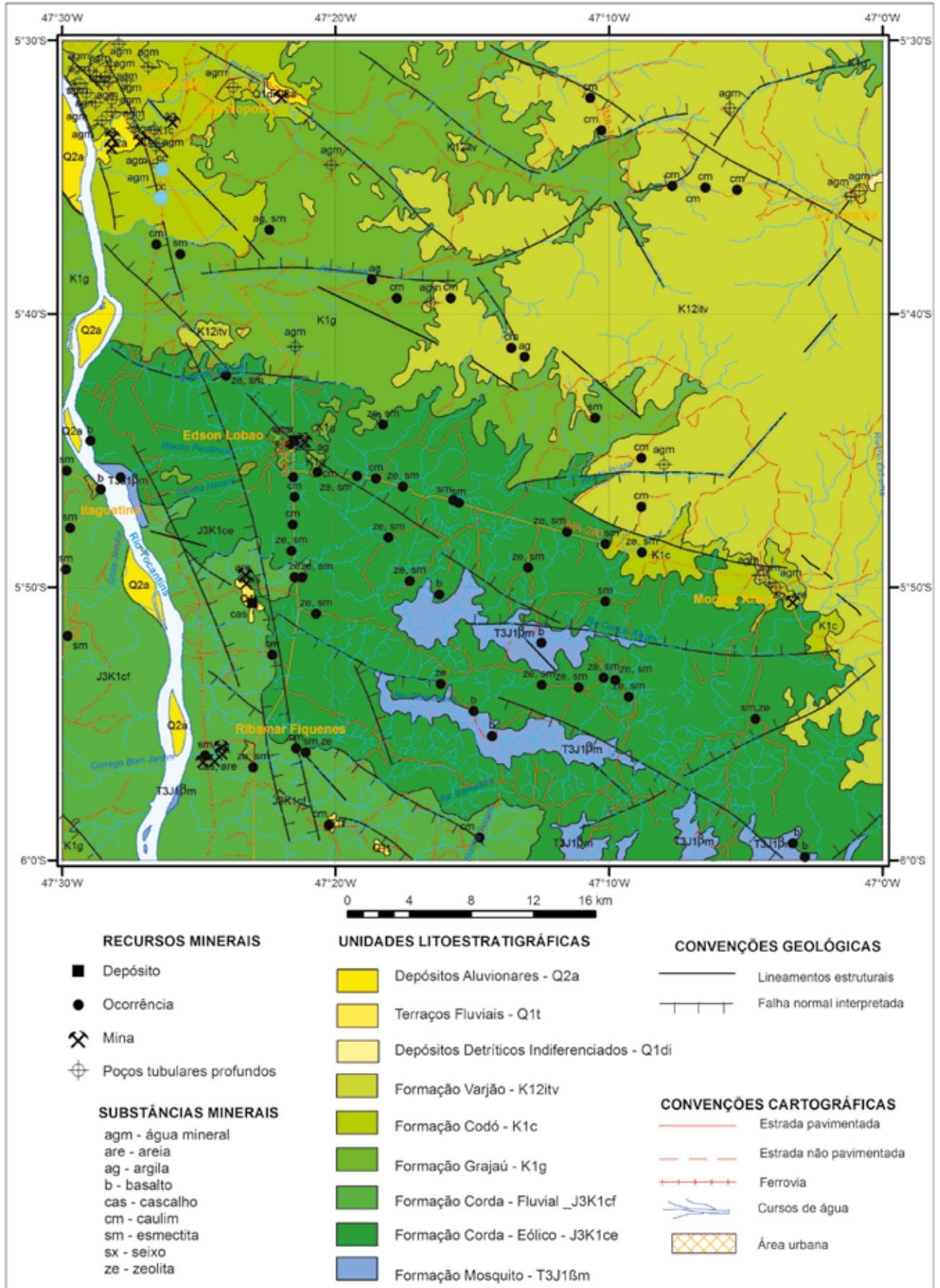


Figura 6.1 – Distribuição dos recursos minerais na Folha Imperatriz.

FASE PROCESSUAL	NÚMERO DE PROCESSOS	SUBSTÂNCIA	CLASSE	
Concessão de Lavra	1	Água mineral	ÁGUA POTÁVEL	
Requerimento de Pesquisa	2			
Autorização de Pesquisa	5	Areia	CONSTRUÇÃO CIVIL	
Licenciamento	7			
Requerimento de Licenciamento	4			
Requerimento de Pesquisa	3			
Disponibilidade	1	Argila		
Licenciamento	2			
Requerimento de Licenciamento	3			
Requerimento de Licenciamento	1	Saibro		
Requerimento de Licenciamento	1	Cascalho		
Licenciamento	1			
Autorização de Pesquisa	2	Basalto		
Autorização de Pesquisa	1	Granito		
Autorização de Pesquisa	1	Calcário		INSUMOS PARA AGRICULTURA
Autorização de Pesquisa	4	Fosfato		
Disponibilidade	10			
Requerimento de Pesquisa	11			
Requerimento de Licenciamento	1			
Requerimento de Pesquisa	9	Minério de Cobre	METÁLICOS	
Requerimento de Pesquisa	1	Ouro		
Requerimento de Pesquisa (indeferido)	1	Diamante	GEMAS	

Tabela 6.2 – Situação dos direitos minerários na Folha Imperatriz em abril de 2014. Fonte: SIGMINE/DNPM.

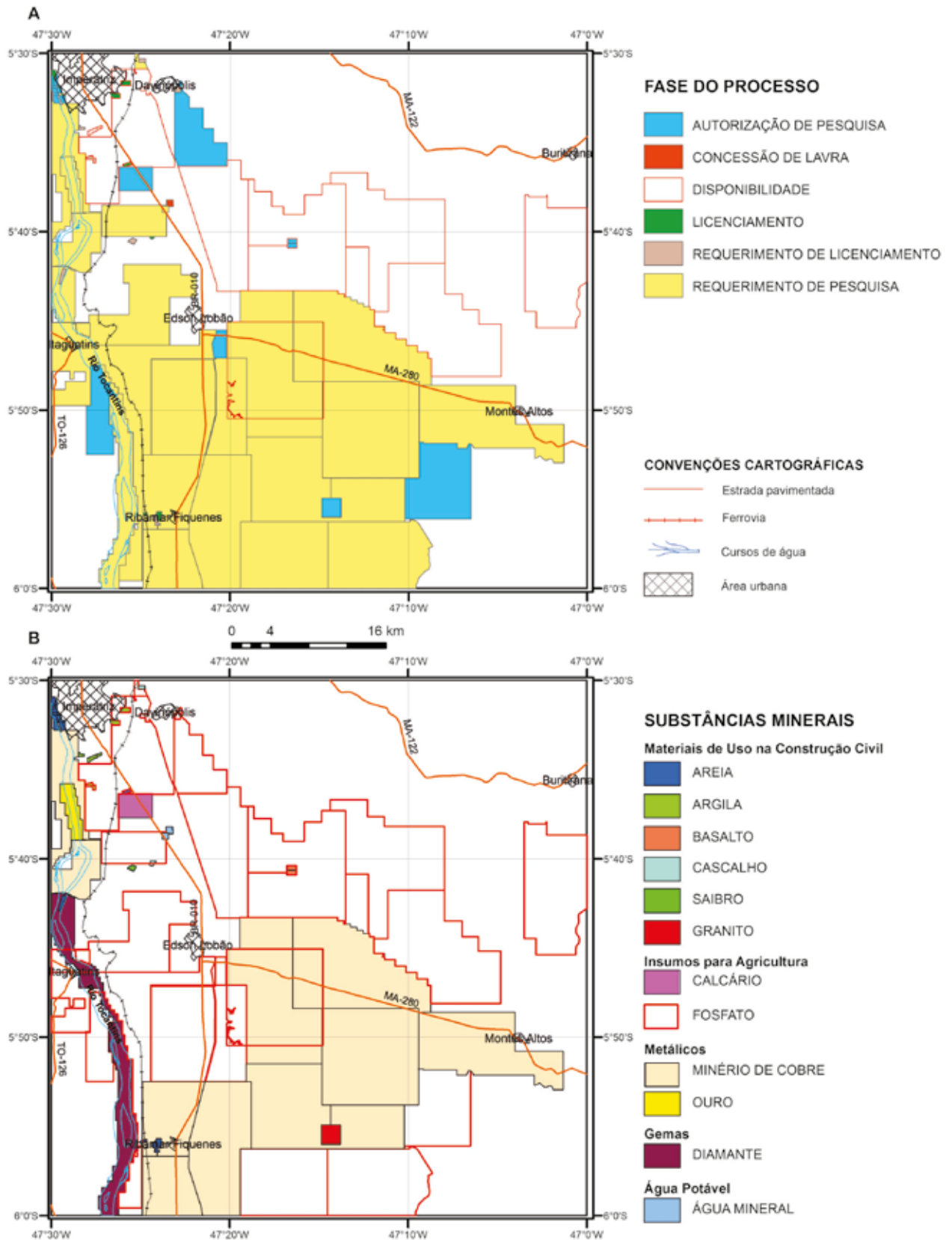


Figura 6.2 – (A) Distribuição das áreas por fase do processo; (B) Distribuição dos processos por substância mineral.

6.1.1. Minerais industriais

6.1.1.1 Zeólitas

As zeólitas referem-se a um grupo de minerais que apresentam como organização básica um arcabouço hidratado de tectossilicatos contendo cátions de metais alcalinos e alcalinos-terrosos, principalmente Na, K e Ca. Tais cátions geralmente estão disponíveis para troca com outros cátions e situam-se em estrutura cristalina aberta, na qual cavidades e poros de diferentes formas e tamanhos constituem um sistema de canais edificadas por diferentes combinações de anéis interligados de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 .

Em virtude de sua organização cristaloquímica, as zeólitas apresentam propriedades especiais que as tornam de grande interesse para indústria, e estimulam a obtenção de espécies sintéticas, destacando-se: a) baixa densidade e grande volume de vazios quando desidratadas; b) quando desidratadas, muitas espécies denotam estabilidade da estrutura cristalina; c) elevada capacidade de troca catiônica; d) canais uniformes; e) adsorção de gases e vapores; e f) qualidade catalítica.

Algumas dessas propriedades favorecem sua utilização industrial como peneiras moleculares, isso porque, em função de sua estrutura interna, podem adsorver seletivamente moléculas de acordo com suas formas e/ou tamanhos (MUMPTON, 1981a; MOORE; REYNOLDS, 1997; GOTTARDI; GALLI, 1985).

As zeólitas são utilizáveis em amplo campo de aplicações, como: construção civil, indústria do petróleo, dessecação, tratamento de rejeito nuclear, agricultura, aquacultura, tratamento de rejeito metalúrgico, refrigeração, detergente, vazamento de petróleo, alimentação animal e biocerâmica.

Destaca-se que a utilização de zeólitas sintéticas, embora implique em altos custos, tem se mostrado uma opção crescente dos segmentos industriais mais exigentes quanto à pureza e uniformidade no tamanho e na forma dos vazios estruturais, tal como nos casos da indústria do petróleo e indústria química. Por outro lado há uma perspectiva de demanda crescente pelas zeólitas naturais nas áreas de controle de poluição ambiental, na agricultura e na indústria alimentícia (MUMPTON, 1981b).

Na década de 1980, de acordo com Rezende e Angélica (1997), a Petrobras Mineração S.A. – PETROMISA, em estudos petrográficos realizados em arenitos da Formação Corda, na Bacia do Parnaíba, registrou inicialmente a presença de zeólitas. Com a extinção da referida instituição, em 1990, tal ocorrência passou a ser objeto de estudos pela CPRM, no âmbito do Projeto Argilas Nobres na Bacia do Parnaíba (REZENDE, 1997). Posteriormente, este bem mineral foi tema de dissertação de mestrado (REZENDE, 2002) e a partir de 2009 voltou a ser estudada através do Projeto Zeólitas da Bacia do Parnaíba – Folha Imperatriz (este trabalho).

As 22 ocorrências de zeólitas cadastradas situam-se no setor central da Folha Imperatriz, principalmente na área dos arenitos eólicos da Formação Corda, com ocorrência restrita na área onde afloram as rochas das fácies fluviais da unidade citada (figura 6.1).

Nos arenitos da Formação Corda a zeólita se apresenta sob a forma de cimento que, de acordo com Rezende (2002), às vezes perfaz até 40% do volume da rocha. Conforme discutido mais detalhadamente no Capítulo 5, as características dos arenitos da Formação Corda indicam que estes foram submetidos a uma diagênese rasa e muito intensa, sendo a eodiagênese a única fase diagenética presente nesses arenitos. Durante a fase eodiagenética a cimentação foi marcada por precipitação de óxido de ferro, esmectita, carbonatos e zeólitas e dissolução de minerais detríticos. O ambiente árido-semi-árido, em que se depositaram estes arenitos e certa concentração de água subterrânea foram responsáveis pela variação no cimento eodiagenético.

Análises por difração de raios-X realizadas em 67 amostras de arenitos zeolíticos da Formação Corda, neste projeto e por Rezende e Angélica (1997), indicaram a presença de zeólitas da série estilbita/stellerita/barrerita, laumontita e heulandita.

Visando investigar a extensão da zona zeolítica, foram realizados 4 furos de sondagem rotativa nos arenitos eólicos da Formação Corda no âmbito deste projeto. A localização destes furos de sonda tomou como base as ocorrências de zeólitas identificadas previamente na área de estudo e foi efetuada em uma área a oeste do núcleo urbano de Montes Altos (figura 1.2). As profundidades dos furos variaram de 27,94 a 47,78 m e, os somatórios das zonas zeolíticas constatadas nos furos, variaram de 12,00 a 26,55 m, conforme se visualiza na Tabela 6.3.

Ressalte-se que todos os furos foram encerrados sempre antes de atingir a base da Formação Corda (figura 6.3), em virtude das limitações do tipo de sonda (Winkie) utilizada na perfuração. Especificamente com o furo 4 foram atravessados inicialmente cerca de 10 m da Formação Codó, antes de alcançar as rochas da Formação Corda.

As análises (petrográficas, difração de raios-X e de microscopia eletrônica) indicaram que a formação da laumontita associa-se aos arenitos mais enriquecidos em cimento carbonático, o que está de acordo com as ideias propostas anteriormente por Rezende e Angélica (1997). Compartilha-se com a proposta defendida por esses autores, de que o processo de zeolitização que se manifesta como cimento nos arenitos está vinculado a uma fase diagenética precoce, relacionada a sistemas hidrológicos abertos, de ambiente semi-árido, conforme classificação de Mumpton (1981b). Neste processo, os basaltos da Formação Mosquito funcionaram como importante área fonte desses sedimentos e a lixiviação teria favorecido a geração da salmoura mineralizante em tais ambientes.

FURO	PROF. (m)	INTERVALOS (m)	RESULTADOS				ESPESSURA ZONAS ZEOLÍTICAS (m)	AMOSTRAS ANALISADAS
			zeólita 1	zeólita 2	zeólita 3	argilo mineral		
NR-F-1	27,94	3,38 à 7,68				esmectita	18,64	19
		7,68 à 26,32	estilbita	heulandita		esmectita		
NR-F-3	47,78	3,32 à 5,62	estilbita			esmectita	26,55	21
		12,26 à 13,18				esmectita		
		13,18 à 24,66	estilbita			esmectita		
		24,66 à 27,52				esmectita		
		27,52 à 30,52	estilbita			esmectita		
		33,52 à 35,01				esmectita		
		35,01 à 38,01	estilbita			esmectita		
		38,01 à 41,01				esmectita		
		41,01 à 47,01	estilbita		laumontita			
47,01 à 47,78			laumontita	esmectita				
NR-F-4	34,11	3,64 à 19,11				esmectita	12,00	13
		19,11 à 22,11	estilbita			esmectita		
		22,11 à 25,11				esmectita		
		25,11 à 34,11	estilbita			esmectita		
NR-F-5	31,04	1,44 à 5,13	estilbita			esmectita	23,54	14
		6,63 à 23,23	estilbita	heulandita	laumontita	esmectita		
		23,23 à 26,23				esmectita		
		26,23 à 28,04			laumontita	esmectita		
		28,04 à 29,60				esmectita		
		29,60 a 31,04			laumontita	esmectita		
TOTAL AMOSTRAS								67

Tabela 6.3 – Intervalos de testemunhos de sondagens com resultados positivos para zeólitas e/ou esmectitas a partir de análises por difração de raio-X.

Um ponto que deve ser levado em conta é que os estudos analíticos efetivados nos testemunhos de sondagem objetivaram identificar o tipo do mineral zeolítico. Tal situação não permitiu uma visualização do comportamento espacial das zonas mineralizadas com respeito aos teores de zeólita na rocha, tanto no âmbito de cada furo de sondagem, como em termos do conjunto dos furos executados. De todo modo, com base no fato de que é no furo 3 que a zona zeolítica apresenta maior espessura (26,55 m), este em princípio torna-se um alvo inicial para que investigações mais acuradas sejam realizadas na área de seu entorno.

Em arenitos das duas associações de fácies individualizadas na Formação Corda (eólica e fluvial) pos-

suem ocorrência de zeólitas, embora a grande maioria das ocorrências esteja na associação de fácies eólica. A litofácies “argilito laminado com intercalações de arenito (PI)”, da associação eólica, é a única que não possui a fase intersticial autigênica na forma de cimento zeolítico.

Ensaios tecnológicos

Visando investigar as possíveis aplicações das ocorrências de zeólitas em arenitos da Formação Corda, foram efetivados diversos ensaios tecnológicos por vários autores sob a égide de diferentes instituições, destacando-se os principais trabalhos:

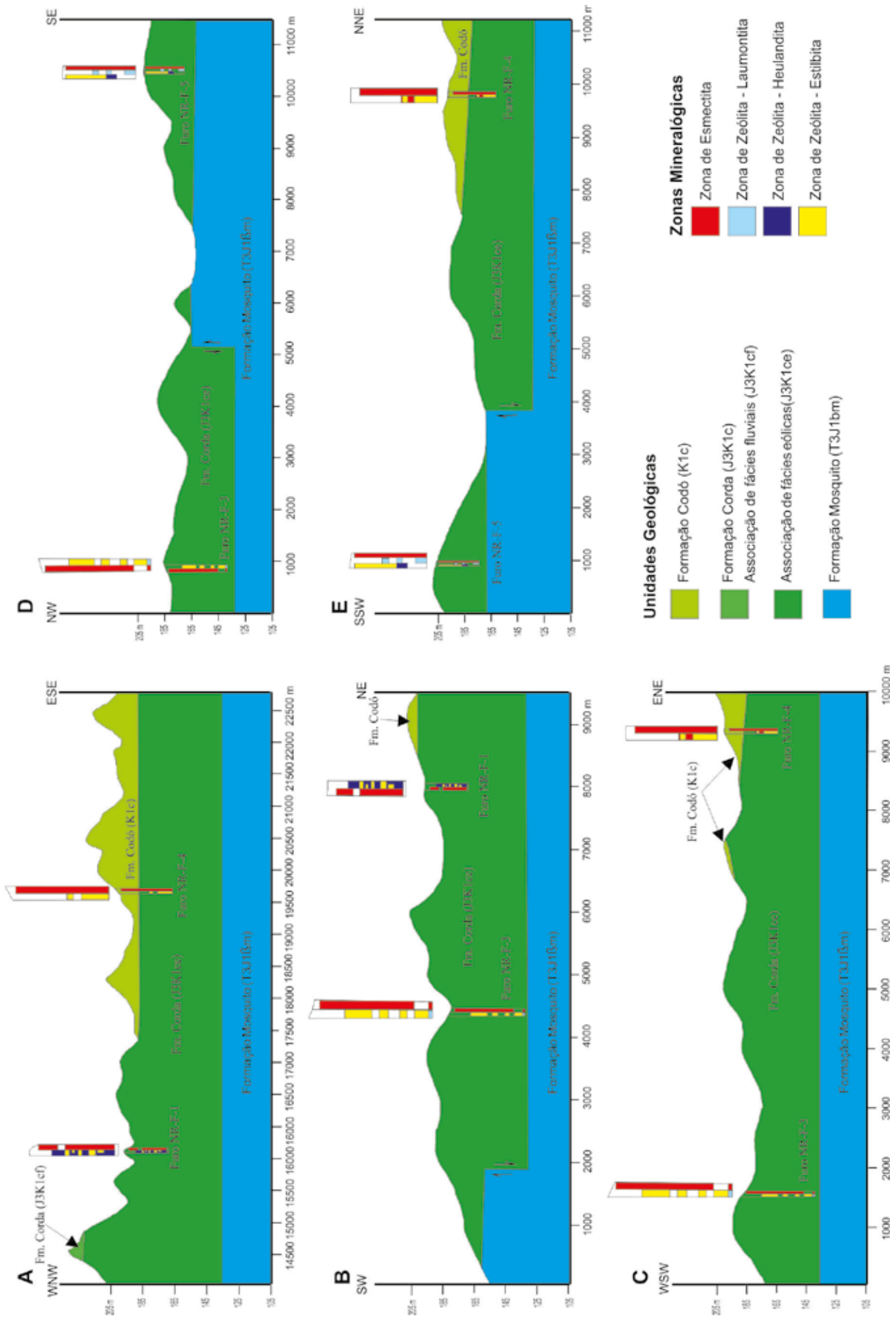


Figura 6.3 – Seções geológicas esquemáticas com os furos de sonda rotativa efetuados na Folha Imperatriz, com a caracterização das zonas zeolíticas e esmeclíticas.

a) Em meados de 1996, de acordo com Rezende (1997), a CPRM encaminhou ao BGS - Serviço Geológico Britânico, por intermédio do projeto *Minerals for Development*, 29 kg de minério zeolítico *in natura* para ensaio de caracterização e beneficiamento. Nesses ensaios o conteúdo zeolítico foi de 18,1%, sendo que, por meio de processos mecânicos obteve-se a elevação dessa concentração zeolítica de 18,1% para até 41,4%;

b) Segundo Rezende (1997), por meio de um acordo de cooperação entre o Brasil e Cuba foram enviados para a *Comercializadora Internacional de Minerales Técnicos S/A – CIMTEC*, 35 kg do minério zeolítico em estado *in natura*, para realização de análises químicas, mineralógicas e granulométricas, Capacidade de Troca Catiônica – CTC (total e por elementos), incremento de temperatura de imersão e análise de retenção de água. Os resultados obtidos em 5 dessas amostras foram inferiores a 30% em termos de conteúdo zeolítico, bem como de 17,38 a 28,74 meq/100g de CTC, e de 1,5 a 2,0°C de incremento de temperatura de imersão. Tais resultados indicaram que os arenitos zeolíticos da Formação Corda não são competitivos quando usados em seu estado natural, uma vez que o minério zeolítico cubano, também em estado *in natura*, apresenta valores de 30 a >70 % de conteúdo zeolítico, 55 a >120 meq/100g de CTC, e 5 a >12 °C de temperatura de imersão;

c) Em meados de 1997 foram encaminhados ao CETEM – Centro de Tecnologia Mineral 210 kg de arenito zeolítico da Formação Corda. Este material serviria para caracterização tecnológica, ensaios de beneficiamento e pesquisas sobre os possíveis campos de aplicações desses produtos, especialmente na área de controle de poluição ambiental, bem como na obtenção de zeólitas sintéticas a partir desta matéria. O CETEM realizou estudos de beneficiamento e concentração das zeólitas estilbita e laumontita, que incluíram britagem, moagem, classificação e concentração. Os valores dos concentrados zeolíticos obtidos por meio de separação magnética, mesa vibratória e espiral de Humphreys, foram de 41,8%, 59,1% e 66,8%, respectivamente. O objetivo da etapa de concentração foi de aumentar a CTC do concentrado zeolítico, visando uma melhor resposta à incorporação de íons e/ou nutrientes. Referindo-se a tais estudos, Monte et al. (2009) destacaram que a utilização de técnicas de baixo custo e da separação convencional propiciaram substancial melhoria no rendimento do concentrado zeolítico, com respeito a liberação de nutrientes, equiparando-o a produtos comerciais similares.

d) Dal Bosco (2007) avaliou o comportamento de um arenito contendo zeólita (estilbita, atestada por difração de raios-X) como trocador catiônico, visando à remoção de Cr (III) de soluções aquosas. Os testes de troca iônica foram utilizados com duas frações granulométricas do material (fração <250 µm – amostra Zeo60 e fração <177 µm – amostra Zeo80) e foram realizados com 1,0 g de amostra em 60 ml de solução contendo Cr(III) em concentrações conhecidas. Foi demonstrada uma eficiência de 99% na remoção de cromo de uma solução contendo 10 mg L⁻¹ do metal em ambas as frações,

enquanto que os testes de dessorção revelaram uma elevada capacidade de regeneração: cerca de 90% do cromo adsorvido na amostra Zeo60 foi liberado para a solução, e 93 % no caso da Zeo80. Os resultados obtidos revelaram a possibilidade do uso do material na remoção do cromo de efluentes e água contaminada. O fato das zeólitas utilizadas serem de amostras naturais (não modificadas) e, portanto, de baixo custo, pode também ser um estímulo para novos estudos visando viabilizar a sua aplicação em larga escala;

e) Bernardi et al. (2007) avaliaram a produção e a qualidade dos frutos de tomateiros cultivados em substrato com zeólita da Formação Corda, enriquecida com N, P e K. Os tratamentos utilizados foram quatro doses (20g; 40g; 80g e 160g por vaso) de zeólitas enriquecidas com H₃PO₄/apatita, KNO₃ e KH₂PO₄, além de um testemunho cultivado em solução nutritiva. O fornecimento de nutrientes através do mineral zeólita enriquecido com N, P e K mostrou-se uma alternativa para o aumento da produção. As maiores produções foram obtidas nos tratamentos com adição de P e K e nas maiores doses de zeólita (160 e 80 g por vaso). A produção de frutos foi 11 a 17% maior em relação ao testemunho cultivada com solução nutritiva. Houve efeitos positivos das zeólitas enriquecidas com fontes de fósforo sobre a firmeza e efeito negativo sobre o pH. A firmeza dos frutos variou 104% entre tratamentos, de 7,06 N (ZNK 160) a 14,38 (ZPK 40). O aumento da disponibilidade de potássio contribuiu para o aumento do teor de ácido ascórbico dos frutos. O material coletado foi concentrado em mesa vibratória, resultando em um produto com 84% de zeólita estilbita e com capacidade de troca de cátions de 2,5 mol/g. A fórmula química determinada da zeólita foi: (CaO)0,82, (Na₂O)0,19, (K₂O)0,15, (MgO)0,56, (Fe₂O₃)0,30, (TiO₂)0,11, (Al₂O₃)1,85, (SiO₂)16, (H₂O)4,7. A zeólita concentrada foi enriquecida através da incubação com soluções contendo H₃PO₄ 1,0 mol L⁻¹ (ZP), KNO₃ 0,5 mol L⁻¹ (ZNK) e K₂HPO₄ 1,0 mol L⁻¹ (ZPK), e recebeu ainda a adição de fosfato natural (34% de P₂O₅) na proporção de 2:1 (m/m);

f) Monte et al. (2009), baseados nas experiências de vários autores que utilizaram a zeólita para melhorar a eficiência do uso da água por meio do aumento da capacidade de retenção de água do solo e do aumento da disponibilidade da água às espécies vegetais, utilizaram concentrado de zeólita coletado no domínio da Formação Corda como condicionador com vistas a aumentar a capacidade de água e nutrientes dos solos arenosos usados no cultivo de arroz. Nesse sentido, foi avaliado o efeito de doses de um concentrado de zeólita sobre a retenção de água de um neossolo quartzo-arenoso e a produção do arroz em duas frequências de irrigação. Os resultados indicaram que, com o uso de concentrado zeolítico houve aumento em relação às amostras testemunhas de até 67% na capacidade de água disponível (CAD) e de até 111% na água facilmente disponível (AFO). O crescimento e a produção de arroz aumentaram com a elevação das doses de concentrado zeolítico com um intervalo de um dia entre as irrigações.

Com base nos experimentos dos autores supracitados, a zeólita alcança um amplo leque de aplicação e pode ser utilizada tanto no campo da poluição ambiental (p. ex. na remoção do cromo de efluentes e água contaminada), como também na agricultura. Neste último campo de aplicação, o mineral pode ser usado tanto para aumentar a capacidade de água e nutrientes dos solos arenosos, como por ex. no cultivo de arroz, como, também, enriquecido com N, P e K, em substrato para cultivo de tomateiros.

Os melhores resultados obtidos nos ensaios recaíram nas amostras com maiores teores de zeólitas, no entanto, fica a dúvida se o teor médio do arenito zeolítico em tela possibilitará o aproveitamento do material zeolítico nos diversos campos de aplicações, apontados pelos ensaios tecnológicos executados.

De todo modo, os ensaios tecnológicos realizados para um amplo leque de aplicações para as zeólitas da Formação Corda justificam a execução de estudos mais detalhados, para avaliar, por exemplo, a possibilidade de aproveitamento dos arenitos zeolíticos da área em rochagem, processo que utiliza aplicação direta no solo de rochas moídas ou contendo finos naturais, como material fertilizante. Tal processo, também é conhecido como petrofertilização e, num sentido mais amplo, abrange as seguintes funções no campo da agricultura: a) calagem; b) calagem associada à fertilização; c) fertilização (remineralização) em conjunto ou não com produtos orgânicos naturais; d) condicionamento de solos com vistas a promover a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas.

No caso da zeólita, sua aplicação na agricultura, teria a função condicionadora do solo, com base na habilidade deste mineral na retenção de água e na capacidade de armazenar nutrientes como N, P e K, liberando-os lentamente. Ela também facilita maior aeração do solo, reduzindo a perda por lixiviação de nutrientes, com consequente economia de fertilizantes e proteção ambiental.

Finalmente, para destacar o potencial de utilização das zeólitas na agricultura, vale destacar a notícia veiculada pela imprensa em abril de 2014 (http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2014?b_start:int=450), que divulga que o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) deferiu o pedido da patente "Composição mineral zeolítica, processos de modificação e utilização", que trata de uma nova tecnologia de produção de fertilizantes de liberação lenta, elaborada por pesquisadores do CETEM, EMBRAPA, CPRM e UFRJ. Esta propõe a utilização de concentrados zeolíticos em substituição aos fertilizantes solúveis, os quais têm levado à poluição das águas e ao desperdício de nutrientes. Na pesquisa foram utilizados concentrados zeolíticos, enriquecidos com nutrientes, como fertilizantes alternativos no cultivo de alface, tomate e mudas de frutas cítricas. Nos testes agrônômicos, a produtividade foi até 40% superior àquela obtida com métodos convencionais de fertilização. Foi observado também que o uso dos concentrados zeolíticos minimiza o impacto ambiental causado pelo gás amônia, liberado pela ureia (base dos principais fertilizantes), um dos principais causadores

do efeito estufa, com ação 50 vezes mais forte que a do dióxido de carbono.

6.1.1.2 Argilas esmectíticas

As esmectitas são argilominerais do grupo dos filosilicatos caracterizados pela presença de água em sua estrutura com arranjos orientados e regulares, coordenando cátions cambiáveis entre as camadas estruturais, dotando-as de propriedades específicas, que favorecem seu uso industrial.

Na área do projeto, desde a década de 1990, são descritas ocorrências de argilas esmectíticas (ANGÉLICA et al., 1995; REZENDE, 1997) relacionadas a depósitos sedimentares da Formação Corda.

Rezende (1997) refere-se também às ocorrências de argilas esmectíticas que se distribuem fora da Folha Imperatriz, associadas à Formação Codó, bem como às esmectitas que resultam do intemperismo sobre os basaltos da Formação Mosquito. Este autor ressalta que, embora no último caso citado o principal argilomirenal seja a caulinita, em certos perfis menos evoluídos ocorre ainda a esmectita associada.

No presente projeto foram cadastradas 33 ocorrências de esmectita, todas associadas às duas associações de fácies da Formação Corda, sendo que em três ocorrências há coexistência de esmectita e caulinita. Destaca-se que, conforme enfatizado por Rezende (1997) e Angélica et al. (1995), as esmectitas de natureza autigênica que ocorrem nos arenitos da Formação Corda podem ocorrer associadas ou não às zeólitas.

Possíveis aplicações

Nas ocorrências cadastradas no presente estudo não se dispõe de dados referentes a ensaios tecnológicos que possibilitem a definição das propriedades industriais da esmectita. De todo modo, de uma maneira genérica, sabe-se que as esmectitas podem ter as seguintes aplicações: a) indústria do petróleo (como fluido de perfuração e no refino de hidrocarboneto); b) descaramento de gorduras, ceras e óleos (naturais e sintéticos); c) indústria de fertilizantes e defensivos agrícolas; d) agricultura (no controle da porosidade e permeabilidade de solos); e) alimentação animal; f) controle de poluição ambiental; g) indústria de produtos farmacêuticos, medicinais, veterinários e cosméticos; h) indústria da construção civil (preparo de argamassa de vedação); i) selantes (em substituição ao amianto); j) indústria de papel (sem carbono); l) tintas; m) borracha; n) filtros industriais (refino de cervejas e vinhos); e o) indústria do cimento (pozolanas, impermeabilizantes e plastificantes).

6.1.2 Materiais de uso imediato na construção civil

Os materiais de uso na construção civil subdividem-se em dois grupos (BRASIL, 2006): a) Insumos minerais estruturais e b) Insumos minerais complementares.

Os insumos minerais estruturais representam a base estrutural da maioria das obras civis, sendo essenciais na construção das moradias e caracterizam-se

por serem consumidos em grandes volumes, com relativos baixos preços, aspectos estes determinantes no sentido de que sejam produzidos competitivamente o mais próximo possível das áreas urbanas consumidoras. Abrangem os seguintes materiais: a) pedras brutas e agregados (areia, arenoso e brita), para concreto, asfalto e argamassa para assentamentos e revestimentos; b) calcário, argila e outros insumos para cimento portland; e c) argila vermelha para cerâmica estrutural ou vermelha (tijolos, blocos e telhas).

Os insumos minerais complementares referem-se a minerais ou seus produtos que são utilizados como complementos das obras, além de outros mercados. São consumidos em grau relativamente baixo e apresentam altos valores unitários. Os insumos minerais complementares na construção civil são: a) argila e outros insumos para cerâmica de revestimento e sanitária; b) areia e outros insumos para argamassas e rejuntas prontos; c) rochas ornamentais e para revestimento (dimensionadas e/ou polidas); e d) insumos para vidro, plástico, massas e tintas, fibrocimento, ferragens, etc.

Na área da Folha Imperatriz destacam-se as ocorrências de argilas para cerâmica e de agregados minerais (figura 6.1).

6.1.2.1 Argilas para cerâmica

Ocorrências de argilas caulínicas situadas nas vizinhanças da área do projeto foram referidas por Rezen-de (1997), associadas aos aluviões holocênicos (Depósitos Aluvionares) e litotipos da Formação Varjão, Grupo Itapecuru.

No presente estudo foram cadastradas 5 ocorrências e 7 depósitos de argilas, os quais aparecem associados às fácies mais pelíticas das formações Varjão, Grajaú e Corda, e também aos Depósitos de Terraços Fluviais e Depósitos Aluvionares. Cinco depósitos de argila vermelha estão em exploração (figura 6.1, tabela 6.1).

Uma destas ocorrências (estação GA-38 na figura 1.2) situa-se na encosta de uma das serras que compõem o conjunto montanhoso correspondente a Formação Varjão, no setor central da área. Este conjunto montanhoso apresenta topo tabular laterítico e mostra-se intensamente ravinado e, de acordo com Souza et al. (1990), a parte superior dessas elevações é representada por crosta laterítica, com teores de até 16% de Al_2O_3 . Tal conjunto se mostra interessante como área de prospecção para laterito aluminoso e argila caulínica.

Os depósitos relacionados a siltitos (estação MC-51 na figura 1.2) da Associação de Fácies Eólica (Formação Corda), situado na área urbana da cidade de Edson Lobão, e aos Depósitos Aluvionares associados ao Rio Cacaú encontram-se em franco processo de extração.

O depósito do baixo curso do Rio Cacaú (estação EL-55 da figura 1.2), localizado a cerca de 8 km a sul da cidade de Imperatriz, corresponde ao principal depósito de argila da área, de acordo com Souza et al. (1990). Estes autores destacam que o referido depósito tem aspecto estratiforme, é constituído por uma argila cinza escura associada à Formação Codó que era utilizada por 8 olarias, cuja reserva foi estimada em 2,5 milhões de toneladas. Nestas olarias utilizavam-se equipamentos

pesados, como tratores, pás carregadeiras e caminhões, e eram produzidas, em média, cerca de 1.000.000 peças (tijolos e telhas) mensais. Esta produção diminuía sensivelmente durante a estação chuvosa e destinava-se integralmente ao mercado local e cidades próximas.

Destaca-se que em 21 amostras analisadas por fluorescência de raios-X neste projeto, foi verificada a presença do argilo-mineral caulinita.

6.1.2.2 Agregados minerais

Os agregados para construção civil são os insumos minerais mais consumidos no mundo. Referem-se à matéria-prima mineral de emprego imediato na indústria da construção civil, embora algumas vezes, tal como no caso do concreto e da argamassa, façam parte de mistura, antes de serem empregadas na construção civil.

Os agregados para construção civil são basicamente representados por rochas britadas e cascalhos/seixos naturais (agregados graúdos), areias (agregados miúdos), bem como misturas de areias e argilas.

O agregado miúdo, em conformidade com a NBR 7211 da ABNT (ASSOCIAÇÃO..., 1983), refere-se à areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. O agregado graúdo é definido como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou da mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

Um fato que serve para realçar a importância fundamental dos agregados no âmbito da indústria da construção civil é que, em média, para cada 1 m³ de cimento portland há a participação de 42% de agregado graúdo, 40% de areia, 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos.

Em virtude dos agregados terem um baixo valor, bem como por sua condição de recursos minerais dos mais acessíveis à população, em geral, eles não são substituídos por outros produtos naturais, ou mesmo industrializados, na construção civil. Destaca-se, no entanto, que no caso da brita, esta pode ser substituída por escórias siderúrgicas, enquanto que para substituição de concreto utilizam-se estruturas metálicas. A julgar pelo que já se verifica na Europa, Estados Unidos e Canadá, a tendência é a de que produtos oriundos da reciclagem de entulhos de construção civil substituam os agregados naturais. De todo modo, os agregados ainda são considerados os mais importantes materiais utilizados na construção civil, correspondendo a 70% da participação do concreto, material este que, depois da água, é o mais consumido em volume pela humanidade.

Os termos, arenoso, agregado, saibro, terra para argamassa ou terra para reboco, são denominações utilizadas para misturas, naturais ou preparadas, de material composto predominantemente por areia, com proporções menores de argila. Tal material é utilizado no preparo de argamassas de cimento para assentamento de tijolos/blocos, revestimento de paredes, tetos e pisos, entre as aplicações mais frequentes.

Na área estudada foram cadastradas 10 ocorrências

cias de basaltos, 7 depósitos de cascalhos, 7 depósitos e 1 ocorrência de areia, 1 depósito e 1 ocorrência de seixo (figura 6.1, tabela 6.1). As ocorrências de basalto referem-se a afloramentos na forma de lajeiros da Formação Mosquito, distribuindo-se na porção centro-sul da Folha Imperatriz e ao longo do Rio Tocantins, que por não representarem topografia relevante, ainda não são explotadas.

Os agregados graúdos explotados na Folha Imperatriz são os cascalhos, como aqueles encontrados no setor sudoeste da área (estações EL-4, EL-7, EL-15, EL-17, NR-213, NR-214, NR-215 na figura 1.2); e seixos (encontrados nas imediações de Davinópolis e Buritirana), referentes aos Depósito de Terraços Fluviais e Depósitos Detríticos Indiferenciados, respectivamente. Alguns destes depósitos superficiais acham-se estreitamente associados a falhamentos, como é o caso de depósito detrítico próximo a Davinópolis; e cascalho em terraços aluviais, localizado entre Edson Lobão e Ribamar Fiquenes.

A opção pelo emprego dos cascalhos/seixos em detrimento da utilização da brita (basalto) decorre da facilidade do processo de extração dos primeiros em relação aos basaltos, além de apresentarem-se associados a areias e argilas, que podem ser extraídas como subproduto.

A extração de cascalhos e areia dos depósitos citados é feita por meio de trabalhadores autônomos e de grupos empresariais, tais como a Extrativa Vale do Sol (estação NR-214), Extrativa Vale do Céu (estação EL-15) e Extrativa Fortil (estação NR-215). Em todos os casos atendem apenas às demandas locais da construção civil.

Também foram cadastrados vários depósitos de areias, em geral relacionados às aluviões dos rios (por exemplo, Rio Cacau e Rio Campo Alegre), além de um depósito nas imediações do núcleo urbano de Governador Edson Lobão e de Montes Altos, todos em exploração (figura 6.1).

6.1.3 Insumos minerais para agricultura

Os insumos minerais para agricultura são utilizados como matéria prima para a indústria de fertilizantes (fosfatos e sais de potássio), corretivos (calcários magnesianos e dolomíticos) e condicionadores (turfa, vermiculita e zeólitas) de solo, e também para obtenção de ácido sulfúrico destinado à industrialização de fertilizantes fosfatados (enxofre, sulfetos metálicos e gipsita).

Neste item apenas serão enfocadas as ocorrências de calcário, uma vez que as ocorrências de zeólitas e argilas esmectitas já foram discutidas em itens anteriores.

Em virtude do amplo universo de aplicação dos calcários tanto na agricultura (corretivo de solo), como na construção civil (matéria-prima para cal e cimento), estes têm sido objeto de pesquisas por parte de companhias particulares. Nesse sentido, campanhas de sondagem foram efetuadas por empresas privadas na região de Imperatriz, com furos em torno de 30 metros de profundidade, tendo sido comprovada a existência

de níveis descontínuos de calcário, com uma espessura máxima de 2 metros, possivelmente na Formação Codó. Abaixo desses níveis, via de regra, ocorre seqüência de arenitos médios a grossos, que repousa diretamente sobre rochas basálticas da Formação Mosquito.

Cadastrou-se na área de trabalho 2 ocorrências de calcário pertencentes à Formação Codó, encontradas em cortes da ferrovia Norte-Sul, a sul de Imperatriz. Ocorrem lentes de calcário com espessuras de até 1m, com teores de 45% de CaO e 3% de MgO, e lentes descontínuas de calcarenitos com espessuras máximas de 0,30 m, tendo coloração cinza-esverdeada e extensão de aproximadamente 10m.

Sobre as ocorrências de calcário na área, Lima e Leite (1978) relatam que se apresentam quase sempre em níveis com pequena espessura (da ordem de 0,05 m), e excepcionalmente com até 2 metros. São cinza esverdeados ou cremes, duros, argilosos, piritosos, e alternam-se com folhelhos, siltitos e calcarenitos.

A despeito do contexto exposto, cabe destacar que Souza et al. (1990) consideram que sejam remotas as perspectivas de que seja encontrado um grande depósito de calcário associado à Formação Codó, a julgar pelas pequenas espessuras dos depósitos conhecidos, bem como pela presença de níveis arenosos e de espessos capeamentos.

Neste trabalho os seguintes pontos são levados em consideração: 1) O contexto regional confere oportunidade de aproveitamento desse calcário para agricultura mesmo nos casos de depósitos restritos, visto que é caracterizado por uma agricultura familiar e de baixa produtividade; 2) Este quadro é propício à aplicação do calcário para rochagem, por meio da aplicação direta da rocha moída, visando a correção da acidez do solo, bem como o crescimento da planta. O calcário se mostra como alternativa que deve ser considerada prioritária, para aproveitamento de pequenos depósitos de que porventura sejam descobertos na área.

Levando-se em conta que calcários são explorados, por processos rudimentares, fora da área de estudo para obtenção de cal (SOUZA et al., 1990), considera-se que a potencialidade da área para calcário deve ser investigada em trabalhos futuros.

6.1.4 Água potável

Neste projeto foram cadastrados 105 poços para água potável, dos quais 10 tiveram suas informações obtidas diretamente pelas equipes de campo do projeto, e os demais foram compilados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS da CPRM, e dos relatórios de Soares Filho (1979), Souza et al. (1990), Villas Boas e Araújo (1999).

As unidades litoestratigráficas aflorantes na área do projeto que se apresentam como mananciais para captação de águas subterrâneas são formações Corda, Grajaú, Varjão, além dos Depósitos Aluvionares. Adicionalmente, as formações Poti, Piauí e Sambaíba, que ocorrem em sub-superfície sotopostas aos basaltos da Formação Mosquito, são consideradas como excelentes

zonas armazenadoras de águas subterrâneas, de acordo com dados de furos de sondagem realizados pela PETROBRAS no setor noroeste da Bacia do Parnaíba e com informações de mapas de isópacas (e.g. CAPUTO, 1984; GÓES; TRAVASSOS; NUNES, 1993).

Vale ressaltar que, embora as unidades Poti, Piauí e Sambaíba sejam reconhecidamente consideradas como os melhores aquíferos para os casos em que as demandas visem vazões mais expressivas (até 100 m³/h), a sua exploração implica em custos adicionais na construção de poços tubulares. Apesar disso, conforme atestado por Lima e Leite (1978) e neste projeto pode-se dizer que a captação de águas subterrâneas na área se faz principalmente às expensas das rochas da Formação Sambaíba, e nos casos pequenas demandas, nos depósitos holocênicos (Depósitos Aluvionares).

Souza et al. (1990), através da Carta de Zoneamento Hidrogeológico, individualizou na área da Folha Imperatriz três zonas para captação de águas subterrâneas, assim definidas:

Zona 1: Refere-se ao domínio de captação profunda, prevista para poços de até 1.200 m, para exploração dos aquíferos Sambaíba (350 m), e Poti-Piauí (1.000 m). Esta zona tem rochas essencialmente arenosas, possui amplas áreas de recarga em suas áreas de afloramentos (fora dos limites da folha em estudo), e indicação de vazão acima de 200 m³/h, compatível para empreendimento de grande porte populacional, industrial ou de irrigação.

Zona 2: Correspondente ao domínio de captação dos aquíferos aflorantes e sub-aflorantes nas formações Corda, Grajaú, Varjão e nos Depósitos Aluvionares. Esses aquíferos livres e subconfinados têm poços de até 250 m de profundidade, com vazões inferiores a 30 m³/h. São apropriados para abastecimento urbano, pequena irrigação, pequena e média indústria pecuária, hospitais, postos de gasolina, hotéis, fazendas, escolas, residências, chafarizes públicos, etc.

Zona 3: Refere-se às áreas representadas por plattos constituídos por coberturas detríticas e lateríticas. Tais áreas não são recomendadas para implantação de empreendimentos com vistas à captação de águas subterrâneas. Sob estes depósitos ocorrem aquíferos típicos das zonas 1 e 2.

6.1.4.1 Características dos aquíferos

Neste item apresenta-se uma síntese das principais características hidrogeológicas das unidades que ocorrem na área deste trabalho, aflorantes ou não, com base nas informações de Souza et al. (1990), Rodrigues et al. (1994) e Villas Boas e Araújo (1999) e também nas informações referentes ao mapa de isópacas, elaborado por Caputo (1984).

Sistema Aquífero Poti-Piauí

As formações sedimentares correspondentes ao Sistema Aquífero Poti-Piauí ocorrem apenas em sub-superfície na área da Folha Imperatriz. As formações Poti e Piauí têm espessuras que variam de 150 m a 200 m e

200 m a 250 m, respectivamente, perfazendo ao conjunto uma espessura total em torno de 350 a 450 m.

De acordo com Souza et al. (1990), o topo do referido sistema ocorre a uma profundidade média de 1.000 m, conforme informações de furo executado pela PETROBRAS na cidade de Imperatriz, no ano de 1961. Ambos os aquíferos (Poti e Piauí) são referidos como de boas características hidrogeológicas e potencialidades elevadas, constituindo-se assim como opções indicadas a demanda por altas vazões. Os autores citados destacam ainda que as características hidrodinâmicas conhecidas para o aquífero Poti na região de Balsas (sudoeste da área do projeto) são: $T=3,5 \times 10^{-3}$ m²/s (T =transmissividade), $K = 6,3 \times 10^{-6}$ m/s (K =condutividade hidráulica), $S = 9,29 \times 10^{-4}$ (S =coeficiente de armazenamento). Estes valores são considerados também para o aquífero Piauí, com base na estreita similaridade existente entre os mesmos.

Aquífero Sambaíba

O Aquífero Sambaíba (Formação Sambaíba) apresenta boas perspectivas para captação de águas subterrâneas, pois apresenta boa porosidade e razoável permeabilidade, além de contar com ampla zona de recarga (SOUZA et al., 1990; VILLAS BOAS; ARAÚJO, 1999). Este aquífero, com espessura em torno de 400 m (CAPUTO, 1984), se destaca como a unidade geológica mais promissora para armazenamento e produção de águas subterrâneas.

A importância do Aquífero Sambaíba na área de estudo é comprovada pelos poços tubulares com profundidades superiores a 350 m, que apresentam vazões maiores que 100 m³/h, tendo havido poços cuja vazão atingiu 225 m³/h, com vazão específica da ordem de 9m³/h/m, alcançando um valor extremo de 30m³/h/m (SOUZA et al., 1990).

Na Folha Imperatriz este aquífero se apresenta confinado pelos derrames basálticos da Formação Mosquito, situação que contribui sobremaneira para que certos poços perfurados se apresentem como surgentes, a exemplo do existente na sede da Companhia de Águas e Esgotos do Maranhão - CAEMA, no município de Imperatriz. As empresas de grande porte sediadas nesta região, tal como a CAEMA, exploram, exclusivamente o Aquífero Sambaíba para suprir as demandas por altas vazões de águas subterrâneas.

Aquífero Corda

O Aquífero Corda, de acordo com os mapas de isópacas elaborados por Caputo (1984), apresenta espessura sempre inferior a 50 m na área de estudo. Segundo Souza et al. (1990) e Villas Boas e Araújo (1999), tal aquífero, representado por arenito fino a médio com intercalações de pelito, tem uma potencialidade hidrogeológica fraca a média, e é utilizado para suprir as necessidades de pequenas comunidades, para as quais vazões reduzidas se mostram satisfatórias. As características hidrodinâmicas disponíveis deste aquífero foram

determinadas na cidade de Imperatriz, cujos valores são T (transmissividade) = $10,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, K (condutividade hidráulica) = $5,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e S (coeficiente de armazenamento) = $2,8 \times 10^{-2}$.

Dados referentes ao inventário de 40 poços tubulares executados no Aquífero Corda, citados por Souza et al. (1990), demonstram: 1) O nível estático médio do aquífero é da ordem de 11,20 m, sendo o máximo de 33,85 m e o mínimo de 1,00m; 2) A vazão média de exploração é da ordem de 13 m³/h; 3) O rebaixamento médio é em torno de 15 m; e 4) A média das vazões específicas é de 1,477 m³/h/m, sendo os valores máximos e mínimos, respectivamente, 5,00 m³/h/m e 0,102 m³/h/m.

Aquífero Grajaú

O Aquífero Grajaú, segundo Souza et al. (1990) e Villas Boas e Araújo (1999), tem espessura da ordem de 35m, e a Formação Grajaú tem sido considerada como um bom aquífero com base nas características granulométricas de seus litotipos, embora a sua espessura reduzida, a restrita área de ocorrência e a silicificação sejam fatores que limitam sua relevância para captação de águas subterrâneas. A exploração do Aquífero Grajaú é destinada a suprir demandas inferiores a 30 m³/h.

Aquífero Itapecuru

Souza et al. (1990) e Villas Boas e Araújo (1999) classificam o Aquífero Itapecuru (representado na área pela Formação Varjão) em termos hidrogeológicos como de potencial fraco a médio, visto o caráter arenoso-argiloso dos litotipos. Sua grande área aflorante, na Folha Imperatriz ou regionalmente, representa uma opção de captação de água subterrânea direcionada a suprir demandas por pequenas vazões, tais como as que se destinam ao abastecimento de pequenas sedes municipais, fazendas, hospitais, pequena irrigação e até média pecuária.

Souza et al. (1990) citam dados referentes aos poços tubulares cadastrados na Formação Varjão: 1) O nível estático médio é da ordem de 38 m, sendo o máximo de 100 m e o mínimo de 1,40m; 2) A vazão média de exploração é de 11 m³/h, a máxima é de 40 m³/h e a mínima de 2 m³/h; 3) O rebaixamento médio é em torno de 22m, sendo o máximo de 64m e o mínimo de 3m; e 4) A média das vazões específicas é de 0,788m³/h/m, sendo os valores máximos e mínimos, respectivamente, 5,33 m³/h/m e 0,02 m³/h/m.

Aquíferos aluvionares

Os depósitos aluvionares apresentam relevância na área em termos de águas subterrâneas. Estes ocorrem com maior destaque na planície do Rio Tocantins, ao longo da qual se mostram representados por siltes, areias e cascalhos. De acordo com Souza et al. (1990) e Villas Boas e Araújo (1999), estes depósitos revelam alta potencialidade para captação de águas subterrâneas para poços tubulares com profundidade de até 15 m, em função da grande possança e pelas condições fa-

voráveis de sua área de recarga decorrentes da elevada precipitação pluviométrica da região. Além das características hidrogeológicas relevantes, a localização destes depósitos (próximos a BR-010 e da cidade de Imperatriz) são fatores altamente positivos.

6.2 GEOQUÍMICA PROSPECTIVA

Embora não existam ocorrências de diamante conhecidas na Folha Imperatriz, Correia (1990) e Sachs e Silveira (2010) se referem à existência de intrusões kimberlíticas juro-cretáceas alojadas nas rochas sedimentares na Bacia do Parnaíba, tendo sido o corpo de Redondo o primeiro a ser descoberto no Brasil.

Minerais indicadores são amplamente usados na pesquisa de kimberlitos, os quais são referidos como "satélites", e incluem a picroilmenita, a granada (piropo), a cromita e o piroxênio cromífero (diopsídio), que possuem quantidades significativas de magnésio, cromo, titânio em suas composições químicas. A granada é um mineral abundante em kimberlitos, sendo identificada geralmente pelas cores amarela ou alaranjada, vermelha, lilás ou púrpura e violácea.

A prospecção geoquímica em concentrados de bateia realizada em leitos ativos de drenagens é o método mais comum utilizado na prospecção de diamantes/kimberlitos, sendo aplicado no âmbito deste projeto. Foi realizada amostragem de concentrados de bateia, com amostras coletadas em drenagens da área de ordens maiores ou igual a 2, tendo sido coletadas 50 amostras, o que perfaz uma densidade de cerca de 1 amostra / 48km². O material coletado foi, em geral, areia fina a grossa, em um volume inicial de cerca de 20 litros, peneirado a 2 mm, tendo sido bateado no local o material inferior a essa granulometria.

As análises mineralógicas semi-quantitativas foram efetuadas em laboratório da CPRM - Serviço Geológico do Brasil, na Superintendência Regional de Porto Alegre, sendo os resultados apresentados em percentuais.

Dos resultados obtidos através das análises mineralógicas computaram-se aqueles minerais que poderiam ser indicativos para a ocorrência de kimberlitos, como ilmenita, leucoxênio, granada e piroxênio.

A ilmenita e o leucoxênio têm ampla ocorrência na área da Folha Imperatriz, enquanto que a granada ocorre principalmente na parte sul da folha. O piroxênio é de ocorrência bastante restrita, tendo sido identificado apenas em um ponto na extremidade sudeste da folha, onde aflora o basalto da Formação Mosquito, compondo a associação granada+ilmenita+piroxênio (figura 6.4).

A ilmenita tem, comumente, uma ampla dispersão em drenagens (vide p. ex. PEREIRA, et al., 2008) sendo carreada a grandes distâncias da área fonte, enquanto a granada e o piroxênio, menos resistentes, são carreados a pequenas distâncias da fonte.

Na parte norte da Folha Imperatriz observa-se este padrão de dispersão para a ilmenita e ele sugere uma área fonte no quadrante nordeste da folha, o qual

é ocupado pela murraria sustentada pela Formação Varjão. A área fonte para a associação granada+ilménita+piroxênio estaria na extremidade sudeste da folha ou mesmo fora dos seus limites. No entanto, como citado acima, apenas determinadas variedades dos minerais pesquisados, com composições químicas específicas, podem ser indicativos de fontes kimberlíticas. Neste trabalho, o exame com auxílio de lupa indicou que, a granada tem cor rosada, semelhante a almandina, e não se trata do tipo piropo, assim como o piroxênio não é o diopsídio (cromífero), sendo provavelmente do tipo augita.

Desta forma, os dados obtidos na prospecção geoquímica sugerem que a fonte dos minerais enfocados não é kimberlítica. A ausência da cromita entre os minerais pesados encontrados nos concentrados é bastante sugestiva disto. No caso da associação granada+ilménita+piroxênio encontrada na extremidade sudeste da área, é bastante plausível que a sua fonte sejam basaltos da Formação Mosquito. No entanto, apenas o reconhecimento da composição química destes minerais (análises por microsonda eletrônica, por exemplo) poderia afastar qualquer dúvida quanto à natureza e tipo de fonte.

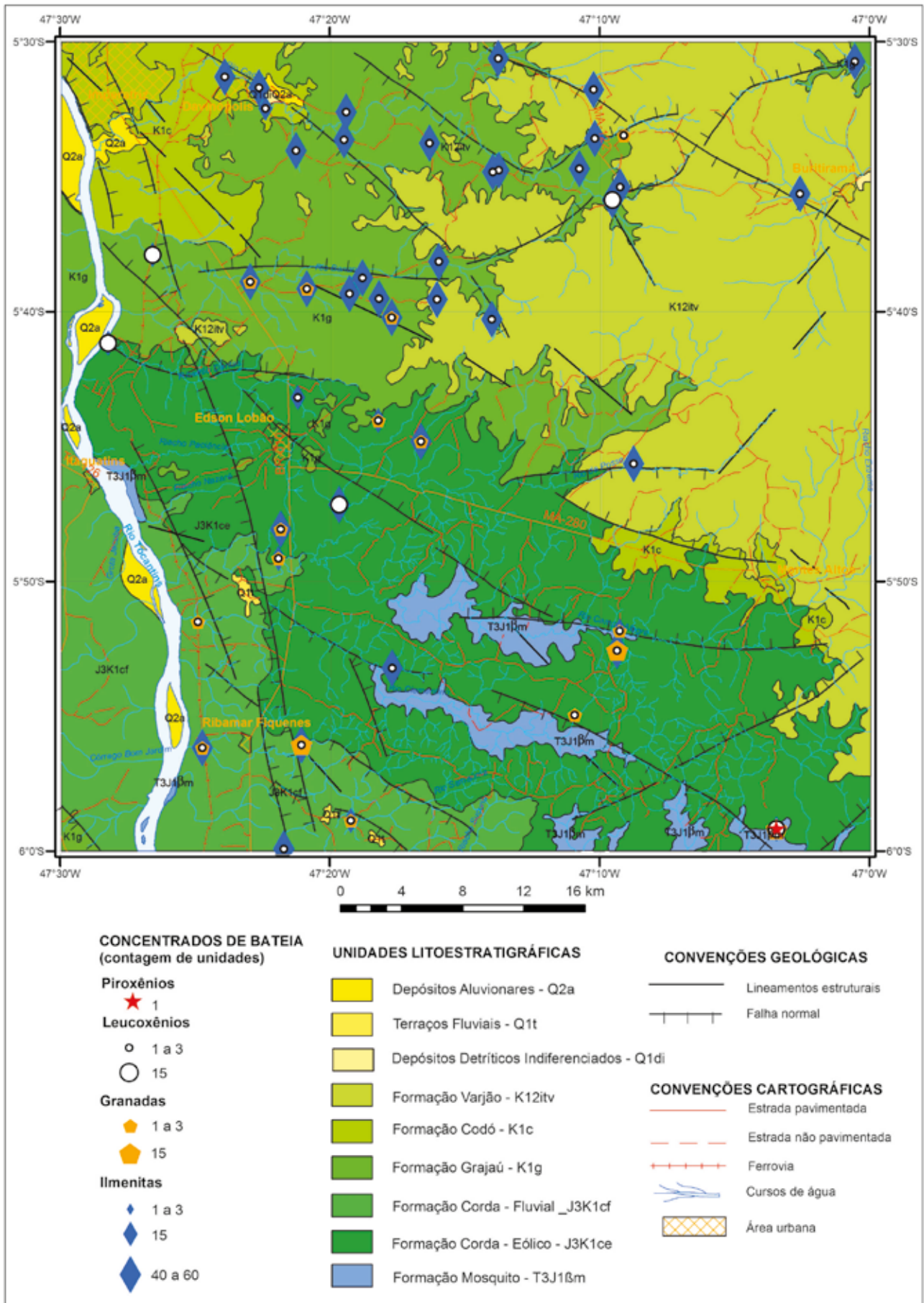


Figura 6.4 – Distribuição e resultados da prospecção geoquímica em concentrados de bateia na Folha Imperatriz.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A integração dos dados geológicos, análises laboratoriais, processamento dos dados obtidos, somados a informações bibliográficas recentes, propiciaram alcançar os objetivos propostos neste projeto, além de produzir avanços significativos no conhecimento geológico da área da Folha Imperatriz.

Os basaltos da Formação Mosquito estão caracterizados como basaltos toleíticos de baixo-Ti, menos evoluídos, de ambiente intraplaca, embora parte das amostras analisadas inserem-se no campo de rochas de cadeia meso-oceânica. São enriquecidos em ETRL, tendo sido gerados, de acordo com Fodor et al. (1990), a partir de um protólito enriquecido em ETRL ou de uma fonte rochosa por fusão parcial incipiente. Apesar de não ter sido executada nenhuma datação neste projeto, o intervalo de idade admitido para a Formação Mosquito é de 200 Ma a 190 Ma, relacionado à idade da CAMP - Central Atlantic Magmatic Province, o que corresponde a um pequeno intervalo dentro do primeiro pulso magmático na Bacia do Parnaíba, como é interpretado por Góes, Travassos e Nunes (1993) e outros autores.

Na Formação Corda identificou-se e cartografou-se duas associações de fácies, denominadas Associação de fácies eólica (J3K1ce) e Associação de fácies fluvial (J3K1cf). As paleodireções de ventos no domínio eólico mostram sentidos preferenciais para o quadrante oeste-noroeste, e as paleodireções de correntes no domínio fluvial mostram sentidos preferenciais para sudoeste. Neste trabalho adota-se o intervalo do Jurássico Superior ao Eocretáceo (Barremiano) para a deposição dos sedimentos da Formação Corda e o ambiente deposicional desta unidade é interpretado como desértico, com contribuição de sistemas de dunas, lacustre interdunas e fluvial.

Com relação à Formação Grajaú, caracterizada principalmente por arenitos e arenitos conglomeráticos depositados em ambiente fluvial, sugere-se que parte dos clastos que compõem o arcabouço dos arenitos são oriundos do retrabalhamento dos arenitos eólicos da Formação Corda, o que indica pouco transporte e proximidade da área-fonte. Adota-se o Aptiano como idade da sua deposição.

A ocorrência da Formação Codó na área estudada restringe-se à região de Imperatriz e Montes Altos. As

suas litofácies, constituídas de folhelho cinza-escuro ou avermelhado, com níveis carbonáticos e estromatolíticos, frequentes concentrações oxidadas de produtos de alteração de pirita (e talvez da esfalerita) e de fragmentos vegetais carbonizados, são indicativas de deposição em ambiente lagunar com alguma influência marinha. Adota-se o intervalo Aptiano-Albiano para esta deposição. A partir da análise dos materiais retirados pelas perfurações de poços tubulares profundos observou-se que, possíveis lentes da Formação Codó aparecem intercaladas às rochas da Formação Varjão.

Neste trabalho propõe-se a designação de Formação Varjão para os registros de sedimentação predominantemente continental relacionados ao Grupo Itapecuru. As exposições em que se baseia a proposta ocorrem ao longo da Rodovia MA-122, no trecho entre os municípios de Senador La Rocque e Buritirana, no quadrante nordeste da Folha Imperatriz. Esta sedimentação essencialmente psamítica, interpretada como depositada em canais e/ou planícies de inundação de um sistema fluvial meandrante, apresenta estruturas deformacionais sin- e pós-deposicionais e direções de paleocorrentes com sentidos principais para os quadrantes leste-nordeste a leste-sudeste. Sugere-se o intervalo Albiano-Cenomaniano para a deposição destes sedimentos.

As formações superficiais cenozoicas compreendem Terraços Fluviais, Depósitos Detríticos Indiferenciados e Depósitos Aluvionares. Os Terraços Fluviais, que representam depósitos do paleovale do Rio Tocantins, mostram aparentes variações no regime de fluxo do antigo vale daquele rio, e sentidos de paleocorrentes preferenciais para sudeste e sudoeste, sugerindo sentido do fluxo inverso ao atual.

Do ponto de vista tectônico propõe-se que a área foi afetada por falhamentos resultantes de reativações de antigas estruturas (pré-cambrianas e brasilianas), associadas à Faixa de Dobramentos Tocantins - Araguaia, que afetaram a infra-estrutura da Bacia do Parnaíba. Estas falhas gravitacionais em blocos produziram uma configuração tectônica tipo horst-graben, com direção NW, no setor sudoeste da área.

Com relação ao estudo de recursos minerais, este trabalho traz informações sobre as ocorrências de mine-

rais de interesse econômico na Folha Imperatriz, a qual se revela com bom potencial mineral, basicamente, para minerais industriais e para uso na construção civil e agricultura. Entre essas informações citam-se:

- a identificação de zeólitas e esmectita nos arenitos da Formação Corda é uma contribuição para fundamentar futuros programas de pesquisa mais detalhados;
- também fica evidenciado o relevante recurso hidrogeológico da área, com vazões que extrapolam os 100 m³/hora de água para os aquíferos sotopostos aos derrames basálticos da Formação Mosquito;
- A estreita associação espacial de depósitos detríticos, cascalhos e matacões silicificados com falhamentos traçados na área, importante para a exploração desses recursos para a construção civil.

Como principais recomendações sugere-se que datações radiométricas pelo método Ar-Ar sejam efetuadas nas rochas da Formação Mosquito na Bacia do Parnaíba, com controle geológico de mapeamento em escala local. Neste sentido seria importante a realização de estudos paleontológicos nos sedimentos das formações Corda e Pastos Bons e buscar um melhor entendimento do relacionamento destas unidades entre si e com os basaltos da Formação Mosquito. Estas análises e estudos teriam como objetivo a delimitação do intervalo de idade dos basaltos e da sua posição cronológica

dentro da CAMP - Central Atlantic Magmatic Province, de Marzoli et al., 1999.

Recomenda-se a realização de perfis verticais nas escarpas do conjunto montanhoso sustentado por rochas da Formação Varjão. Estas ações propiciariam um melhor entendimento do empilhamento e paleo-ambiente desta unidade. Caminhamentos geológicos ao longo da superfície superior tabular do conjunto rochoso poderiam confirmar e avaliar o potencial de crosta laterítica para argilas caulínicas.

O processamento e análise mais aprofundados das informações geofísicas disponíveis para a Bacia do Parnaíba (magnetometria, gamaespectrometria, gravimetria) é de alta relevância para o entendimento da tectônica e, deste modo, poderia implicar em uma maior valorização das potencialidades econômicas (recursos minerais) para a Folha Imperatriz.

Além do exposto, a área necessita de investigações mais acuradas: 1) sobre a sua potencialidade para águas subterrâneas e de um estudo sistematizado sobre as características hidrodinâmicas de seus aquíferos; 2) para avaliar o potencial das ocorrências de argilas esmectíticas; 3) das planícies de inundações dos rios para delimitação das zonas aluvionares para prospecção de argila e areia; 4) para uma melhor avaliação do potencial da área para fosfato e calcário para rochagem (Formação Codó).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIO-COMBUSTÍVEIS. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Aerolevantamentos Bacia do Parnaíba, área Parnaíba: levantamentos aerogeofísicos para a identificação de áreas com ocorrência potencial de petróleo e gás na Bacia do Parnaíba. São Paulo: ANP; USP, 2006. II. 280 p. Tomo II, v. 1.
- AGUIAR, G. A. Bacia do Maranhão: geologia e possibilidades de petróleo. Belém: Petrobras: 1969. 55p. (Relatório Interno, 371).
- AGUIAR, G. A. Revisão geológica da Bacia Paleozóica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. Anais... São Paulo: SBG, 1971. v.1, p.113-122.
- ALMEIDA, F. F. M. Sistema tectônico marginal do Cráton do Guaporé. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: SBG, 1974. v. 4, p. 7-17.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Inundações marinhas fenerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004 . p. 43-58.
- ANAISSE JR., J. Fácies costeiras dos depósitos Itapecuru (Cretáceo), região de Açailândia, bacia do Grajaú. 1999. 86 f. Dissertação (Mestrado)– Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1999.
- ANAISSE JR., J.; TRUKENBRODT, W.; ROSSETTI, D. F. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, área de Açailândia/MA, Bacia do Grajaú. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Org.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 119-150.
- ANGÉLICA, R.S. et al. Estudos mineralógicos e geoquímicos preliminares da ocorrência de zeólitas em sedimentos mesozóicos da bacia do Parnaíba, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 5., 1995, Niterói. Resumos Expandidos... Niterói: SBGq, 1995. 1 CD-ROM.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211, 1983.
- Baksi, A. K.; Archibald, D. A. Mesozoic igneous activity in the Maranhão province, northern Brazil: ⁴⁰Ar/³⁹Ar evidence for separate episodes of basaltic magmatism. Earth and Planetary Science Letters, v. 151, p. 139-153, 1997.
- BERNARDI, A. C. C. et al. Produção e qualidade de frutas de tomateiro cultivado em substrato com zeólitas. Horticultura Brasileira, v. 25, p. 306-311, 2007.
- BORGES, M. S. et al. Instalação e Inversão da Bacia do Capim. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 6., 1997, Pirenópolis, GO. Resumos expandidos... Pirenópolis: SBG-Núcleo Brasília, 1997. p. 134-135.
- Boynton, N. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: HENDERSON, P. (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry, Elsevier, v. 2, p. 64-114, 1984.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2006. [Brasília]: DNPM, 2006.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2007. [Brasília]: DNPM, 2007.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2008. [Brasília]: DNPM, 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2009. [Brasília]: DNPM, 2009.
- BRITO-NEVES, B. B. Processos orogênicos no Pré-Cambriano do Brasil. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. B. (Coord.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1990. 415p.
- CALDASSO, A. L. S.; HAMA, M. Posicionamento estratigráfico das rochas básicas da Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. Anais... Recife: SBG, 1978. p. 567-581.
- CALDASSO, A. L. A sedimentação mesozoica e seu relacionamento com a evolução geomorfológica na Bacia

- Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. Anais... Recife: SBG, 1978. p. 784-790.
- CAMPBELL, D. F. Revised report on the reconnaissance geology of Maranhão basin. Belém: PETROBRAS, 1949. 117 p. Rept. 7.
- CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. Revista Brasileira de Geociências, v. 27, n. 3, p. 283-294, 1997.
- CAPUTO, M. V. et al. Evolução tectônica da Bacia do Parnaíba, qual é a influência das Orogenias. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9., 2006, Belém. Resumo Expandido... Belém: SBG, 2006. v. 1. p. 6-10.
- CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do grupo Serra Grande - Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: SGB, 1984. v. 2. p.740-753.
- CAPUTO, M. V. Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil. 1984. 583 f. Tese (Doutorado em Filosofia e Geologia)– University of California, Santa Barbara, California, 1984.
- CARNEIRO, R. G. **Mapeamento estrutural da área de Grajaú-Imperatriz**. Belém: PETROBRAS, 1974. 52 p. (Relatório Técnico, n. 358).
- CORDANI, U. G. *et al.* **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1984. p. 20. (Série Ciência-Técnica-Petroleo. Seção: Exploração de Petróleo. Publicação, 15).
- CORREIA, E. A. **Diamantes e kimberlitos do sul e leste da Bacia do Parnaíba (Brasil)**. 1990. 184 f. Tese (Doutorado) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1990.
- CUNHA, F. M.; CARNEIRO, R. G. **Carta Geológica da Bacia do Parnaíba**. Escala 1.250.000. PETROBRAS/DNPM, 1973.
- CUNHA, P. R. C. et al. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, n. 1, p. 47-55, 1994.
- DAL BOSCO, S. M. **Remoção de cromo de solução aquosa utilizando rocha sedimentar contendo zeólita**. 2007. 33 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.
- DAPPLES, E. C. Diagenesis of sandstones. In: LARSEN, G.; CHILINGAR, G. V. (Eds.) **Diageneses of sediments and sedimentary rocks**. New York: Elsevier, 1979. p. 31-97.
- DE ROS, L. F.; MORAES, M. A. S. Sequencia diagenética em arenitos: uma discussão inicial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SGB, 1984. v. 1. p.894-904.
- FLÜGEL, E. **Microfacies analysis of limestones**. Heidelberg: Springer Verlag, 1982. 633 p.
- FODOR, R. V. et al. Petrology, isotope characteristics, and K-Ag ages of the Maranhão, northern Brasil, Mesozoic basalt province. **Contributions to mineralogy and petrology**, v. 104, p. 555-567, 1990.
- FOLK, R. L. **Petrology of Sedimentary Rocks**. Austin: Hemphill Publishing Co., 1980. 190 p.
- GÓES, Ana Maria. **A Formação Poti (carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba**. 1995. 171 f. il. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar)-Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- GÓES, A. M. O.; TRAVASSOS, W. A. S.; NUNES, K. C. **Projeto Parnaíba: reavaliação da bacia e perspectivas exploratórias**. Belém: PETROBRAS, 1993. v. 1. 106 p.
- GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n.1, p.57-67, jan./mar. 1994.
- GÓES, A. M.; COIMBRA, A. M. Bacias sedimentares da Província Sedimentar do Meio-Norte do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5., 1996, Belém. **Boletim de resumos e guia de excursões...** Belém, SBG-NO, 1996. p. 186-187.
- GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F. Gênese da bacia de São Luís-Grajaú, meio-norte do Brasil. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Org.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 15-29.
- GOTTARDI, G.; GALLI, H. **Natural Zeolites**. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 409 p.
- HAY, R. L. Geology of zeolites in sedimentary rocks. In: MUMPTON, F.A. (Ed.). **Mineralogy and geology of natural zeolites**. Washington: Mineralogical Society of America, 1981. p. 53-64. (Reviews in Mineralogy, 4).
- Disponível em: http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2014?b_start:int=450. Acessado em 09/Junho/2014.
- HUBERT, J. E. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the cross composition and texture of sandstones. **Journal of Sedimentary Research**, v. 32, p. 440-450, 1962.
- JENSEN, L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. Ontario: Ontario Division Mines, 1976. p. 1-21. (Miscellaneous Paper, 66)
- KAHN, J. S. The analysis and distribution of the properties of packins in sand size sediments. **Journal Geology**, v. 64, n. 4, p. 385-395, 1956.

- KESSLER II, L. G. Diagenetic sequence in ancient sandstones deposited under desert climatic conditions. **Journal of Geological Society**, London, v. 135, p. 41-49, 1978.
- LÊ BAS, M. J. et al. Chemica classification of volcanic rocks based on the total alkali-silicadiagram. **Journal of Petrology**, v. 27, p. 745-750, 1986.
- LEITE, J. F.; ABOARRAGE, A. M.; DAEMON, R. F. **Projeto carvão na Bacia do Parnaíba: Relatório final das etapas II e III**, Recife: DNPM; CPRM, 1975, 5 v.
- LEONARDI, G. **Annotated atlas of south America tetrapod footprints (devonian to holocene) with an appendix on Mexico and Central America**. Brasília: CPRM, 1994. 248 p.
- LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenético, relatório final da Etapa III**. Recife: DNPM; CPRM, 1978. v. 1.
- LIMA, M. R.; CAMPOS, D. A. Palinologia dos folhelhos da fazenda Muzinho, Floriano, Piauí. **Boletim IG-USP**, São Paulo, n. 11, p. 149-154, 1980.
- LIMA, R. D.; ROSSETTI, D. F. Análise faciológica e seqüencial de depósitos de delta de baía (Neocretáceo), leste da Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Coord.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. 264p. (Coleção Friedrich Katzer)
- LISBOA, M. A. R. The permian geology of northern Brazil. **American Journal of Science**, v. 37, n. 221, Série 4, p. 425-443, 1914.
- MARZOLI, A. et al. Extensive 200-Million-Year-old Continental Floods Basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. **Science**, v. 284, p. 616-618, 1999.
- MENDES, M. S.; BORGHI, L. Análise faciológica da Formação Codó (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador, 2005.
- MCBRIDE, E. F. A Classification of Common Sandstones. **Journal of Sedimentary Petrology**. v. 33, n.3, p. 664-669, 1963.
- MCBRIDE, E. F. Silica in sediments: nodular and bedded chert; selected papers reprinted from **Journal of sedimentary petrology**. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1979.
- MCBRIDE, E. F. Quartz cement in sandstones: a review. **Earth-Science Review**, Elsevier, v. 26, n. 1-3, p. 69-112, 1989.
- MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. Maranhão paleozoic basin and cretaceous coastal basins, northern Brazil. **Bulletin of the American Association Petroleum Geologist**, Tulsa, v. 48, n. 9, p. 1475-1512, 1964.
- MIZUSAKI, A. M. P. et al. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, n. 15, p. 183-198, 2002.
- MONTE, M. B. M. et al. Nutrient release by a Brazilian sedimentary zeolite. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 81, n. 4, p. 641-653, dec. 2009.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1997. 378 p.
- MORAD, S. **Diagenesis of clastic sedimentary rocks**. Uppsala: Department of Mineralogy and Petrology, 1991. 287 p.
- MORTON, A. C. Stability of Detrital Heavy Minerals in Tertiary Sandstones from the North Sea Basin. **Clay Minerals**, n. 3, v. 19, p. 287-308, 1984.
- MORTON, A. C.; HALLSWORTH, C. R. Identifying provenience-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, n. 90, p. 241-256, 1994.
- MORTON, A. C.; HALLSWORTH, C. R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, v. 124, n. 1-4, p. 3-29, 1999.
- MORTON, A. C. Heavy minerals in provenance studies. In: ZUFFA, G. G. (Ed.). **Provenance of arenites**. Dordrecht: Canada by Kluwer Academic Publishers, 1985. p. 249-277.
- MUMPTON, F. A. Natural zeolites. In: _____. (Ed.) **Mineralogy and geology of natural zeolites**. [s.l.]: Mineralogical Society of America, 1981a. p. 1-17. (Reviews in Mineralogy, 4).
- MUMPTON, F. A. Utilization of natural zeolites. In: _____. (Ed.) **Mineralogy and Geology of Natural Zeolites**. [s.l.]: Mineralogical Society of América, 1981b. p. 177-204. (Reviews in Mineralogy, 4).
- NASCIMENTO, M. S.; GÓES, A. M. Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luis-Grajaú, norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n.1, p. 50-63, 2007.
- OLIVEIRA, D. C., de; MOHRIAK, W. U. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 20, p. 351-383, 2003.
- PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Reconstrução Paleambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do

- Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Coord.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. 264 p. (Coleção Friedrich Katzer).
- PEARCE, J. A.; NORRY, M. J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. **Contrib. Mineral. Petrol.** n. 69, p. 33-47, 1979.
- PEREIRA, R. M. et al. Dispersão da picroilmenita: estudo de caso aplicado ao kimberlito Cancã, Ilícinea, Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 27, n. 1, p. 79-86, 2008.
- PETTIJOHN, T. J.; POTTER, P. E.; SIEVER, R. **Sand and Sandstone**. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1973. 618 p.
- PONTE, F. C.; PONTE FILHO, F. C. Evolução tectônica e classificação da bacia do Araripe. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 4., 1996, Rio Claro. **Boletim...** Rio Claro: UNESP, 1996. p. 123-133.
- REZENDE, N. G. A. M. **A zona zeolítica da formação Corda, Bacia do Parnaíba**. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2002.
- REZENDE, N. G. A. M. **Argilas Nobres e Zeolitas na Bacia do Parnaíba**: relatório final de projeto. Belém: CPRM, 1997. 33 p. (Informe de Recursos Minerais, Série Diversos, 2).
- REZENDE, N. G. A. M. **Insumos Minerais para Agricultura e áreas potenciais nos Estados do Pará e Amapá**. Belém: CPRM, 2001. 57 p. (Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para Agricultura, 10).
- REZENDE, N. G. A. M.; ANGÉLICA, R. S. Geologia das zeolitas sedimentares no Brasil. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. S. (Ed.) **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília, DF: DNPM; CPRM, 1997. v. 4-B. p.193-212.
- REZENDE, W. M.; PAMPLONA, H. R. P. Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbano Santos. **Bol. Téc. Petróbras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1/2, p. 5-14, 1970.
- RODRIGUES, T. L. N. et al. (Org.). **Folha SB.2-X-A. Bacabal**: Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994.
- RODRIGUES, T. L. N. et al. (Org.). **São Luís – folha SA.23-Z-A. Cururupu, folha SA.23-X-C**: Estado do Maranhão. Brasília, DF: CPRM, 1994. 185 p. il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.
- ROSSETTI, D. F. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís – Grajaú. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís - Grajaú**. Belém: MPEG, 2001. p. 31-46. (Coleção Friedrich Katzer).
- ROSSETTI, D. F. Facies analysis of the Lower Succession of the Upper Itapecuru Formation, São Luís basin, northern Brazil. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (Ed.). **Contribuição à geologia da Amazônia**. Belém: Falângola, 1997. p. 241-283.
- ROSSETTI, D. F. Soft-sediment deformational structures in late Albian to Cenomanian deposits, São Luís Basin, northern Brazil: evidences for paleoseismicity. **Sedimentology**, v. 46, p. 1065-1081, 1999.
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, Maranhão. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, série Ciências da Terra, v. 9, p. 29-41, 1997.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; ARAI, M. A passagem Aptiano-Albiano na Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Coord.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: MPEG, 2001. 264 p. (Coleção Friedrich Katzer).
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Coord.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: MPEG, 2001. 264 p. (Coleção Friedrich Katzer).
- ROSSETTI, D. F. et al. Tsunami induced large-scale scour-and-fill structures in Albian to Cenomanian deposits of Grajaú Basin, Northern Brazil. **Sedimentology**, v. 47, p. 309-323, 2000.
- ROSSETTI, D. F. et al. Sequential analysis of the Aptian deposits from the São Luís and Grajaú basins, Maranhão State (Brazil) and implication for unraveling the origin of evaporites. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 465-469, 2000.
- SACHS, Liliane Lavoura Bueno; SILVEIRA, Francisco Valdir. Kimberlitos do estado do Piauí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45., 26 set. - 01 out. 2010, Belém. **Resumos...** Belém: SBG. Núcleo Norte, 2010.
- SADOWSKI, G. R.; CAMPANHA, G. A. C. Grandes Falhas no Brasil Continental. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Org.). **Geologia do continente sul-americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 407-421.
- SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. **Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís**. Rio de Janeiro: CPRM, 2009. 215 p.
- SCHOBENHAUS FILHO, C. (Coord.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**: Folha Tocantins (SC.22). Brasília, DF: DNPM, 1975. 58 p.
- SCHOBENHAUS, C. et al. (Coord.). **Mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais**: escala 1:2.500.000. Brasília, DF: DNPM, 1981.

- SCHOBENHAUS, C. et al. (Coord.). **Geologia do Brasil:** texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área Oceânica adjacente incluindo depósitos minerais: escala 1:2.500.000. Brasília, DF: DNPM, 1984. 501 p.
- SGARBI, G. N.C. et al. Bacia Sanfranciscana: O registro fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. **Bacia do São Francisco:** Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG, 2001. p. 93-138.
- SOARES FILHO, A. R. **Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba:** Subprojeto hidrogeologia: relatório final - folha 07 - Teresina - NO. Recife: CPRM, 1979.
- SOUZA, A. S. de (Org.). **Imperatriz – folha SB.23-V-C:** Estados do Maranhão e Tocantins. Brasília, DF: CPRM, 1990. 75 p. il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.
- STRADIOTO, M. R.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Caracterização petrográfica dos arenitos do Grupo Bauru na região sudoeste do estado de São Paulo. **Revista da Escola de Minas**, v. 61, n. 4. p. 433-441, 2008.
- SUN, S. S.; MCDONOUGH, W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: SAUNDERS, A. D.; NORRY, M. J. (Eds.). *Magmatism in the ocean basins*. **Oxford. Geol. Soe. Spec. Publ.**, v. 42, p. 313-345, 1989.
- TARDY, Y. **Géochimie des altérations:** étude des arennes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Strasbourg: [s.n.], 1969. 199 p. (Université de Strasbourg. Mémoires du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, 31).
- VAZ, P. T. et al. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**. v. 15, n. 2, p. 253-263, 2007.
- VILLAS BOAS, J. M.; ARAÚJO, C. C. (Org.). **Açailândia – folha SB.23-V-A:** Estados do Pará e Maranhão. Brasília, DF: CPRM, 1999. 87 p. il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.
- WALKER, T. R. Diagenetic origin of continental red beds. In: FALKE, H. (Ed.). **The Continental Permian in Central, West, and South Europe**. Dordrecht: D. Reidel, 1976. p. 240-282.
- WALKER, T. R.; WAUGH, B.; CRONE, A. J. Diagenesis in first-cycle desert alluvium of Cenozoic age, southwestern United States and northwestern Mexico. **Geological Society of America Bulletin**, v. 89, p. 19-32, 1978.
- WERNICK, E. **Rochas magmáticas:** conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica. São Paulo: UNESP, 2004.
- WILSON, M. D.; PITTMAN, E. D. Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 47, n. 1, p. 3-31, 1977.
- WINSPEAR, N. R.; PYE, K. The origin and significance of boxwork clay coatings on dune sand grains from the Nebraska Sand Hills, USA. **Sedimentary Geology**, v. 94, p. 245-254, 1995.
- WORDEN, R. H.; MORAD, S. **Quartz Cementation in Sandstones**. International Association of Sedimentologists, Special Publication, Blackwell Science, Oxford, v. 29, 352 p., 2000.
- YOUNG, C.; BORGHI, L. Corpos de arenitos isolados: um novo modelo exploratório de reservatórios nas bacias paleozóicas brasileiras. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2006. Disponível em: <http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArquivosAdjuntos/Oil&Gas_Rio_2006/IBP_1514.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2009.
- YOUNG, C. G. K.; BORGHI, L. An event of forced regression in the Pimenteira Formation. (Devonian, Parnaíba Basin, Brazil). In: LATINAMERICAN CONGRESS OF SEDIMENTOLOGY, 3., 2003, Belém. **Abstract Book...** Belém: IAS, 2003. p. 168-170.
- ZALÁN, P. V. Evolução Fanerozóica das Bacias Sedimentares Brasileiras. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Org.). **Geologia do continente sul-americano:** evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 407-421.

