



**Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

**Centro de Ciências Exatas e da Terra**

**Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DE DEPÓSITOS  
SEDIMENTARES NA BORDA SUDOESTE  
DA BACIA POTIGUAR.**

**Autor:**

**YOE ALAIN REYES PÉREZ**

**Orientador:**

**Prof. Dr. FRANCISCO PINHEIRO LIMA FILHO**

**Dissertação Nº 35 / PPGG**

**Natal-RN, março de 2003.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DE DEPÓSITOS  
SEDIMENTARES NA BORDA SUDOESTE  
DA BACIA POTIGUAR.**

Autor:

**Yoe Alain Reyes Pérez**

Dissertação de Mestrado apresentada em 31 de Março de 2003, para obtenção do título de Mestre em Geodinâmica pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

**Comissão Examinadora:**

**Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho (DG/PPGG/UFRN-Orientador)**

**Prof. Dra. Valéria Centurion Córdoba (DG/PPGG/UFRN)**

**Prof. Dr. Jorge Luís Porsani (IAG/USP)**

**Natal-RN, março de 2003.**

*"Muitos dirão que sou aventureiro, e sou mesmo, só que de um tipo diferente, daqueles que entregam a própria pele para demonstrar suas verdades."*

*"Hay que endurecerse, pero sin perder la ternura jamás."*

***Che***

*Aos meus pais, Elsa e Alfredo e a minha irmã  
Aixa que são meu maior amor, orgulho e  
felicidade. Minha força nasce do amor deles.  
Perdão pelo tempo de ausência.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Ao Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho pela amizade e orientação nestes novos caminhos da geologia.

A Ingrid, que me deu um grande apoio no início do mestrado.

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e o Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), pela possibilidade de realizar esta dissertação. Ao Departamento de Geologia pelos meios disponibilizados.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo. Ao projeto “Estratigrafia física de depósitos de maré como análogos na predição de reservatórios em subsuperfície” (PETROBRÁS/CENPES/PROFEX), pelo apoio financeiro.

A Verônica quem deu uma ajuda fundamental, suportou meu caráter e teve as palavras de alento que me permitiram chegar ao final. Ao Anderson pela ajuda. Aos colegas do grupo GEA que contribuíram para a realização desta dissertação, já que toda pesquisa necessita do trabalho em equipe.

Ao Dr. Cláudio Pires pela amizade e apoio. A Profa. Fátima que tem sido uma mãe durante estes dois anos que estive longe de minha família. A Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba que em todo momento teve uma palavra gentil e foi fundamental no trabalho de microscopia. Ao Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra pelas discussões no estudo da tectônica das tufas calcárias. Ao Prof. Dr. Jaziel Martins Sá pelo melhoramento da dissertação. A Nilda pela ajuda e gentileza.

Ao Prof Dr. Jorge Luís Porsani (IAG- USP), pelos trabalhos de campo e aprendizagem do método de GPR. A Prof. Dra. Lucy Gomes Sant’Anna (IG-USP), pela disponibilidade em responder todas as perguntas e dúvidas sobre o estudo das tufas calcárias. A Hamilton Santori (HASAGEO) e ao Prof. Dr. Miguel Angelo Mane (DG-UERJ), por disponibilizar o espectrômetro de raios gama.

## SUMÁRIO

---

Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
CAPÍTULO 1 – Introdução e objetivos .....	1
1.1 Apresentação .....	1
1.2 Objetivo Geral .....	1
1.3 Objetivos Específicos .....	2
1.4 Localização da área de estudo .....	2
CAPÍTULO 2 –Revisão Bibliográfica .....	4
2.1 Bacia Potiguar .....	4
2.1.1 Evolução Tectono - Sedimentar da Bacia Potiguar .....	4
2.1.2 Estratigrafia da Bacia Potiguar .....	7
2.2 Formação Açú .....	10
2.3 Formação Jandaíra .....	12
2.4 Tufas Carbonáticas e Travertinos .....	12
2.4.1 Tufas no Brasil e no mundo .....	14
CAPÍTULO 3 – Desenvolvimento Metodológico .....	15
3.1 Revisão Bibliográfica.....	15
3.2 Seleção das áreas de trabalho.....	15
3.2.1 Análises de imagens do Landsat TM .....	15
3.3 Escolha dos afloramentos, aquisição e tratamento de dados .....	21
3.3.1 Dados dos afloramentos .....	26
3.3.1.1 Espectrometria de raios gama .....	28
3.3.1.2 Microscópio eletrônico de varredura (MEV) .....	31
3.3.1.3 Estudo dos isótopos estáveis .....	32
3.3.2 Investigações de subsuperfície empregando GPR .....	32
3.3.2.1 Equipamento .....	34
3.3.2.2 Etapa prévia do levantamento .....	35
3.3.2.3 Processamento dos dados de GPR .....	36
3.3.2.4 Apresentação dos dados de GPR .....	37
CAPÍTULO 4 – Análise dos dados e interpretação dos resultados .....	38
4.1 Afloramento Apodi .....	38
4.2 Afloramento Olho d’ Água da Bica .....	44
4.3 Afloramento Quixeré .....	50
CAPÍTULO 5 – Conclusões e recomendações .....	64
Referências bibliográficas.....	67
Anexos .....	76

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1.1- Mapa de localização das áreas de estudo .....	2
Figura 2.1- Mapa de localização e arcabouço estrutural da Bacia Potiguar .....	4
Figura 2.2- Mapa Geológico Simplificado da Bacia Potiguar .....	8
Figura 2.3- Carta Cronoestratigráfica da Bacia Potiguar .....	9
Figura 3.1- Fluxograma mostrando as etapas metodológicas .....	16
Figura 3.2- Leitura de imagens de área de estudo no módulo IMPIMA.....	17
Figura 3.3- Registro de imagens da área de estudo.....	18
Figura 3.4- Composições coloridas da área de estudo .....	19
Figura 3.5- Mapa Geológico da área de estudo.....	20
Figura 3.6A- Mapa Geológico do afloramento Apodi .....	22
Figura 3.6B- Mapa Geológico do afloramento Tabuleiro do Norte.....	23
Figura 3.6C- Mapa Geológico do afloramento Olho D' Água da Bica .....	24
Figura 3.7- Fotos dos Afloramentos Apodi, Tabuleiro e Quixeré .....	25
Figura 3.8- Espectômetro portátil de raios gama .....	29
Figura 3.9- Levantamento de perfis com espectrômetro de raios gama.....	30
Figura 3.10- Medidas realizadas no centro de um açude .....	30
Figura 3.11- Microscópio eletrônico de varredura modelo XL 30 ESEM.....	31
Figura 3.12- Equipamento RAMAC-MALA .....	34
Figura 4.1- Bloco esquemático mostrando a localização das linhas GPR .....	39
Figura 4.2-Detalhe das sondagens geofísicas com GPR.....	39
Figura 4.3- Detalhe da picada aberta para aquisição de dados GPR.....	40
Figura 4.4- Radargramas processados mostrando a falta de refletores .....	41
Figura 4.5- Espectros de amplitude analisados .....	42
Figura 4.6- Seção colunar e perfil de raios gama ressaltando os picos defasados .....	43
Figura 4.7- Problemas de falsa leitura ocasionados pela coleta de dados.....	43
Figura 4.8 A- Perfil de raios gama obtido com espaçamento de 30cm.....	44
Figura 4.8 B- Perfil de raios gama obtido segundo as variações texturais.....	44
Figura 4.9- Afloramento Apodi.....	45
Figura 4.10- Seção colunar e perfil de raios gama.....	46
Figura 4.11- Detalhe das sondagens geofísicas com GPR.....	47
Figura 4.12 - Radargrama de levantamento realizado com antena de 100 MHz .....	48
Figura 4.13- Afloramento Olho d' Água da Bica.....	49
Figura 4.14- Fotos das estruturas espinha de peixe.....	50
Figura 4.15- Foto das tufas carbonáticas contendo folhas e fragmentos .....	51
Figura 4.16- Modelo esquemático da formação de uma caverna.....	52
Figura 4.17- Fotografias obtidas no MEV .....	53
Figura 4.18- Fotografias obtidas no MEV .....	53
Figura 4.19- Fotografias obtidas no MEV .....	54
Figura 4.20- Difratogramas de raios x .....	55
Figura 4.21- Valores de isótopos estáveis.....	56
Figura 4.22- Detalhe das sondagens geofísicas com GPR.....	57
Figura 4.23- Padrões de terminações de reflexões usados na sismoestratigrafia.....	58
Figura 4.24- Radargrama de Quixeré com representação da interpretação .....	59
Figura 4.25- Fotomosaico Quixeré e seção colunar .....	60
Figura 4.26- Fotomosaico de Quixeré e representação da interpretação tectônica .....	62
Figura 4.27- Pares de falhas conjugadas .....	63
Figura 4.28- Bloco diagrama esquemático do afloramento Quixeré .....	63

## **LISTA DE ANEXOS**

---

Anexo 1- Seções colunares com perfis de raios gama levantados nos afloramentos Apodi e Quixeré.

Anexo 2- Valores de isótopos de oxigênio (SMOW e VPDB) e carbono (VPDB)

## RESUMO

---

Com o presente trabalho foi analisado o potencial de uso de diversas técnicas com o objetivo de identificar geometrias deposicionais e subsidiar os estudos de reconstrução paleogeográfica da borda sudoeste da Bacia Potiguar. Para tanto, foram identificadas três áreas e selecionados alguns afloramentos para estudos integrados de geologia, geofísica e geoquímica. As principais técnicas utilizadas foram: análises de fácies; sensoriamento remoto; perfis geofísicas com GPR; levantamentos de perfis de raios gama, em afloramentos; estudos petrográficos com microscopia ótica e com o microscópio eletrônico de varredura e análise isotópica de carbono e oxigênio nas tufas carbonáticas. Esta abordagem metodológica se mostrou eficiente no que tange ao uso do método de análise de fácies para identificação de geometrias 2D. Os perfis de GPR realizados em Quixeré imagearam alguns importantes refletores de interesse geológico, permitindo identificar as geometrias deposicionais das tufas e suas relações de contato com as rochas abaixo. Entretanto, o GPR não mostrou suficiente contraste para a identificação de refletores de interesse geológico nos afloramentos Apodi e Olho d' Água da Bica. Os perfis de raios gama também apresentaram uma boa resposta, justificando seu uso na identificação de geometria 1D e 2D. A análise isotópica de carbono e oxigênio, permitiu uma primeira compreensão das condições paleoambientais de depósitos de tufas. Ressalta-se o excelente resultado obtido com o GPR na identificação das geometrias deposicionais das tufas e suas relações de contato com as rochas abaixo. A análise do campo de tensão destas rochas mostrou uma direção vertical de maior esforço ( $\sigma_1$ ) de deformação, cuja origem foi associada à ação gravitacional.

## ABSTRACT

---

This study focuses on the potential of several techniques used to identify depositional geometries and paleogeographical investigation on the SW border of the Potiguar Basin. Three areas were selected for an integrated geological, geophysical and geochemistry study. The main used techniques were facies analysis, remote sensing, ground penetrating radar (GPR) and gamma-ray in outcrops, as well as petrographic microscope observations and the using of scanning electronic microscopic (SEM), and Carbon and Oxygen Isotopic study in the carbonate tufa. These methodological approaches were very efficient in the facies analysis of 2D geometries. The GPR profiles carried out in Quixeré identified important geological reflectors which allowed to the identification of depositional geometries of tufa. However, GPR profiles were not able to identify geological reflectors in the Apodi and Olho d'Água da Bica outcrops. Gamma-ray profiles also presented good results, which justify their use in 1D and 2D geometric analysis. Carbon and Oxygen Isotopic analyses were also used to investigate paleoenvironmental setting of tufa deposits. It is important to remark the excellent results of GRP using in the identification of depositional geometries of tufa and their contact relationships with the underlying rocks. Field analysis of faults indicate a vertical sigma-1 orientation which was associated to normal faults.

## **I. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS:**

---

### **1.1 Apresentação:**

A Arquitetura de Fácies é uma importante ferramenta usada na parametrização de afloramentos análogos a reservatórios petrolíferos. Ela pode fornecer elementos quantificáveis (na parametrização) que permitam a modelagem estocástica ou determinística do reservatório estudado. É, na verdade, uma forma de descrever os sistemas deposicionais em termos do arranjo tridimensional de suas unidades geomórficas, chamadas de elementos arquiteturais. Estes elementos são definidos por suas geometrias e fácies associadas, numa determinada escala, fisicamente separáveis por superfícies limitantes, cuja hierarquia varia de 1<sup>a</sup> até 6<sup>a</sup> ordens, Miall (1985, 1988, 1996).

Estudos sobre geometrias deposicionais e arquitetura sedimentar, em afloramentos, aplicando técnicas de imageamento, GPR e raios gama têm sido realizados em quase todos os sistemas deposicionais. A partir do final da década de 80 houve um importante incremento neste tipo de pesquisa, entretanto, pode-se citar dois marcos: os trabalhos de Miall (1985, 1988) e o Meeting promovido pela *Geological Society of London* denominado de *Quantification of Sediment Body Geometries and their internal heterogeneities*, realizado em 1988.

Na caracterização de depósitos influenciados por marés podem ser destacados os trabalhos de Bristow (1995), McMechan *et al.* (1997), Yoshida *et al.* (1999), Willis e White (2000), e Willis *et al.* (2001) bem como os desenvolvidos pelos membros do projeto Tidal Sandstone Reservoir Characterization, FORCE/ Imperial College, (Johnson *et al.* 1999, Jackson *et al.* 1999, Jackson *et al.* 2000, Yoshida *et al.* 2000, Yoshida *et al.* 2001). Os trabalhos de caracterização de tufas podem ser destacados os de Ford e Pedley (1996), Andrews *et al.* (2000), Pedley *et al.* (2000), Horvatincic *et al.* (2003).

### **1.2 Objetivo Geral:**

Estudar a geometria e arquitetura de fácies de depósitos terrígenos, controlados por marés, da Formação Açú (unidade Açú-4) e de depósitos carbonáticos quaternários denominados de tufas, ambos ocorrendo na borda Sudoeste da Bacia Potiguar.

### 1.3 Objetivos Específicos:

- Interpretar os sistemas deposicionais nos afloramentos estudados;
- Aplicar, métodos geofísicos e de Leitura de Fácies que permitam determinar as geometrias deposicionais de depósitos controlados por marés e de tufas calcárias.

### 1.4 Localização da área de estudo:

A área de estudo situa-se na porção sudoeste da Bacia Potiguar, abrangendo a região da transição da Formação Açú a Formação Jandaíra, bem como os depósitos de tufas calcárias ali presentes. Para esta dissertação foram selecionados três afloramentos nos municípios de Apodi no Rio Grande do Norte, Tabuleiro do Norte e Quixeré, no Ceará. O primeiro afloramento localiza-se na porção sul da bacia e os outros na região oeste.

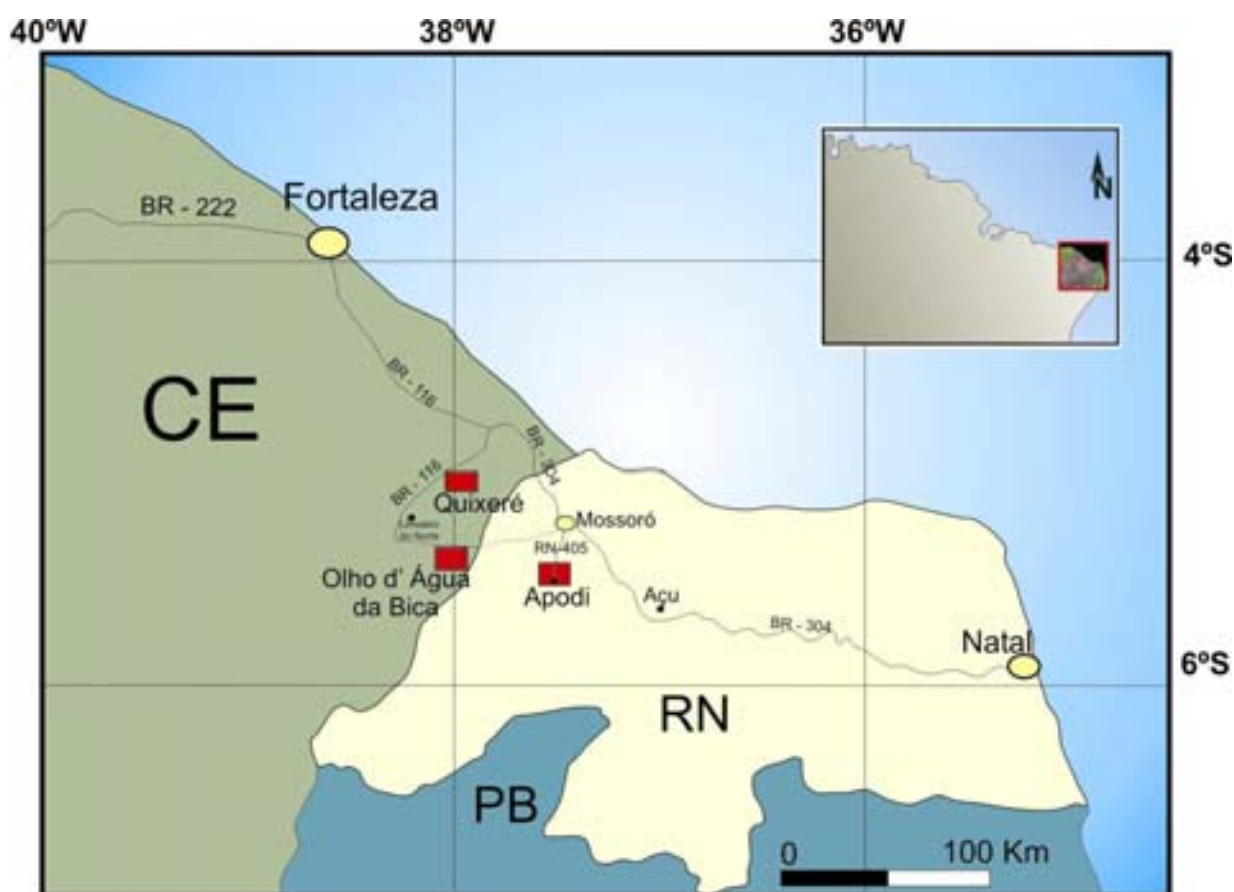


Figura 1.1 Mapa de localização das áreas de estudo

O acesso até o afloramento localizado na porção sul pode ser feito a partir de Natal pela BR-304 até a cidade de Açú, e então toma-se a RN-233 até a cidade de Apodi. O afloramento encontra-se a 2 km a norte da cidade de Apodi. Para os afloramentos da

região oeste, o acesso a partir de Natal pode ser feito pela BR-304 até a cidade de Mossoró. A partir daí pega-se a RN 015 e depois a CE 377 até as cidades de Quixeré e Tabuleiro do Norte. O afloramento de melhor exposição da área de Tabuleiro do Norte encontra-se no povoado Olho d' Água da Bica. O afloramento de melhor exposição em Quixeré encontra-se na escarpa da estrada CE-377 perto do povoado Serrinha.

Esta dissertação é composta por cinco capítulos e o texto está organizado como segue:

Capítulo 1: Apresenta os objetivos e a localização da área de estudos.

Capítulo 2: Revisão sobre a Geologia Regional focado em especial a Formação Açu, Formação Jandaíra e apresentado um levantamento sobre a evolução das Tufas Carbonáticas.

Capítulo 3: Apresenta os métodos e técnicas utilizadas nesta pesquisa, tais como: análise de imagens satélites, escolha de afloramentos, aquisição e tratamento dos perfis de raios gama e GPR, levantamento das seções colunares, análise microscópica, análise dos isótopos estáveis.

Capítulo 4: Análise dos dados e Interpretação dos resultados.

Capítulo 5: Conclusões e Recomendações.

## II.- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

### 2.1 BACIA POTIGUAR.

A Bacia Potiguar, situada no extremo nordeste do Brasil, limitando-se a leste pelo Alto de Touros, com a Bacia de Pernambuco- Paraíba; a noroeste, pelo Alto de Fortaleza com a Bacia do Ceará; a sul com embasamento cristalino; e a norte com o oceano atlântico, ocorrendo até a cota batimétrica de -200m.

A mesma abrange uma área estimada entre 48000 Km<sup>2</sup>, (Bertani *et al.* 1990); e 60000 Km<sup>2</sup>, (Araripe e Feijó 1994); englobando o norte do Estado do Rio Grande do Norte e uma porção do Estado do Ceará. Deste total, cerca de 40% emersos e 60% na plataforma e talude continentais. É a mais oriental das bacias da margem equatorial (Figura 2.1).

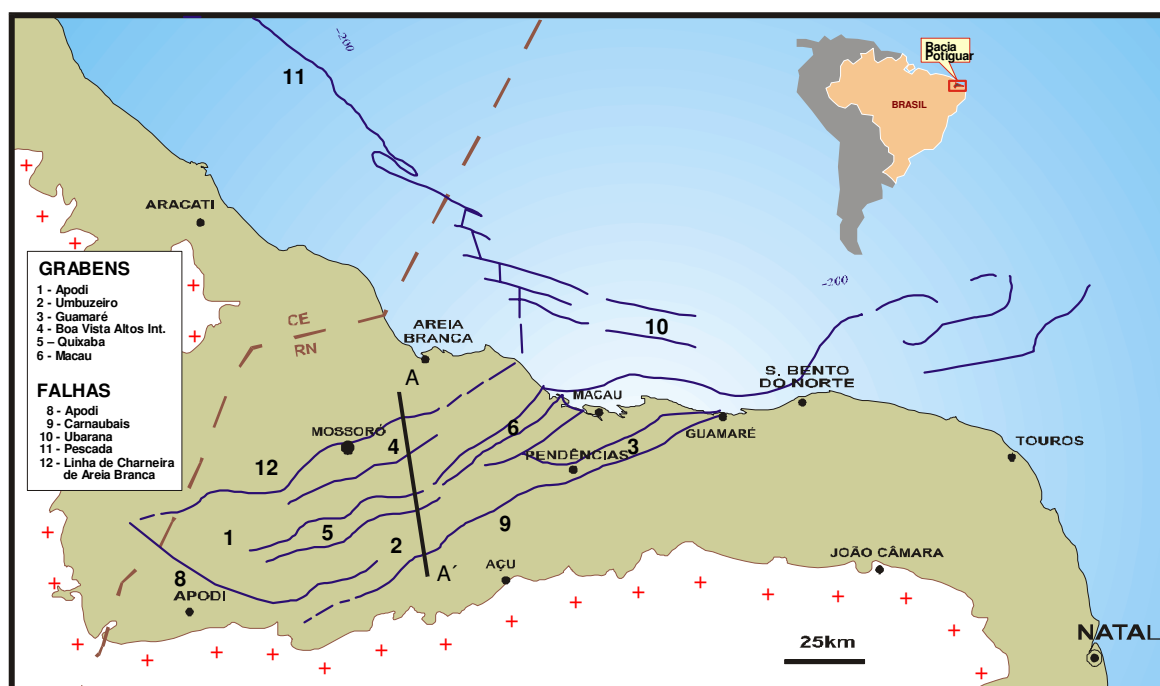


Figura 2.1 - Mapa de localização e arcabouço estrutural da Bacia Potiguar (modificado de Bertani *et al.* 1990).

#### 2.1.1 Evolução Tectono- Sedimentar da Bacia Potiguar.

A origem da Bacia Potiguar esta relacionada com a abertura do Atlântico Sul, (Matos 1987, Françolin e Szatmari 1987). Este evento corresponde ao mesmo que caracterizou a instalação das bacias do Recôncavo, Tucano, Jatobá, Rio do Peixe, Araripe e Sergipe-Alagoas. Estas bacias, juntamente com a Bacia Potiguar, compõem o "Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro", Matos (1987).

Vários modelos evolutivos têm sido propostos, diferenciando-se em geral, pela orientação dos esforços e dos mecanismos que atuaram na época de sua formação. Françolin e Sztamari (1987) utilizam o modelo de rotação horária da placa sul-americana em relação à africana, em torno de um pólo situado a sul de Fortaleza, para explicar a separação América do Sul - África, envolvendo esforços compressivos e distensivos. Estes autores propuseram que as primeiras manifestações da separação Brasil-África ocorreram no Jurássico Superior com movimentação divergente de direção leste-oeste. Esta movimentação possibilitou a implantação de uma fratura de milhares de quilômetros de extensão, que se iniciou no sul do Continente Gondwana e progressivamente alastrou-se em direção ao norte. Durante o Cretáceo Inferior, a movimentação divergente dos dois continentes era maior a sul imprimindo, desta forma, uma rotação horária na placa sul-americana em relação à africana. Como resultado, instalou-se na Província Borborema um processo de compressão a sul e distensão a norte. No Neocomiano, toda a Província sofreu uma compressão leste-oeste e uma distensão norte-sul, promovendo reativações de inúmeras falhas e possibilitando a geração da atual porção onshore da bacia. Concomitante a esta tectônica, as falhas de direção NE-SW preexistentes foram reativadas por movimentos transcorrentes dextrais, com movimentação transtensional, em seu extremo NE, e transpressional na sua porção SW.

O limite entre os regimes transpressional e transtensional é marcado pelo Magmatismo Ceará-Mirim, de direção E-W. As falhas de direção NW-SE são pouco representativas no Neocomiano, enquanto que as de direção NE-SW são as mais importantes, pois condicionaram a abertura do Rifte Potiguar e têm como representante principal a Falha de Portalegre- Camaubais, que propiciou a formação e delimitou o Gráben Pendência. Segundo Bertani *et al.* (1990), foram depositados neste momento a Sequência Rife, preferencialmente fluvio-lacustre, caracterizada por folhelhos siltitos e arenitos finos, passando no topo para arenitos grossos e conglomerados, estando estes incluídos na Formação Pendências, Matos (1987).

Durante o Aptiano, a Província Borborema esteve submetida a uma distensão de direção norte-sul, e sob esse novo regime de esforços, interromperam-se a movimentação transcorrente dextral das falhas NE-SW e a sedimentação na porção *onshore* da Bacia. Prosseguia, entretanto, o rifteamento através das falhas de direção leste-oeste e a

sedimentação da porção submersa da Bacia Potiguar. Nesta fase, segundo Bertani *et al.* (1990), e que ocorreram as reativações dos altos internos, culminando com a extensa discordância regional de caráter erosional e angular, a deposição com subsidência contínua, na porção *offshore* e a instalação da seqüência transicional. Posteriormente foi depositada a Formação Alagamar, caracterizada por folhelhos e carbonatos lagunares restritos com influência marinha. No Albiano, a movimentação entre os continentes sul-americano e africano (E-W), permitiu a entrada do mar, causando transgressão marinha, e posteriormente regressão marinha na Bacia Potiguar, (Françolin e Szatmari 1987). Bertani *et al.* (1990) denominaram este processo de seqüência drifte, agrupando as fases transgressiva e regressiva. Segundo estes autores, esta seqüência foi depositada em ambiente deriva continental e sob influência de mar aberto, com subsidência controlada por mecanismos termais e isostáticos. A seqüência transgressiva, de idade aptiana a turoniana, é representada por arenitos fluviais grossos a médios e sobreposta por folhelhos transicionais a marinhos e carbonatos de plataforma rasa. Esta seqüência está litoestratigraficamente incluída nas formações Açú, Jandaíra, Ponta do Mel e Membro Quebradas da Formação Ubarana. A seqüência regressiva caracteriza-se por arenitos costeiros, carbonatos de plataforma e folhelhos marinhos rasos a profundos com turbitidos intercalados, incluídos nas formações Tibau, Guamaré e Ubarana.

Após o Campaniano, um evento compressivo de direção norte-sul se faz sentir principalmente nas áreas a oeste da Bacia Potiguar, afetando as bacias Ceará e Barrerinhas. De acordo com Françolín e Szatmari (1987), a Bacia Potiguar sofreu reflexo desta compressão, evidenciado pelo soerguimento da plataforma carbonática da Formação Jandaíra e pela reativação de inúmeras falhas na bacia.

Mais recentemente, Matos (2000) propôs para a Bacia Potiguar, dois estágios principais de evolução: o primeiro relacionado à evolução das bacias de margem leste brasileira e o segundo estágio referente à evolução da Margem Equatorial Atlântica no contexto de uma margem equatorial transformante. A margem leste brasileira foi caracterizada por um longo estágio rifte, que se deu no Neocomiano-Barremiano. A margem equatorial (Aptiano-Albiano-Cenomaniano) tem sua evolução tectônica relacionada a três estágios principais, e sete sub-estágios, controlados cinematicamente pelos limites litosféricos das margens Africana e Sul-Americana, propondo assim uma

subdivisão baseada em seqüências pré, sin e pós desenvolvimento de zonas transformantes equatoriais entre o continente Africano e Sul-Americano, ao invés de caracterizar as tectono- seqüências em pré, sin e pós rifte. Num primeiro estágio teria o início da fragmentação, em condições intracontinentais (fase Sin-Transstração ao invés de sin- rifte), seguidos das fases Sin- transformante e Pós-Transformante (ao invés de pós rifte). A seqüência sin- transformante (parte dela anteriormente classificada com sin-rifte) envolve o período imediatamente posterior ao regime transtraccional intracontinental, quando os limites de ruptura da litosfera passam a ser definidos a partir da focalização da deformação em um sistema de falhas transformantes, subparalelo. Com a fragmentação final dos blocos africanos e sul-americanos e o início da deriva continental, o período pós-transformante caracterizou-se por segmentos tipicamente sob condições de margem passiva, com algumas exceções em função da proximidade espacial de falhas transformantes.

### **2.1.2 Estratigrafia da Bacia Potiguar**

Os primeiros trabalhos sobre a estratigrafia da Bacia Potiguar datam da última metade do século passado. Segundo Araripe e Feijó (1994) o preenchimento sedimentar atual da bacia foi dividido em três unidades litoestratigráficas maiores (Figura 2.2 e 2.3): Grupo Areia Branca, Apodi e Agulha.

O Grupo Areia Branca reúne as formações Pendência, Pescada e Alagamar, separadas por discordâncias, sobrepostas ao embasamento cristalino de forma discordante.

Segundo Souza (1982), a Formação Pendência é constituída por arenitos médios a grossos, com intercalações de folhelhos e siltitos. A Formação Pescada, descrita por Araripe e Feijó (1994), é composta por arenitos médios a finos, com intercalações de folhelhos e siltitos. A Formação Alagamar foi proposta por Souza (1982), para designar arenitos de finos a grossos, folhelhos, calcarenitos e calcilutitos os quais constituem dois membros que encontram-se separados por uma seção de pelitos.

O Grupo Apodi reúne as rochas siliciclásticas da Formação Açú e rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, além das Formações Ponta do Mel e Quebradas.

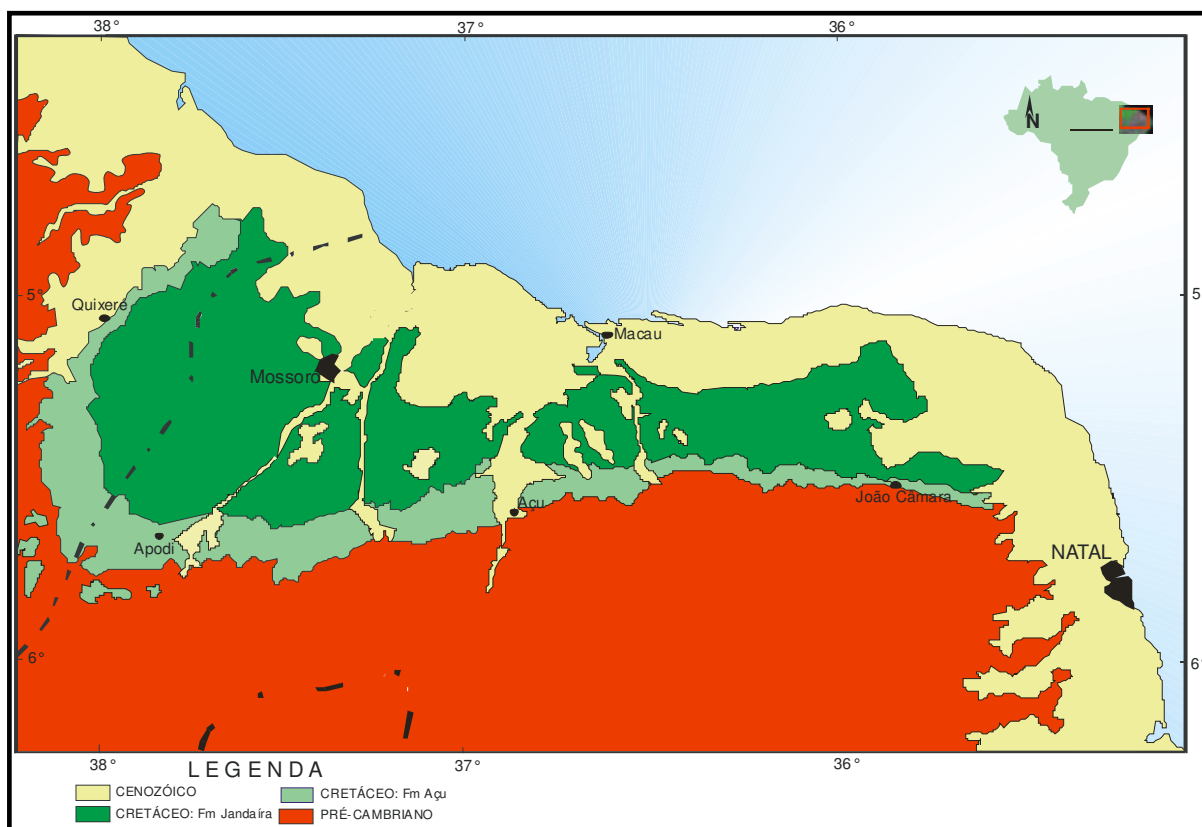


Figura 2.2 Mapa Geológico Simplificado da Bacia Potiguar (modificado de Farias *et al.* 1990).

A Formação Açú, proposta por Kreidler e Andery (1949), é composta por arenitos médios a muito grossos, intercalados com folhelhos, argilitos e siltitos. Estas rochas ocorrem na base de forma discordante e erosiva com o embasamento ou com a Formação Alagamar e raramente com a Formação Pendências. Já na porção superior, o seu contato ocorre com a seqüência carbonática da Formação Jandaíra. A sedimentação da Formação Açú ocorreu no Cretáceo do Albiano a Cenomaniano. A Formação Açú um dos objetivos deste trabalho será mais detalhada ao final deste texto.

A Formação Ponta do Mel definida por Tibana e Terra (1981), é composta por calcarenitos oolíticos, calcilutitos e folhelhos. Encontra-se recoberta discordantemente pelas rochas da Formação Quebradas. A Formação Quebradas proposta por Souza (1982), está composta por arenitos, folhelhos e siltitos.

A Formação Jandaíra definida por Sampaio e Schaller (1968), esta formada por mudstone a grainstones bioclásticos a intraclásticos, com eventuais intercalações de arenitos, folhelhos, margas e evaporitos. As rochas desta formação interdigitam-se com os litotipos basais da Formação Ubarana em direção a parte submersa da bacia. A sedimentação ocorreu no Turoniano a Eocampaniano.

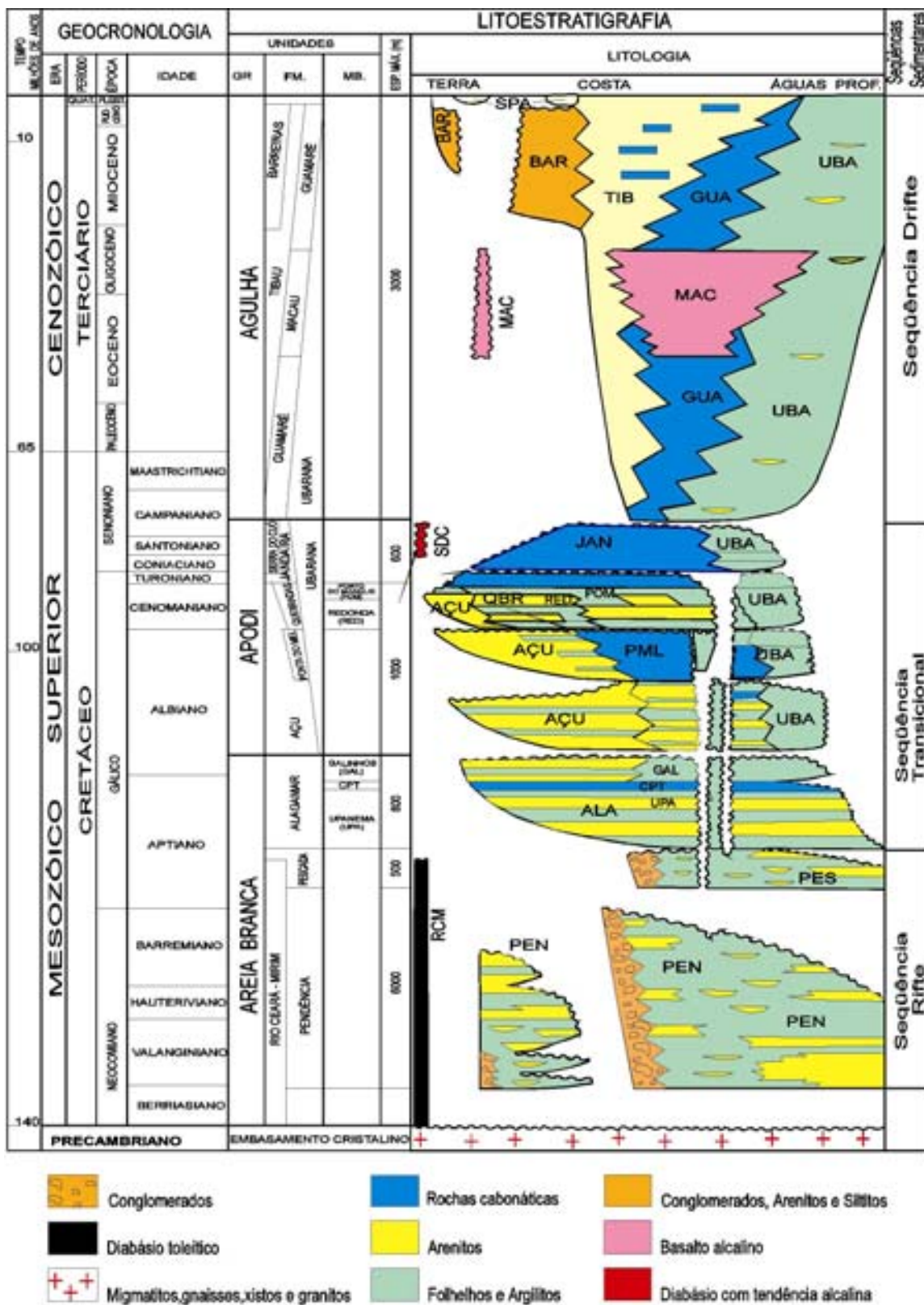


Figura 2.3 Carta Cronoestratigráfica da Bacia Potiguar. (modificado de Araripe e Feijó 1994).

O Grupo Agulha, segundo Araripe e Feijó (1994), é constituído pelas formações Ubarana, Guamaré e Tibau, formadas por rochas clásticas e carbonáticas de alta e baixa energia.

PPGG/CCET/UFRN

A Formação Ubarana, definida por Mayer (1974), é constituída de folhelhos e argilitos, arenitos grossos a muito finos, siltitos e calcarenitos. A sedimentação ocorreu desde o Albiano até o Holoceno. A Formação Guamaré, definida por Souza (1982), é caracterizada por calcarenitos bioclásticos e calcilutitos. Sua sedimentação tem idade desde o Eocampaniano até o Holoceno. A Formação Tibau, proposta por Silva (1966) é composta por arenitos grossos, interdigitados lateralmente com as formações Guamaré e Barreiras. A sedimentação desta formação tem idade do Neocampaniano até o Holoceno.

Segundo Araripe e Feijó (1994) os litotipos dos três grupos, acima descritos, são separados por discordâncias de magnitude regional associadas a três eventos: 1) magmatismo Rio Ceará-Mirim com 120 a 140 Ma, Projeto RadamBrasil 1981, presente na borda da bacia sob a forma de diques de diábase toleítico orientados na direção Este-Oeste; 2) magmatismo Serra do Cuó com 83 a 6 Ma; Mizusaki (1993), ocorre na serra de mesmo nome, sob a forma de diques e soleiras de diábase intrudidos na base da Formação Açú, foi estudada inicialmente por Lima Neto (1985) e; 3) magmatismo Macau: 29 a 45 Ma; Mizusaki (1987). Definida por Mayer (1974) para designar os derrames basálticos de idade Eocênico-Holigocênico, intercalados com sedimentos terciários das formações Ubarana, Tibau, Guamaré e Agulha. Mizusaki (1987), identificou basaltos, diábases e rochas vulcanoclásticas pertencentes a este evento magmático, classificando-os em fácies de lava, brecha e hialoclastitos

## 2.2 FORMAÇÃO AÇU

Definida por Kreidler e Andery (1949), foi formalizada por Sampaio e Schaller (1968), para designar os arenitos finos a grossos, intercalados com folhelhos, argilitos e siltitos, os quais sobrepõem-se discordantemente a Formação Alagamar e interdigitam-se lateralmente com as rochas das Formações Ponta do Mel e Quebradas, e estão sotopostos concordantemente com as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra.

A partir da análise de perfis elétricos, descrição de afloramentos e testemunhos, as rochas da Formação Açú são classificadas informalmente em quatro unidades, denominadas de Açú I a Açú IV, associadas respectivamente aos sistemas deposicionais leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e meandantes, e estuarino, (Vasconcelos *et al.* 1990).

A unidade operacional Açu 1 que constitui a porção basal da Formação Açu é representada por arenitos grossos e conglomerados sendo interpretados como depositados em um sistema deposicional do tipo leque aluvial (Vasconcelos *et al.* 1990).

A unidade Açu 2 encontra-se em contato com as unidades Açu 1 e Açu 3. Litologicamente é constituída por arenitos grossos a finos, siltitos e folhelhos, além de calcarenitos e calcilutitos intercalados. Sua porção basal é, em geral formada por um arenito grosso, refletindo uma deposição de um sistema fluvial entrelaçado. Os corpos arenosos possuem maior espessura na base, e diminui para o topo. Este afinamento coincide com um incremento de intercalações argilosas, caracterizando uma mudança do sistema fluvial entrelaçado para um sistema fluvial meandrante (Vasconcelos *et al.* 1990).

A unidade Açu 3 é caracterizada por arenitos grossos a finos, siltitos e folhelhos, sendo os arenitos mais espessos e grossos na base e diminuindo para o topo, onde a argilosidade aumenta (Vasconcelos *et al.* 1990). Segundo este autor, o sistema deposicional interpretado para estes litótipos é um tipo híbrido envolvendo características do sistema fluvial entrelaçado e do meandrante. Outros trabalhos importantes relacionados com esta unidade são os desenvolvidos por Becker *et al.* (1992); Lanzarini (1995); Barton *et al.* (1995); e Menezes *et al.* (2002).

A unidade operacional Açu 4 corresponde à porção superior da Formação Açu. É caracterizada por arenitos médios a muito finos, argilitos, folhelhos, siltitos, e eventualmente, calcilutitos e margas dolomitizados. O sistema deposicional desta unidade representa a implantação de um sistema litorâneo estuarino com desenvolvimento de ilhas barreiras, cortadas por canais de maré com laguna na retaguarda (Vasconcelos *et al.* 1990; Córdoba, 2001). O Membro Mossoró, equivalente ao Açu 4, foi estudado em detalhe por Castro (1992), o qual propõe quatro sistemas deposicionais: fluvial meandrante, planície deltáica, planície de maré e marinho raso. Bagnoli (1992), estudando os arenitos do mesmo membro localizados no Campo de Canto do Amaro identificou também canais de maré, planície de maré, laguna, delta e pântanos desenvolvidos durante um período de subida do nível relativo do mar com linha de costa com direção de NE-SO. Trabalhos importantes relacionados com esta unidade são os desenvolvidos por Castro e Barrocas (1981); Bagnoli e Farias (1989); Farias *et al.* (1990); Bagnoli (1992); e Reyes *et al.* (2002).

### 2.3 FORMAÇÃO JANDAIRA.

A Formação Jandaíra definida por Sampaio e Schaller (1968), dispõe-se de forma concordante sobre as rochas da Formação Açú. Córdoba (2001) reconhece vinte fácies deposicionais, englobadas em três grupos: fácies carbonáticas, fácies mistas e fácies siliciclásticas. As fácies carbonáticas foram subdivididas em três associações: 1) fácies de águas rasas e semi-restritas, 2) fácies de águas intermediárias, e 3) fácies de águas profundas.

Estudos paleontológicos e bioestratigráficos de interesse relacionados com a Formação Jandaíra são os de Regali *et al.* (1974); Oliveira (1980); Regali e Gonzaga (1985); Wanderley (1987); Viviers e Regali (1987); Viviers *et al.* (1992); e Wanderley (1996). Estudos faciológicos e estratigráficos de interesse são os de Moeri (1979); Matsuda (1988); Matsuda e Viviers (1989); Monteiro e Farias (1990); Silva *et al.* (1994); Bagnoli *et al.* (1994); Córdoba *et al.* (1994); Apoluceno (1995); Córdoba e Cruz Júnior (1996); Gil (1997); Córdoba e Castro (1998) e Córdoba (2001).

### 2.4 TUFAS CARBONÁTICAS E TRAVERTINOS

As tufas distinguem-se dos travertinos por se originarem em águas com a temperatura ambiente, enquanto os travertinos têm origem em águas termais, apesar de em alguns artigos serem definidas as tufas como variedade porosa do travertino, por exemplo Pentecost (1996).

No presente trabalho serão empregadas as classificações de Pedley (1990), e Ford e Pedley (1996), onde o termo “Tufa” é usado para denominar as variedades de depósitos calcários que não tenham origem hidrotermal e que contenham bactérias, plantas ou animais, sem levar em consideração seu grau de cristalização ou idade. Podem se formar sob condições climáticas diversas, desde águas frias até em climas semi-áridos.

A denominação "tufa" deriva de *tophus*, termo originado em tempos romanos, para descrever materiais porosos, tanto calcários como também vulcânicos. Atualmente, é usado apenas para depósitos carbonáticos originados pela precipitação de carbonato de cálcio em águas continentais, (Ford e Pedley 1996).

O termo travertino segundo Challinor's Dictionary of Geology, (Charles Lyell citado em Ford e Pedley 1996) é de origem italiano, constituindo uma derivação de *lapis*

*tiburinus*, a “pedra de Tibur”. Outra interpretação da origem do nome é sugerida por Julia (1983), que propõe que o nome é derivado de Tivertino, nome antigo da atual cidade de Tivoli na Itália. O afloramento Bagni di Tivoli (“Termas de Tivoli”), situado a 30 km a leste de Roma, é conhecido a mais de 2000 anos. Os travertinos originam-se em águas termais e não apresentam nenhum vestígio de plantas ou animais, apenas da presença de atividade microbiana, principalmente microorganismos tolerantes ao calor como, por exemplo, as diatomáceas, (Folk 1993; Guo e Riding 1994).

Em geral o desenvolvimento de tufas e travertinos está associado a fenômenos cársticos e controlados por fatores morfotopográficos (Ordoñez *et al.* 1986; Heiman e Sass, 1989), hidrogeológicos (Ordoñez e Garcia del Cura, 1983), hidroquímicos (Herman e Lorah 1987; Lorah e Herman 1988), biológico (Weijermars *et al.* 1986) e climático (Hening *et al.* 1983; Pazdur *et al.* 1988, Magnin *et al.* 1991).

Os processos de formação das tufas e travertinos são detalhados em Ford e Pedley (1996), e de forma resumida em Sancho *et al.* (1997). Neste último explica-se como as atuações conjuntas dos vários fatores já mencionadas originam a precipitação bioquímica da calcita. Esta precipitação é regulada pelo conteúdo de CO<sub>2</sub>, o qual é controlado fisicamente pela pressão e temperatura, e bioquimicamente pela fotossíntese (Julia 1983; Viles e Goudie 1990).

O grau de dureza não diferencia as tufas dos travertinos, podendo ocorrer tufas endurecidas assim como travertinos friáveis. O principal critério de campo para diferenciar um depósito de outro é a presença de vestígios de macrófitas, plantas e de animais, característica esta restrita às tufas, (Ford e Pedley 1996).

Algumas estimativas sobre a espessura de deposição das tufas por ano tem sido realizadas em diferentes regiões do mundo. Viles e Goudie (1990) consideram que a mesma pode variar de 1-500 mm, dependendo dos fatores ambientais assim como dos processos erosivos que possam afetá-lo.

Depósitos que podem ser encontrados conjuntamente com as tufas e travertinos são os calcretes e espeleotemas, (Ford e Pedley 1996). Calcretes é a denominação empregada para os depósitos associados com processos pedogenéticos de substituição. Watts (1980), os define como materiais superficiais compostos dominantes, mais não exclusivamente, de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), e sua origem esta relacionada

principalmente com a incorporação do  $\text{CaCO}_3$ , em maior ou menor quantidade no solo, rocha ou sedimento de um perfil de solo. Uma excelente revisão sobre os calcretes pode ser encontrada nos trabalhos de Esteban e Klappa (1983), e Wright e Tucker (1991). Espeleotema é a denominação para os depósitos originados em cavernas pela precipitação físico-química do carbonato de cálcio, na forma, de estalactites e estalagmites, que raramente contém algum material de origem biológica.

#### **2.4.1 Tufas no Brasil e no Mundo**

A maior parte dos depósitos de tufas estudados no mundo encontra-se concentrado na Europa e Ásia (Ford e Pedley 1996; Pentecost 1996; Andrews *et al.* 1997); mais eles podem ser encontradas na África, América do Sul e do Norte. No trabalho de Pentecost, (1996) é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os afloramentos conhecidos na Europa e Ásia Menor. Ford e Pedley (1996), fazem uma revisão dos principais afloramentos conhecidos no mundo citando os trabalhos mais relevantes.

No Brasil, podem ser mencionados os trabalhos de Duarte e Vasconcelos (1980a e 1980b) onde são descritas tufas com fósseis de vegetais bem preservados nos estados da Paraíba e Ceará. No norte da Bahia na região de Laje dos Negros-Abreus, Auler e Smart, (2001); dataram travertinos, que pela descrição apresentada no trabalho pode corresponder a tufas calcárias. Na Serra da Bodoquena, estado de Mato Grosso do Sul, Ribeiro *et al.* (2001) estudaram tufas empregando métodos de espectrometria de raios-gama. Na região de Quixeré no Ceará pode ser mencionado o trabalho submetido a IX Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos por Reyes *et al.* (2003) no qual os autores fazem o primeiro reporte de tufas calcárias na Bacia Potiguar e realizam um estudo sobre as falhas de gravidade que afetam estes depósitos.

### **III- DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO:**

A metodologia aqui utilizada foi sintetizada em cinco etapas principais que envolvem desde o levantamento bibliográfico; a seleção das áreas de trabalho; a escolha dos afloramentos, aquisição e tratamento de dados; a análise e interpretação dos dados; até a redação final desta dissertação (Figura 3.1). São descritas abaixo as etapas desenvolvidas e fornecido um breve resumo sobre as principais técnicas e métodos utilizados neste trabalho.

#### **3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A primeira etapa consistiu numa revisão bibliográfica sobre todos os assuntos abordados nesta dissertação, sendo realizada de forma contínua durante todo o desenvolvimento do trabalho e só concluída com o encerramento da presente dissertação. Ao longo do trabalho foram realizadas pesquisas na internet, na busca de trabalhos e/ou artigos de autores nacionais e internacionais, em *sites* de outras instituições de ensino superior e de revistas especializadas, além da Biblioteca Setorial do Departamento de Geologia “Prof. Leon Diniz”.

#### **3.2. SELEÇÃO DAS ÁREAS DE TRABALHO**

Na segunda etapa foram empregadas imagens do sensor Landsat TM-7, para caracterização geológica regional e elaboração de mapas geológicos, na escala 1:100 000 e 1:50 000, para delimitação das áreas maiores onde o trabalho de busca dos afloramentos foi realizado.

##### **3.2.1 ANÁLISES DE IMAGENS DO LANDSAT TM**

A função primordial do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração de informação, Crosta (1993).

O LANDSAT foi o primeiro satélite de sensoriamento terrestre, não tripulado, a ser posto em órbita da Terra. Uma de suas aplicações fundamentais é na elaboração de mapas geológicos, cuja escala pode variar de 1:50 000 a 1: 250000 (Crosta e Moore 1989, Drury 1993, Nalbant e Alptekin 1995, Woldai 1995, Van der Meer *et al.* 1997).

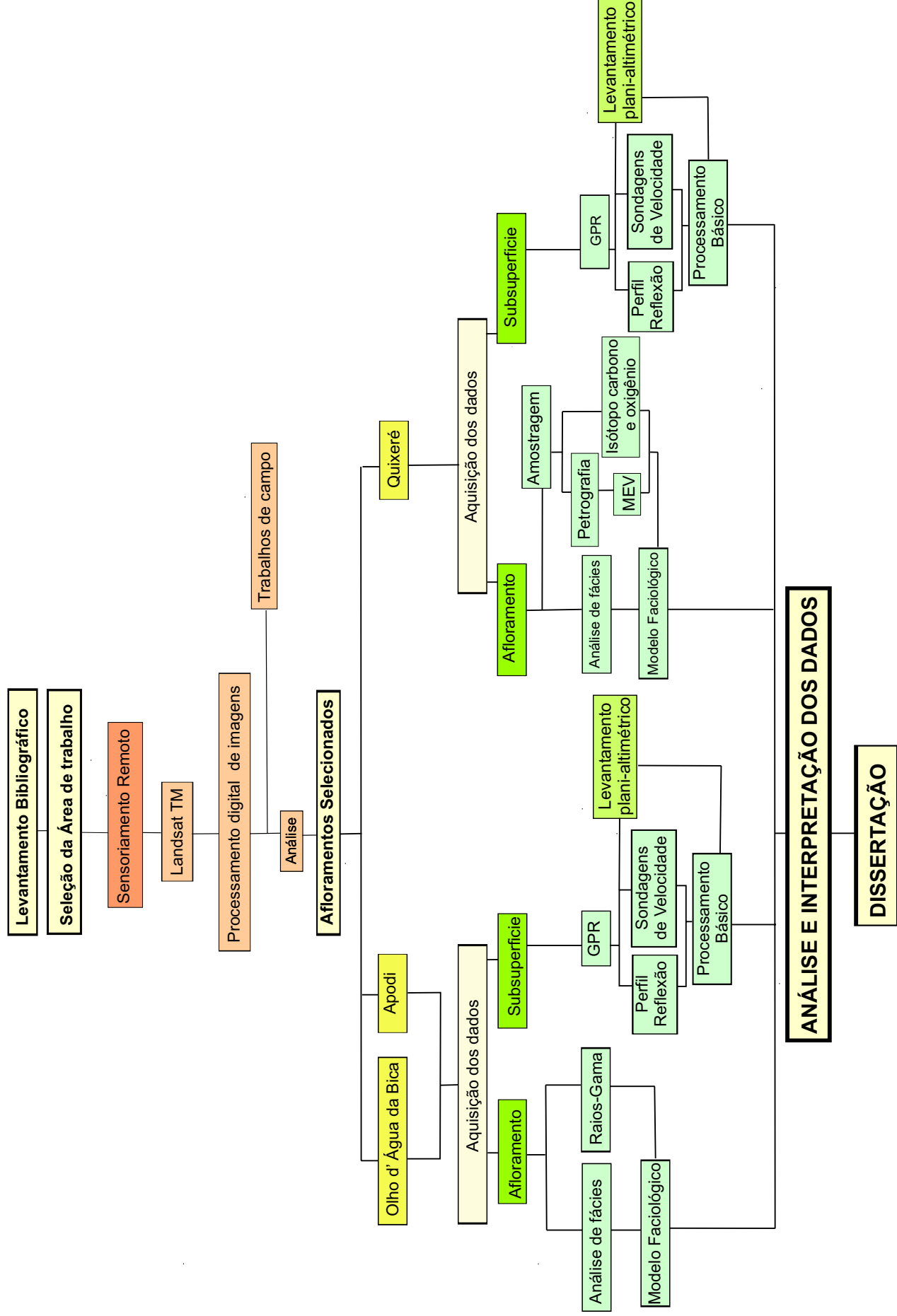


Figura 3.1 Fluxograma mostrando as etapas metodológicas desenvolvidas

As regiões semi-áridas do nordeste brasileiro, com pouco intemperismo e cobertura vegetal de caatinga, apresentam condições que favorecem este tipo de trabalho. Isto acontece devido à boa reflexão da radiação eletromagnética coletada pelo sensor, que fornece informações diretas do conjunto solo-rocha, permitindo assim uma boa discriminação litológica com base na resposta espectral.

Neste estudo foram empregadas imagens do satélite LANDSAT TM-7 com órbita/ponto: 216/64, obtidas em 13 de agosto de 1999, com nível 1G e bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 e 8, sendo esta última pancromática, com resolução espacial de 15m.

Para o processamento digital de imagens foi empregada a versão 3.6.01 do *software* SPRING. Este software é um SIG, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais, fornecendo um ambiente unificado de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (Câmara *et al.* 1996).

O procedimento seguinte foi a leitura de imagens com módulo IMPIMA (conversão das imagens de formato TIFF a arquivo GRID o \*.grd do SPRING; Figura 3.2), registro da imagem através de pontos de controle adquiridos pelo teclado, contraste das imagens, composições coloridas, análise por componentes principais e aplicação de transformação IHS (componente intensidade, matiz e saturação).

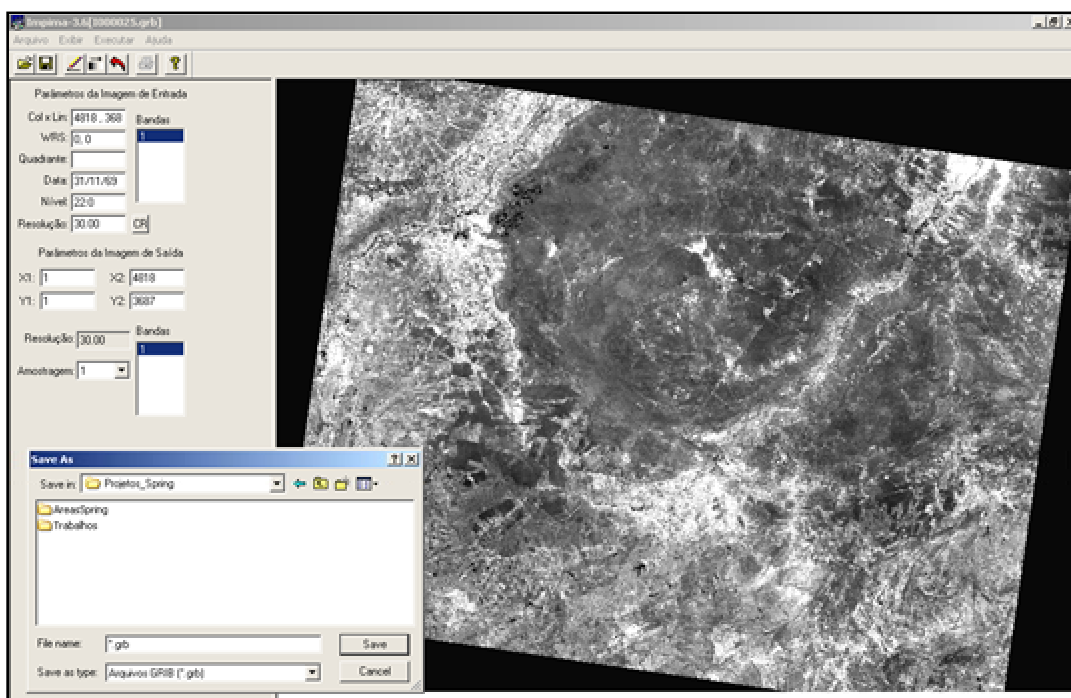


Figura 3.2 Leitura de imagens de área de estudo no módulo IMPIMA para conversão a formato \*.grd do SPRING.

Para o registro da imagem (Figura 3.3), foram empregados pontos de controles, obtidos em cartas topográficas da SUDENE, na escala 1: 100 000. Os pontos de controle são localizados em feições passíveis de identificação na imagem e no terreno, ou seja, feições homólogas cujas coordenadas são conhecidas na imagem e no sistema de referência. Posteriormente, com emprego de transformações polinomiais do 2º grau, um sistema de equações  $2n$  foi montado. Com as transformações polinomiais são gerados vínculos entre as coordenadas de imagem e as coordenadas no sistema de referência, incorporados através dos pontos de controle, empregando a reamostragem por interpolação. Neste trabalho emprega-se o “Método do Vizinho Próximo” o qual preserva o valor original do número digital, Crosta (1993).

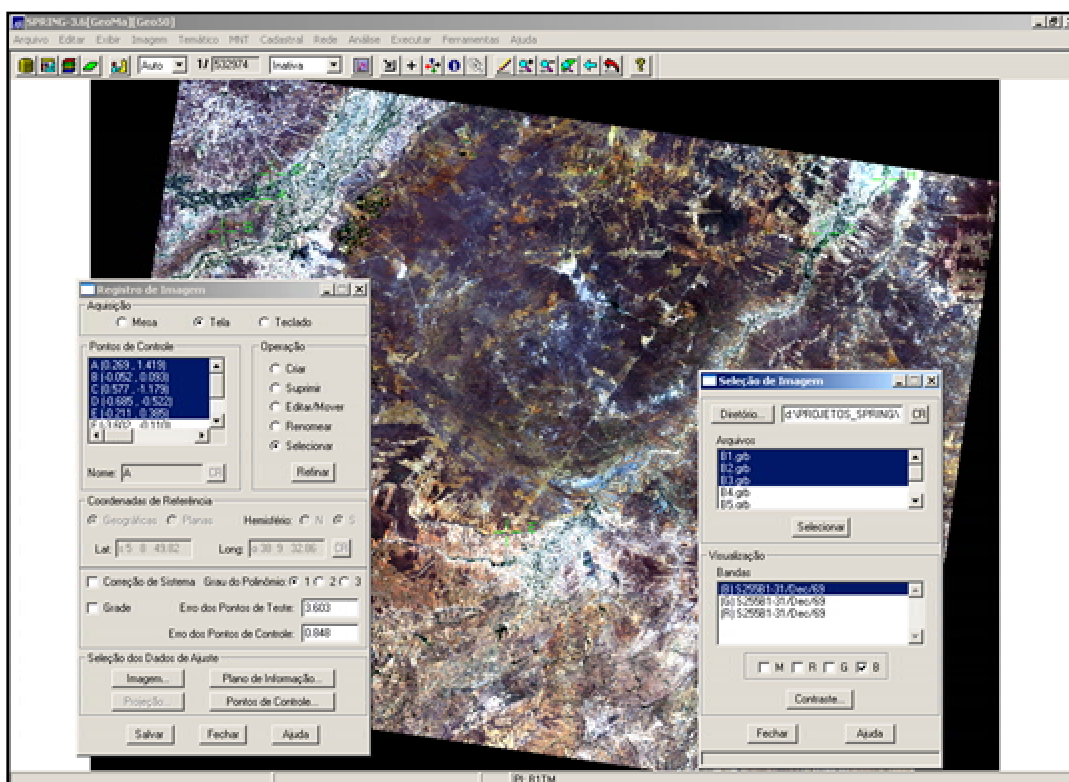


Figura 3.3 Registro de imagens da área de estudo empregando o *software* SPRING.

A técnica de realce de contraste tem por objetivo melhorar a qualidade das imagens. O **contraste** entre dois objetos pode ser definido como a razão entre os seus níveis de cinza médios, Drury (1993). A manipulação do contraste consiste numa transferência radiométrica em cada "*pixel*", com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Esta operação é realizada ponto a ponto, independentemente da vizinhança. Para transferência radiométrica é utilizada a ajuda de histogramas, que são manipulados para obter o realce desejado.

As composições coloridas RGB mais adequadas para a interpretação das diferentes litologias presentes na área são: a 752 para ressaltar os depósitos recentes, os quais tem uma coloração mais clara e uma textura mais rugosa; as 542 e 432, com contraste de raiz quadrada, para delimitar o embasamento assim como as áreas ocupadas por calcário e áreas onde afloram rochas siliciclásticas da Formação Açú (Figura 3.4).

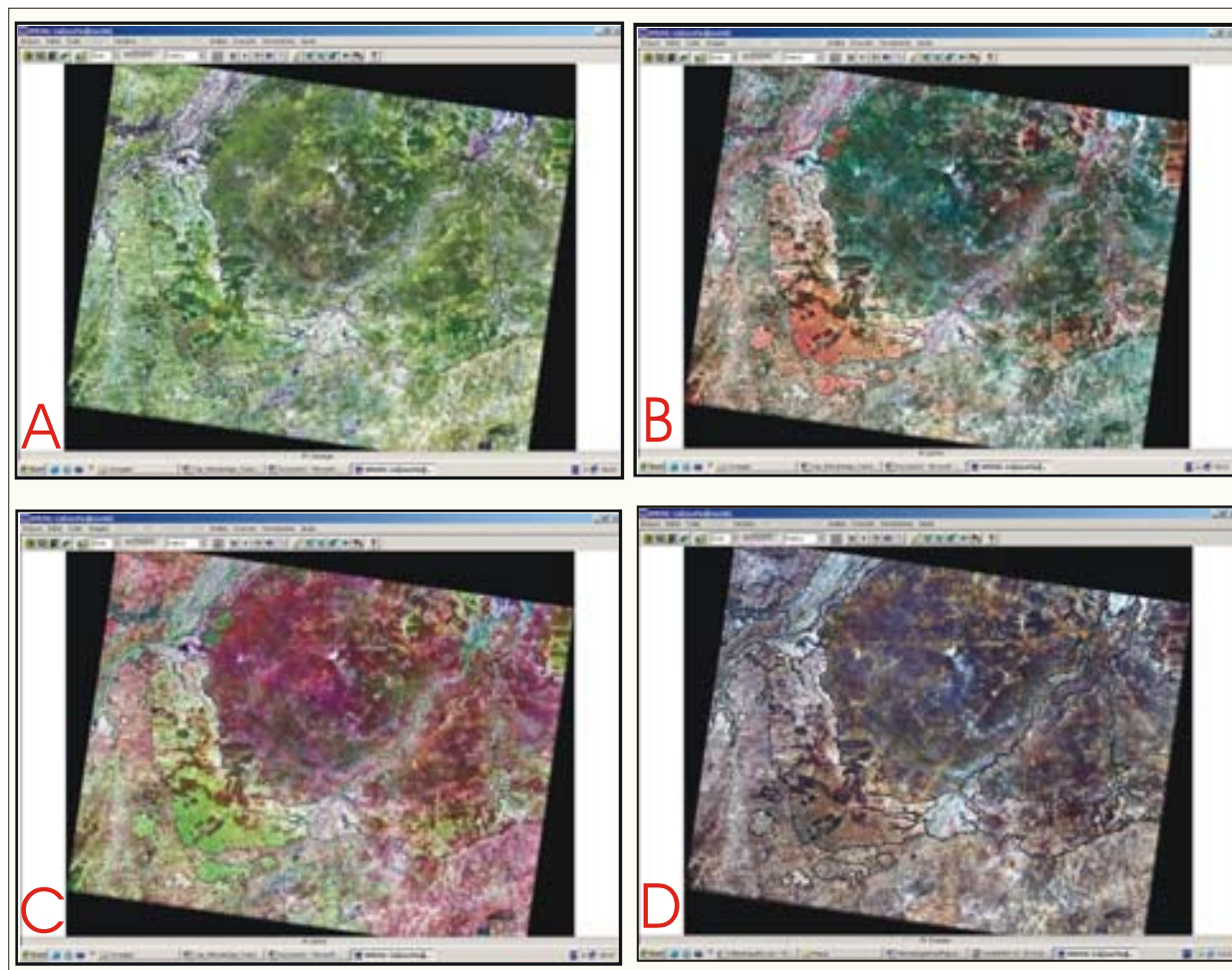


Figura 3.4 Composições coloridas da área de estudo. A- RGB (752) B- RGB (542) C- RGB (432) D- RGB (321) com interpretação geológica.

As técnicas antes descritas no tratamento das imagens do Landsat TM-7 permitiram a elaboração do mapa litoestratigráfico da área estudada na escala 1: 100 000 (Figura 3.5). O sistema empregado para traçar os limites foi de digitação na tela do monitor empregando as ferramentas vetoriais do Spring. Na elaboração deste mapa, além das interpretações das imagens, foram empregadas informações obtidas durante as etapas de campo desta dissertação, bem como mapas elaborados por estudantes e professores do Departamento de Geologia da UFRN.

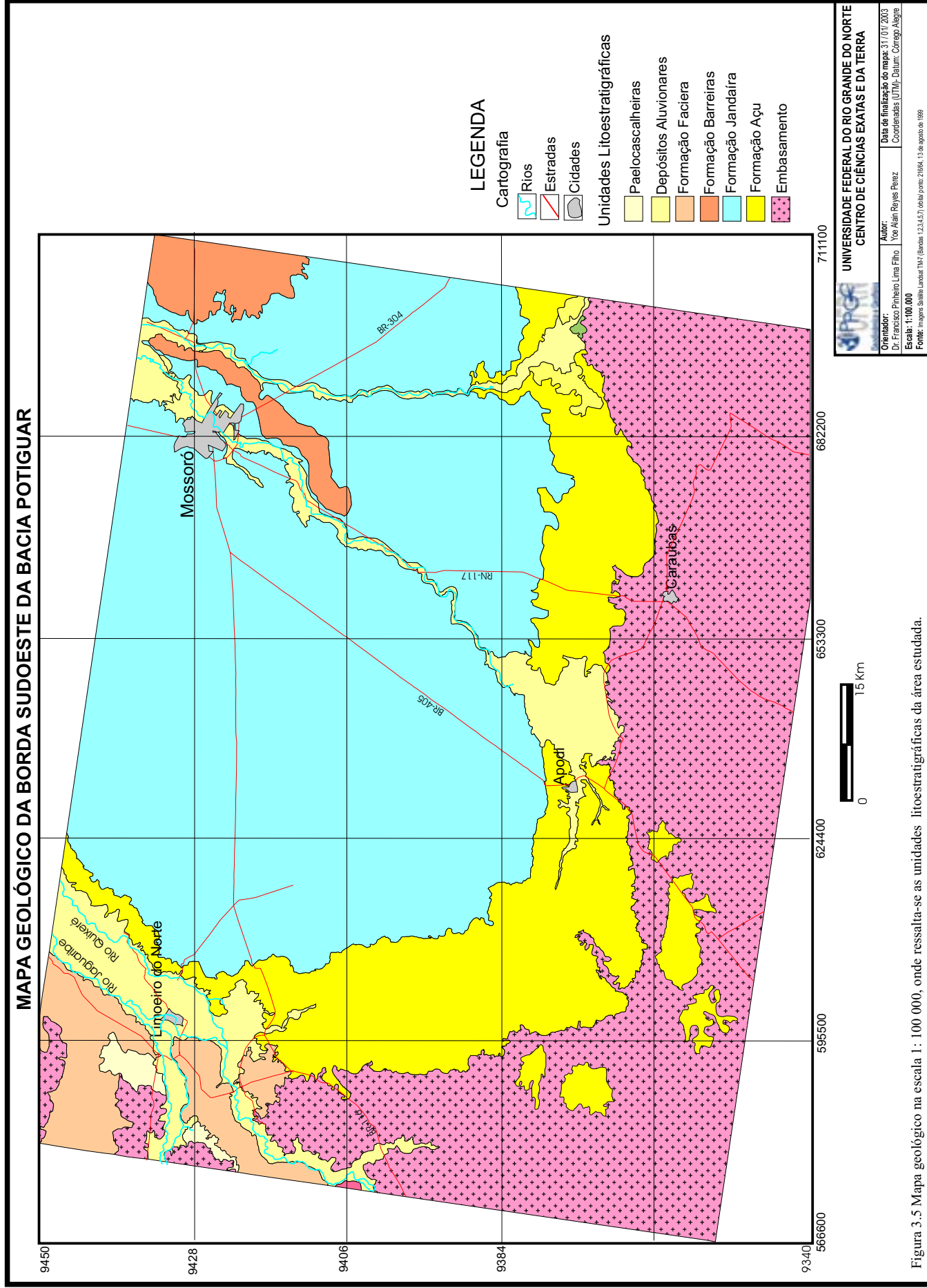


Figura 3.5 Mapa geológico na escala 1 : 100 000, onde resalta-se as unidades litoestratigráficas da área estudada.

A transformação dos componentes vermelho, verde, azul (RGB) no componente intensidade, matiz e saturação (IHS) foram utilizadas no presente trabalho para produzir composições coloridas com reduzida correlação interbanda. Conseqüentemente, com melhor utilização do espaço de cores e combinação de diferentes tipos de imagem ou imagens de diferentes sensores. Estas transformações são feitas através de algoritmos matemáticos que relacionam o espaço RGB ao IHS (Crosta 1993, Lillesand e Keifer, 1994). Para a transformação IHS utilizou-se uma combinação de imagens de diferentes resoluções espacial, imagens do Landsat TM banda 8 (pan-cromático) e demais bandas do Landsat TM. Após a transformação, as imagens coloridas apresentam a resolução espacial da imagem pan-cromática (15 metros) e resolução espectral das três bandas TM. Com as imagens resultantes, e mapas de detalhe elaborados por estudantes e professores do Departamento de Geologia da UFRN (disciplina Geologia de Campo II) bem como trabalhos de campos realizados especificamente com este propósito, foram elaborados os mapas geológicos de detalhes nos afloramentos das regiões de Apodi, Tabuleiro do Norte e Quixeré a escala 1:50 000 (Figura 3.6 A-B-C). A partir destes mapas foram selecionados, na terceira etapa, os afloramentos para estudo de geometria deposicional.

### **3.3. ESCOLHA DOS AFLORAMENTOS, AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS**

A terceira etapa começou com a seleção dos afloramentos onde seriam realizados os estudos de geometria deposicional. Os primeiros afloramentos escolhidos encontram-se nos municípios de Apodi-RN e Tabuleiro do Norte-CE (Figura 3.7 A-B), envolvendo arenitos da Formação Açu (Unidade Açu-4), Bacia Potiguar, depositados sob influência de correntes de maré. Durante o mapeamento, na segunda etapa, foram encontradas tufas calcárias na região de Quixeré-CE (Figura 3.7 C), somente agora descritas na literatura, Reyes *et al.* (2003). Esta descoberta nos levou a ampliação do escopo original do trabalho e inclusão deste afloramento para o estudo de geometria deposicional. Nesta etapa foram adquiridos os dados de campo utilizando-se a mesma metodologia de trabalho dos afloramentos anteriores, para a caracterização das geometrias deposicionais. Entretanto, conforme a necessidade, foram realizados estudos adicionais, específicos para cada tipo de depósito de forma a permitir que outras informações geológicas fossem agregadas à proposta inicial.

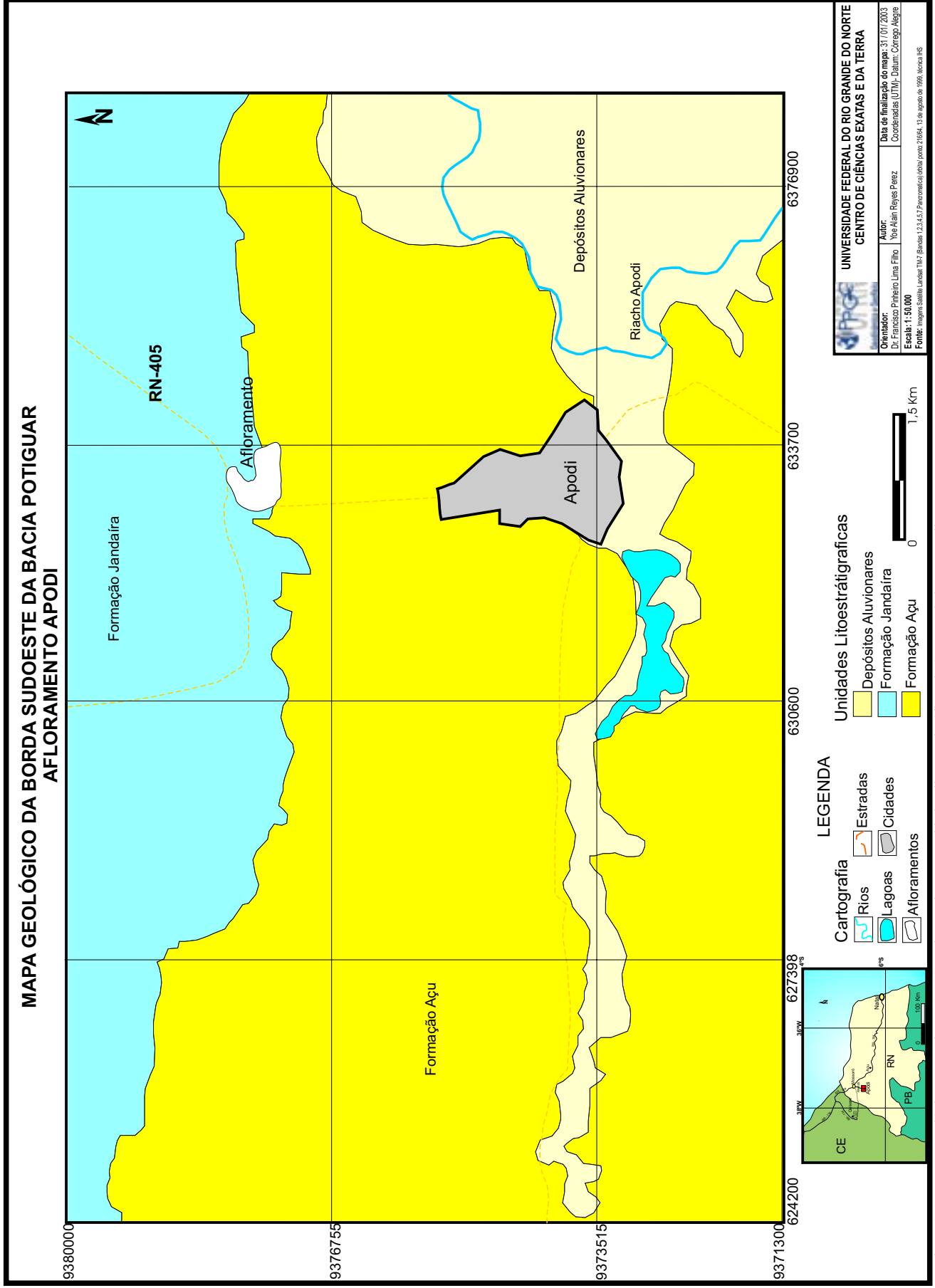


Figura 3.6 A- Mapa geológico na escala 1: 50 000, onde ressalta-se as unidades litoestratigráficas da área estudada em Apodi.

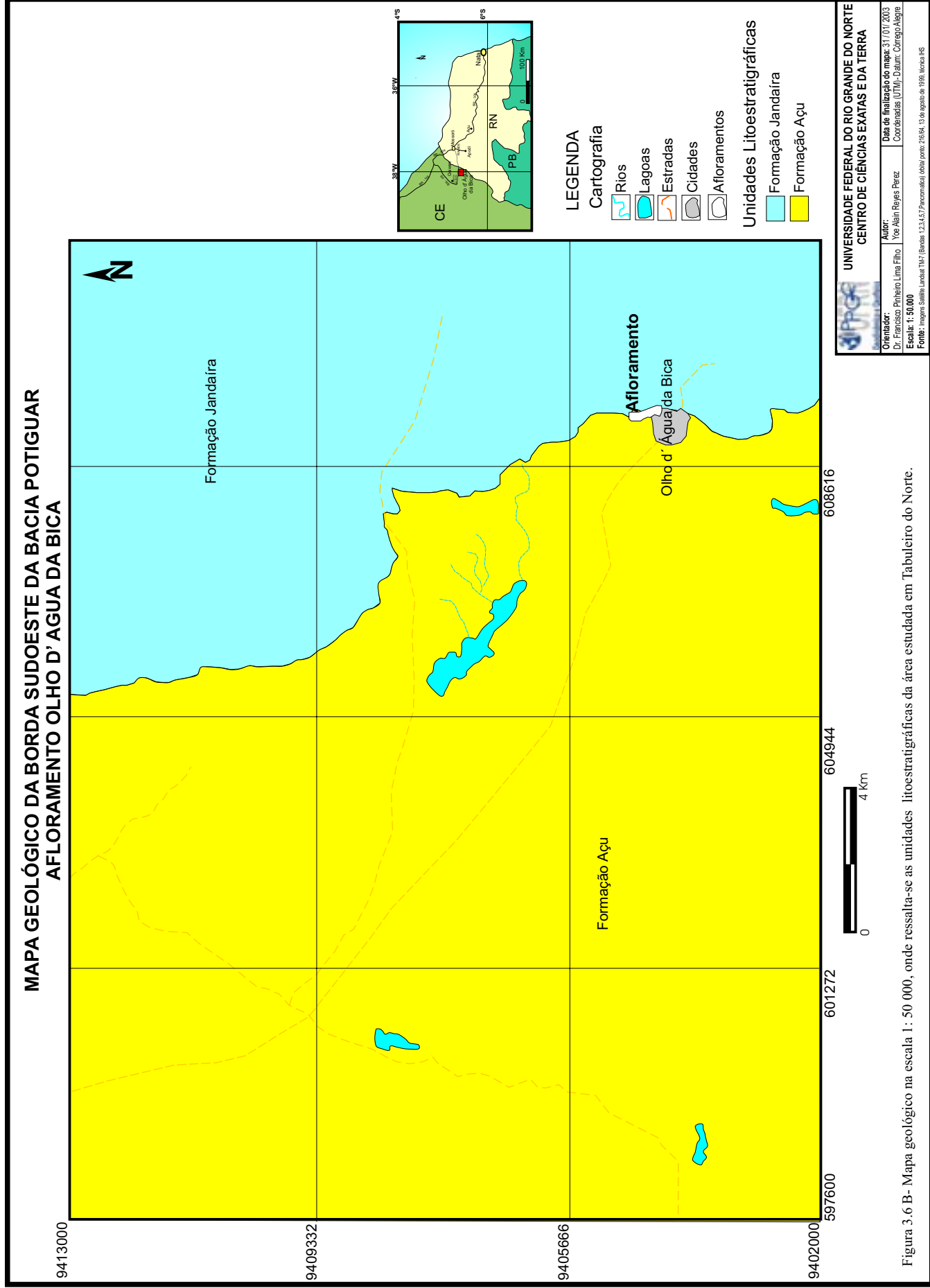
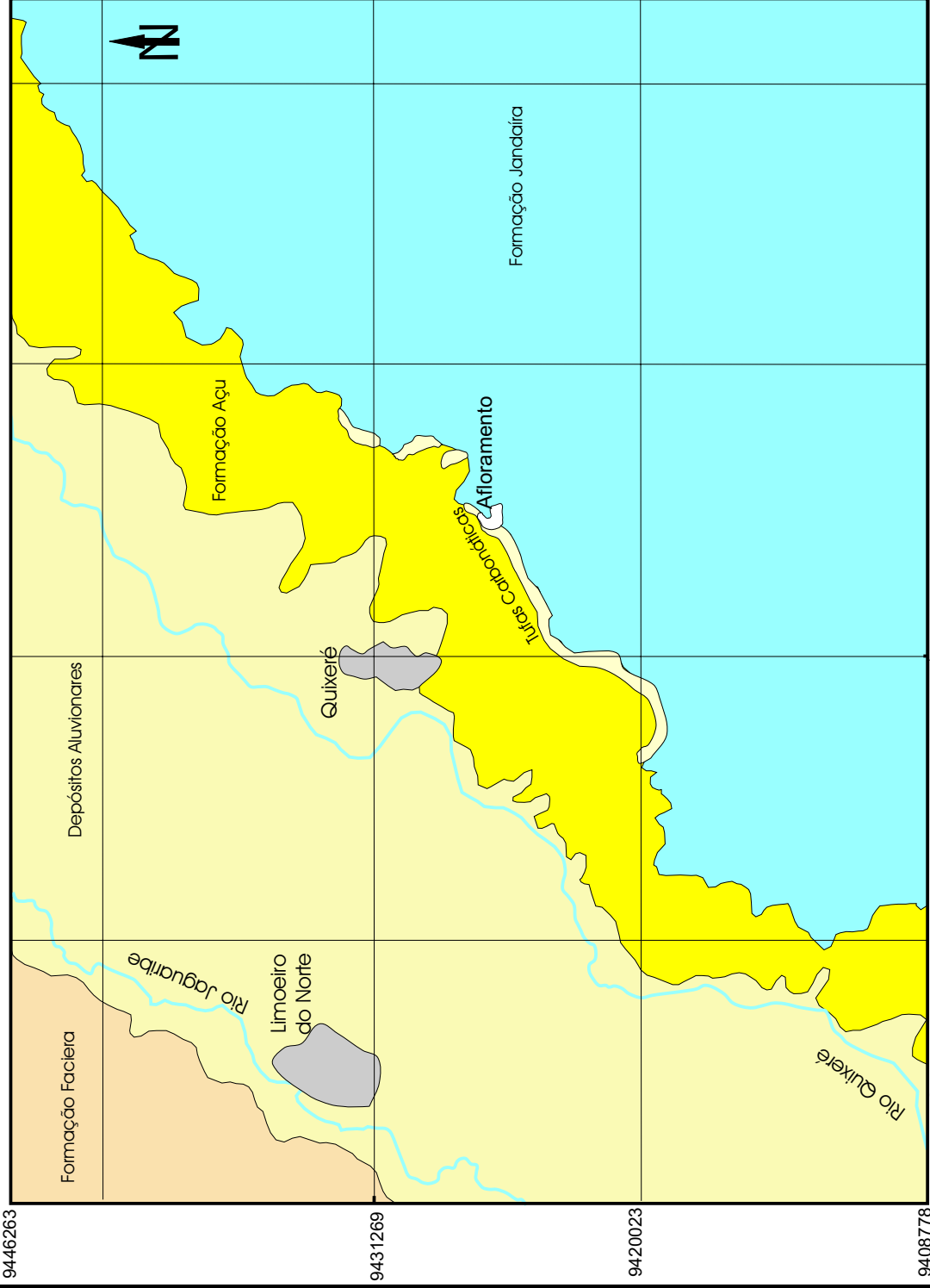


Figura 3.6 B- Mapa geológico na escala 1 : 50 000, onde resalta-se as unidades litoestratigráficas da área estudada em Tabuleiro do Norte.

# MAPA GEOLÓGICO DA BORDA SUDOESTE DA BACIA POTIGUAR AFLORAMENTO QUIXERÉ



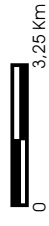
625386

615290

612186

609079

601098



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

Orientador: Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho  
Autor: Yocelain Reyes Perez  
Data de finalização do mapa: 31/07/2005  
Escala: 1:50.000  
Coordenadas (UTM): Datum: Conego/Algebr  
Fonte: Imagem Satélite Landsat TM/ Bordes: 1:23.457 (Procuramos) obtida por: ZIR&A, 13 de agosto de 1999, Noroite HIS

Figura 3.6 C- Mapa geológico na escala 1 : 50 000, onde ressaltam-se as unidades litoestratigráficas da área estudada em Quixeré.



Figura 3.7 Fotos dos afloramentos selecionados.

Estes estudos de caracterização da geometria envolveram duas abordagens diferentes, ambas objetivando a obtenção de informações bidimensionais (2D). Em afloramentos, com o uso de técnicas modernas de mapeamento, e em subsuperfície, a partir de sondagens geofísicas rasa com o Radar de Penetração no Solo (GPR).

Na aquisição dos dados de afloramento foi empregada a técnica de análise de fácies, auxiliada com o levantamento de perfis de raios gama. Esta técnica auxiliar foi aplicada somente nos afloramentos Apodi-RN e Olho d' Água da Bica-CE. Para as rochas carbonáticas foram também realizados estudos petrográficos, com microscopia ótica e com o microscópio eletrônico de varredura, além da análise de isótopos estáveis de carbono e oxigênio.

Para aquisição dos dados de subsuperfície foi utilizado o GPR, auxiliado por levantamentos topográficos para correção altimétrica. O Georadar, como também é conhecido o método de GPR, gera imagens com base no registro do tempo de “viagem” das ondas eletromagnéticas. O trabalho com GPR inicia-se após a escolha dos parâmetros do levantamento (frequência, range, intervalo temporal de amostragem, espaçamento horizontal entre estações, separação entre antenas). Os dados foram adquiridos em forma de perfis de reflexão com afastamento constante e sondagens de velocidade. O levantamento altimétrico foi realizado com uma Estação Total (Marca Trimble modelo 3305DR).

### **3.3.1 DADOS DOS AFLORAMENTOS:**

Nos afloramentos selecionados foram realizadas análises de fácies que consistem na descrição e classificação de um corpo sedimentar, seguida pela interpretação dos processos, do sistema e do ambiente de deposição, geralmente apresentado na forma de um modelo de fácies (Anderton 1985). O procedimento utilizado para realização da análise faciológica deve seguir a seguinte ordem: descrição detalhada; subdivisão em fácies; compilação das características de cada fácies; dedução dos processos deposicionais de cada fácies; exame das relações espaciais entre as fácies e o reconhecimento das associações faciológicas; interpretação do sistema deposicional e ambiente da associação e; modelagem de fácies individual. Walker (1984) enfatiza a necessidade do estudo faciológico sob a ótica holística, como sugerida na lei da Correlação de Fácies de Walther, ou seja; a interpretação genética de uma fácies isolada

oferece menor precisão que a interpretação de várias fácies já descritas e vistas como um conjunto coerente.

Outro conceito empregado no desenvolvimento do trabalho foi o das arquiteturas sedimentares, que também é uma forma de modelar fácies, descrevendo os sistemas em termos de seu arranjo tridimensional (de unidades geomórficas) chamados de elemento arquitetural. Estes elementos arquiteturas são definidos por suas geometria, composição das fácies e escala de trabalho, e são fisicamente separáveis um do outro por superfícies limitantes, as quais caracterizam hierarquias variando de 1<sup>a</sup> até 6<sup>a</sup> ordens, Miall (1985 e 1988).

No afloramento Apodi foram levantadas 04 seções colunares com respectivos perfis de raios gama, montado um arcabouço do afloramento, feitas fotografias e elaborados painéis, que exibem as feições associadas às geometrias deposicionais em escala da ordem de 10 m. No afloramento Olho d' Água da Bica, o mesmo procedimento metodológico foi adotado, entretanto, foi priorizado o estudo da geometria deposicional em escala métrica a sub-métrica. Foi dada ênfase às feições indicativas da ação de correntes de maré.

Em Quixeré, nas tufas calcárias, também foi utilizado o mesmo procedimento para caracterização do afloramento. Foram levantadas oito seções colunares, identificadas as geometrias que limitam estes depósitos, a presença de feições cársticas pretéritas, descritas as feições originadas pela deformação rúptil do calcário e identificado seu campo de tensão.

Os levantamentos fotográficos foram realizados com um distanciamento adequado dos afloramentos de forma a permitir um recobrimento mínimo de 40%, que em alguns casos chegou a 65%. Desta forma, minimiza-se as deformações na borda da fotografia. Para reduzir as distorções foram observadas outras recomendações metodológicas de imageamento propostas por Arnot *et al.* (1997) e Caracuel *et al.* (2000). Empregou-se na aquisição das imagens uma máquina digital Nikon Copix 950, com resolução de 3,2 megapixel para os afloramentos Apodi e Quixeré e uma máquina fotográfica Minolta, tipo reflex, para o afloramento Olho d' Água da Bica. A fotomontagem computacional foi realizada com *software* Corel Photo-Paint v.10. Posteriormente, exportada para o *software* Corel Draw v.10, onde foram feitas as primeiras interpretações. As geometrias identificadas foram traçadas sobre as fotomontagens e impressas em um *ploter* para,

serem novamente observadas nos afloramentos. Em caso de necessidade seriam feitas as últimas correções, *in loco*, nos respectivos afloramentos.

### 3.3.1.1 ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA:

A Espectrometria de Raios-Gama é um método que permite a determinação das concentrações individuais de elementos radioativos, em particular K, U, Th. Desta forma, é possível realizar mapeamentos das rochas em função das concentrações destes elementos radioativos. Esta idéia foi desenvolvida nos inícios da década de 60 e abriu novas possibilidades para seu uso na localização de jazidas minerais (Sikka 1962; Mosham *et al.* 1965 e Groos 1952). Sob o aspecto físico, os raios gama são emanações de ondas eletromagnéticas de alta energia, emitidas espontaneamente pelos elementos radioativos. Ao passar através da matéria estas ondas experimentam sucessivas colisões com os átomos das rochas, perdendo energia e sendo absorvidos.

Informações relacionadas com o desenvolvimento do método da Espectrometria de Raios Gama são encontrados nos trabalhos de Morley (1969); Killeen (1979); Darnley e Ford (1989) e Darnley (1991). Os avanços iniciais deste método estavam relacionados ao desenvolvimento de sistemas mais sensíveis, com o estabelecimento de normas nos procedimentos e calibração dos equipamentos. Mais recentemente foram introduzidos os leitores digitais, houve uma significativa melhoria nos métodos de processamento, foram desenvolvidas técnicas analíticas de espectro total, foram adotados novos procedimentos para normalização e estabelecimento dos princípios e técnicas de pesquisa pela International Atomic Energy Agency.

Estudos de levantamento de dados em afloramentos com espectrômetros de raios gama foram desenvolvidos com sucesso pela *Mineral Resources Division* do *Geological Survey of Canadá* (Shives *et al.* 1997). Dentre outros trabalhos onde este método foi aplicado podem ser citados os de Jordan *et al.* (1991, 1993), Slatt *et al.* (1995), Aigner *et al.* (1995), North e Boering (1999), Svendsen e Hartley (2001).

No presente trabalho foi utilizado o espectrômetro portátil de raios gama GR-320 enviSPEC da *Exploranium Radiation Detection Systems*. Foram medidas as concentrações individuais do K, U, Th bem como os valores de contagem total (Figura 3.8 A-B-C). Este método foi empregado nos afloramentos Apodi e Tabuleiro do Norte.

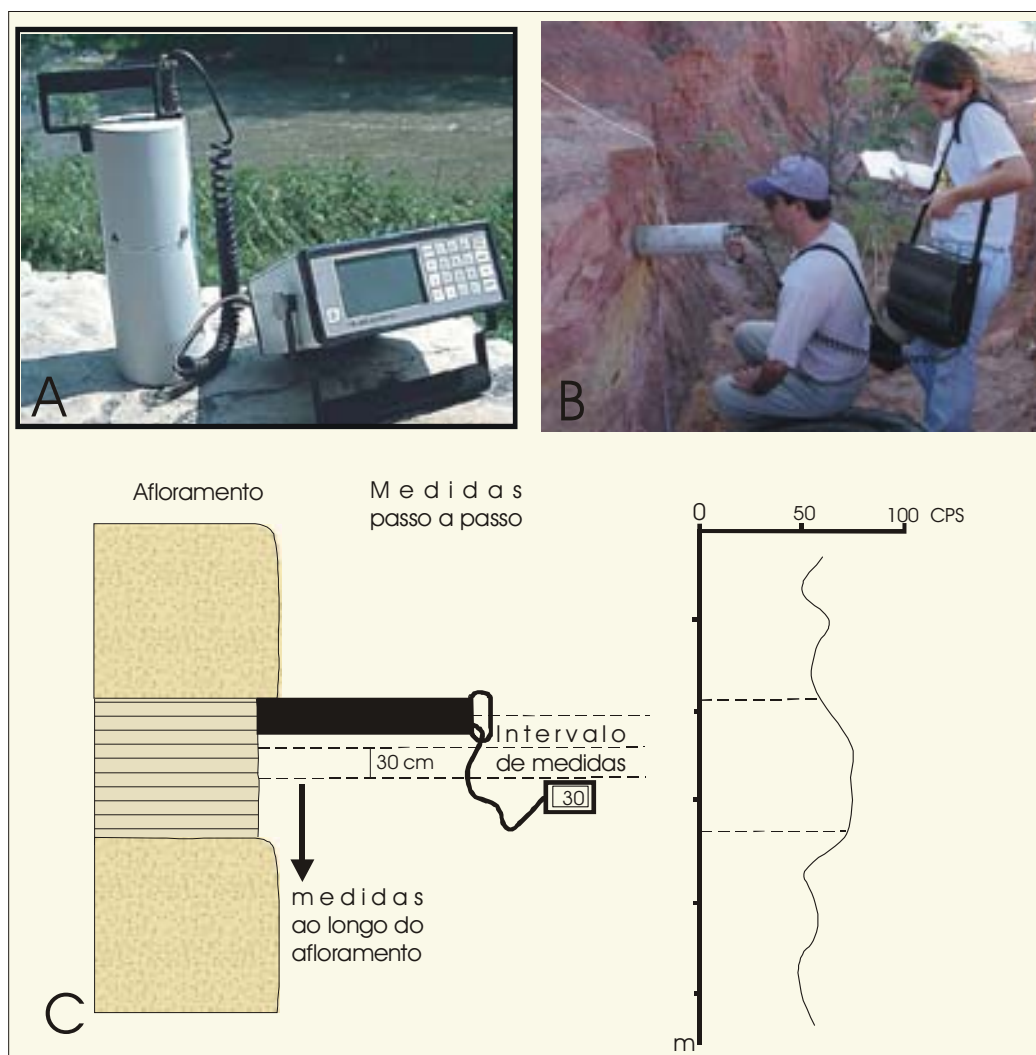


Figura 3.8 Espectrômetro portátil de raios gama. A-Espectrômetro GR-320 enviSPEC (foto tomada do manual do equipamento). B- Aquisição de dados no afloramento Apodi. C- Representação esquemática da aquisição dos dados, segundo o procedimento sugerido pelo fabricante, com espaçamento de 30 cm.

Foram realizados quatro levantamentos no afloramento Apodi e um em Tabuleiro do Norte (Figura 3.9 A-B-C-D). Na aquisição dos dados foram seguidas duas metodologias: 1) recomendada pelo fabricante onde foram realizadas leituras a cada 30 cm, com um tempo de aquisição de 30 segundos; 2) adaptada neste trabalho, que consistiu na tomada de dados com espaçamento definido em função das variações litológicas ou texturais ao longo da seção levantada, com tempo de aquisição de 30 segundos. Para determinação do *background* da região, e posterior correções das curvas obtida, foram realizadas medidas próximas da lâmina de água no centro de um açude localizado na região (Figura 3.10).



Figura 3.9 Levantamento de perfis com espectrômetro de raios gama. A- Detalhe do emprego do equipamento. B-C Fotos de dois perfis levantados em Apodi. D- Foto do perfil levantado em Olho d'Água da Bica.



Figura 3.10 Medidas realizadas no centro de um açude para determinação do *background*.

### 3.3.1.2 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).

O equipamento empregado no presente trabalho para estudar as amostras das tufas calcárias foi um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo XL 30 ESEM, da Philips que pode trabalhar com alto e baixo vácuo ou sob pressão ambiente (Figura 3.11). Podem ser obtidas imagens com aumentos entre 10 e 100.000 vezes, tanto de perfis topográficos, com o detector de elétrons secundários, quanto de contrastes composicionais, por meio do detector de elétrons retro-espalhados (Lima Filho *et al.* 2002). Outro sinal obtido por meio da interação radiação-matéria consiste nos raios-X característicos. A detecção e análise deste sinal por meio do detector EDAX permitem a avaliação qualitativa ou até mesmo semi-quantitativa da composição química do material.



Figura 3.11 Microscópio eletrônico de varredura modelo XL 30 ESEM.

Foram analisadas 19 amostras em duas seções de microscopia eletrônica de varredura. O objetivo principal foi determinar os principais minerais que compõem a tufa e observar se havia recristalização nas amostras selecionadas para análises de isótopos estáveis de carbono e oxigênio.

### 3.3.1.3 ESTUDO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS.

Os isótopos são átomos que possuem em seus núcleos o mesmo número de prótons, porém diferente número de nêutrons, divididos em estáveis e instáveis. Por convenção, os valores isotópicos são expressos pelo desvio ( $\delta$ ) em partes por mil ( $^0/_{00}$ ) da razão isotópica medida em relação a uma amostra padrão (Hoefs 1997). Atualmente, o valor desta amostra padrão foi estabelecido pela Agência Internacional de Energia Atômica.

Durante a década de 90 foi demonstrado em trabalhos desenvolvidos, principalmente, na Europa que os dados dos isótopos estáveis obtidos em tufas calcárias são uma importante ferramenta para se obter informações paleoambientais e paleoclimáticas, destacando-se os trabalhos de Andrews *et al.* (1994, 1997 e 2000) e Horvatinneí *et al.* (2003).

No presente trabalho foram realizadas análises de isótopos estáveis de 12 amostras do afloramento Quixeré (Ver dados em Anexo 2). As análises foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis da Universidade Federal de Pernambuco (LABISE), sendo os valores expressos nas normas *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB) e *Standard Mean Ocean Water* (SMOW).

### 3.3.2 INVESTIGAÇÕES DE SUBSUPERFÍCIE EMPREGANDO O GPR.

O GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou GEORADAR, como também é conhecido, gera imagens de alta resolução com base no registro do tempo de viagem das ondas eletromagnéticas. Este método investiga a subsuperfície utilizando ondas de rádio com frequências que podem oscilar entre 1 Mhz a 1000 Mhz. Estas ondas são originadas através da transmissão de um curto pulso de altas frequências pela antena transmissora, as quais são refletidas e difratadas em subsuperfície e recebidas pela antena receptora (Annan 1992). A propagação da onda depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais: condutividade elétrica -  $\sigma$  (mS/m), permissividade dielétrica -  $\epsilon$  (F/m) e permeabilidade magnética -  $\mu$  (H/m). A intensidade de energia refletida é registrada em função do tempo de percurso (tempo duplo). Ela é amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador tipo *notebook*, para que os dados possam ser posteriormente processados, Porsani (2002). Trabalhos relacionados

com o uso do método GPR podem ser encontrados em Davis & Annan (1989); Annan (1992); Reynolds (1997), Porsani (1999); Neal e Roberts (2000), Oliveira Junior (2001).

O GPR foi inicialmente desenvolvido para fins militares, na segunda guerra mundial, para localizar armas, bombas e galerias subterrâneas. Após muitos anos de desenvolvimento, atualmente o GPR é considerado um equipamento sofisticado para sondagens e investigações de baixa profundidade. É amplamente aplicado nas áreas de Geologia, Geotécnica e Engenharia, Meio Ambiente e Arqueologia, Porsani (2002). Os principais equipamentos GPR existentes no mercado são: RAMAC/GPR da MALA *GeoScience* (Suécia), pulseEKKO GPR da *Sensors & Software* (Canadá) e GSSI da *Geophysical Survey Systems* (USA).

O emprego do método de GPR em estudos sedimentológicos começou na década de 90, podendo ser ressaltados os trabalhos de Pratt e Miall (1993), Huggenberger (1993), Gawthorpe *et al.* (1993), Huggenberger *et al.* (1994), Harari (1996), Beres *et al.* (1995), Bristow (1995), Porsani e Rodrigues (1995), McMechan *et al.* (1997), Van Overmeeren (1998), Bridge *et al.* (1998) e Bristow *et al.* (2000).

A interpretação do GPR tem como base o radargrama. Para isto é necessário conhecer a natureza e origem da reflexão, como também os padrões de reflexão característicos para cada tipo de depósito sedimentar. O termo “radar fácies” pode ser definido de forma similar à sísmica, como a soma de todas as características dos padrões de reflexão de uma rocha ou sucessão sedimentar (Van Overmeeren 1998).

As estruturas e texturas existentes em subsuperfície são responsáveis pela definição dos elementos do radar fácies (amplitude da reflexão, continuidade da reflexão, configuração da reflexão, geometria da unidade de radar fácies). Outros elementos que podem ser chamados de elementos de radar fácies secundários são: frequência dominante, abundância de reflexão, polaridade da reflexão, presença de difração, grau de penetração (Van Overmeeren 1998).

Todos os elementos do radar fácies relacionados com reconhecimento de padrões de reflexão podem ser característicos de certos sistemas deposicionais ou de certas rochas sedimentares. O termo “Radar Estratigrafia” pode ser resumido como a determinação das características e história geológica de rochas sedimentares bem como de seus sistemas deposicionais empregando imagens de radar (Van Overmeeren 1998). Em resumo, se

pode expressar que a “Radar Estratigrafia” pretende reconhecer os padrões de reflexão do radar fácies e correlacioná-las com os sistemas deposicionais.

### 3.3.2.1 EQUIPAMENTO:

No presente trabalho foi empregado o RAMAC/GPR da MALA GeoScience. Este equipamento compõe-se de uma unidade de controle UC II, antenas de 25, 50, 100 e 200 MHz, seis baterias, um transmissor e um receptor eletrônico (Figura 3.12). Na aquisição de algumas linhas foi empregada uma unidade de controle UC I, bem como um transmissor e receptor do Instituto de Astronomia e Geofísica da USP.



Figura 3.12 Equipamento RAMAC-MALA. A- Unidade de Controle UC-II, B- Antena e Receptor, C- Aquisição dos dados no campo.

Na aquisição dos dados nos afloramentos de Apodi e Tabuleiro do Norte foi empregado o *software* GroundVision versão 1.3.4. e GPR.EXE v 3.17 (para o equipamento do IAG-USP). Na aquisição dos dados do afloramento Quixeré foi empregado o *software* GroundVision versão 1.3.5 build 5. O processamento final dos dados foi realizado com *software* GRADIX versão 1.11 da Geosoft.

### 3.3.2.2 ETAPA PRÉVIA DO LEVANTAMENTO:

O estudo de viabilidade de utilização do GPR requer a respostas de três questões fundamentais: profundidade do alvo a ser investigado, quantidade de energia refletida e a presença de fatores limitantes.

#### Profundidade do alvo:

A profundidade máxima de penetração está relacionada a frequência central das antenas. A resolução vertical é a habilidade de distinguir as reflexões provenientes do topo e da base de camadas de pequena espessura (Davis e Anan, 1989). Valores estimados por Porsani (1999) em base a experimentos práticos das empresas RAMAC/GPR, *Sensors & Software* e GSSI, serveram como guia para os trabalhos de campo.

#### Quantidade de energia refletida:

Para determinar a quantidade de energia refletida pelo alvo deve-se determinar o coeficiente de reflexão (R) entre o meio encaixante e o alvo. Onde  $K_1$  é a constante dielétrica do médio ou *background* e  $K_2$  é a constante dielétrica do alvo. O *background* e uma intercalação de arenito ( $K= 2-6$ ,  $K$  médio= 4) e siltito ( $K=5-30$ ,  $K$  medio=15). Portanto o valor de  $K_1 = 10$ . Como alvo principal foram considerados os paleocanais formados por camadas de arenito. Portanto o valor de  $K_2 = 4$

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}}$$

$$R = 0,225$$

Este resultado mostra que somente 22,5% da onda de GPR reflete e retorna a superfície indicando que será muito difícil distinguir os paleocanais.

#### Presença de fatores limitantes:

Neste caso são considerados os elementos geológicos e os de natureza humana que possam gerar fontes de interferências (ruídos). Na área de trabalho em Apodi o afloramento apresenta camadas de siltitos e conglomerados argilosos, e apresenta como fator limitante uma cerca e uma escarpa. No afloramento Olho D' Água da Bica foi necesario realizar uma trincheira na escarpa. O afloramento de Quixeré apresenta como fator limitante varias cercas e uma escarpa.

### 3.3.2.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GPR

O processamento de dados de GPR pode ser dividido em básico e avançado (Davis e Annan 1989, Oliveira Jr 2001, Porsani 2002). Neste trabalho para os perfis de reflexão foi realizado um processamento básico empregando o *software* GRADIX versão 1.11 com a seqüência que será descrita a seguir:

#### **Drift Removal:**

Esta função é usada para alinhar os traços do perfil que possam estar alterados em conseqüência do instrumento ou de fatores externos como por exemplo à temperatura.

#### **Dewow:**

Filtro de passa-banda empregado para remover os componentes de baixa frequência que se originam de fenômenos indutivos relacionados com a saturação originada pela onda direta pelo ar ou por limitações dinâmicas do instrumento.

#### **Ajuste do tempo zero:**

O objetivo principal é ajustar o tempo inicial de registro a primeira onda a chegar na antena receptora que é caracterizada pela onda direta no ar.

#### **Ganho:**

Empregado com a finalidade de compensar os efeitos da atenuação do sinal na propagação no solo, bem como para melhorar a visualização das estruturas profundas. Neste trabalho foram empregados os ganho em tempo de compensação esférica exponencial (SEC) e compensação de ganho automático ou AGC. O ganho SEC é uma tentativa de restaurar a forma original dos refletores causadas pelas feições mais profundas, não alterando a amplitude dos refletores superficiais. O ganho AGC amplifica ou atenua todos os pontos ao longo de um traço. A escolha da função a ser aplicada em cada processamento é efetuada por meio de tentativas.

#### **Filtros passa-banda:**

Empregado para a remoção de ruídos de alta e baixa frequência. Atua ao longo de um traço permitindo realçar a estrutura de interesse ou removendo os sinais indesejáveis. Os filtros que se mostraram com melhores resultados foram à passa-banda Trapezoidal e Gaussiano.

**Declip:**

Esta função restaura, por interpolação, as formas das ondas dos primeiros ciclos que são afetadas pela chegada da onda direta do ar, com maior amplitude que a energia refletida.

**Conversão em profundidade:**

Para converter um perfil em tempo para profundidade é necessário usar a velocidade de propagação da onda eletromagnética em subsuperfície. A análise de sondagens de velocidade do tipo CMP/WARR permite estimar esta velocidade. Para tanto, foram adquiridas várias sondagens de velocidade, entretanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Portanto em nosso trabalho, para os afloramentos Apodi e Tabuleiro do Norte, foi utilizado o valor de 100 m/ $\mu$ s, Porsani e Rodrigues (1995) para conversão dos perfis de tempo para profundidade.

**Correção topográfica:**

Este processamento é empregado para eliminar os efeitos causados pela topografia e desta forma restaurar as posições corretas dos refletores no radargrama.

**3.3.2.4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE GPR**

Existem diversas formas de se apresentar os dados de GPR. Normalmente, são empregados os códigos de cores que apresentam os dados com diferentes paletas de cores, a *gray scale* que mostra a sinal em tons de cinza e a *wiggle trace* que mostra a amplitude do sinal em função do tempo. No presente trabalho foram empregados os códigos de cores. Depois de processados os dados foram exportados como imagens \*.bmp e, posteriormente, no *software* Corel Draw v.10 foram feitas às interpretações.

#### IV. ANÁLISES DOS DADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.

A análise dos dados e resultados obtidos é apresentada individualmente para cada afloramento estudado. Em números gerais os dados consistem no levantamento de 14 seções colunares, na confecção de 03 fotomosaicos, no levantamento de 05 perfis de raios gama e 807 m de perfis geofísicas com GPR (157 m com antena de 200 MHz, 490 m com antena de 100 MHz e 160 m com antena de 50 MHz). Para as tufas carbonáticas foram realizados estudos petrográficos em 16 amostras, com microscopia ótica e com o microscópio eletrônico de varredura, análise de difração de raios X em três amostras, além da análise de isótopos estáveis de carbono e oxigênio em 12 amostras.

##### 4.1 AFLORAMENTO APODI:

O afloramento de melhor exposição da área encontra-se localizado na escarpa da Chapada do Araripe, a três quilômetros da cidade de Apodi-RN. O acesso pode ser feito pela BR-405 que liga a cidades de Apodi a Mossoró. Este afloramento foi interpretado como originado a partir de sistema fluvial meandrante (Castro e Barrocas 1981) e, posteriormente, re-interpretado como depositado em ambiente transicional, relacionado a sistemas influenciados por marés (Bagnoli e Farias 1989); (Bagnoli 1992).

O afloramento, que apresenta uma extensão de aproximadamente 1 km, expõe na base, rochas da Formação Açú (Unidade Açú-4) e na porção superior calcários da Formação Jandaíra. Na base ocorrem conglomerados com estratificação cruzada acanalada e tabular, marcada por clastos de argilas e raramente seixos de quartzo; arenito grosso, médio, fino e muito fino com estratificação cruzada, mostrando uma variação regular tanto no mergulho quanto na espessura (*tidal bundles*) e argilito laminado. Nestas rochas podem ser observadas outras estruturas sedimentares primárias das quais podem ser destacadas as laminações cruzadas de pequeno porte (marcas onduladas reversas), os pares conjugados de argila (*mud couplets*) e as superfícies de reativação. A presença associada destas diferentes feições pode ser empregada como critério diagnóstico da influência da ação de correntes de marés.

Os perfis geofísicas com GPR foram realizadas na porção inferior da escarpa com antenas de 50 e 100 Mhz, espaçamento de 0,5 e 0,25 m em duas linhas paralelas, uma com comprimento de 60m e outra com comprimento de 45 m, espaçadas em 30m, e uma perpendicular, com comprimento de 50 m (Figura 4.1 e 4.2). Em todas foram cravados

piquetes a cada 5m e realizados levantamentos altimétricos de precisão com Estação Total. Foram também levantadas 04 seções colunares e, respectivos, perfis de raios gama. Este levantamento foi realizado exclusivamente sobre rochas da Formação Açú (unidade Açú-4).

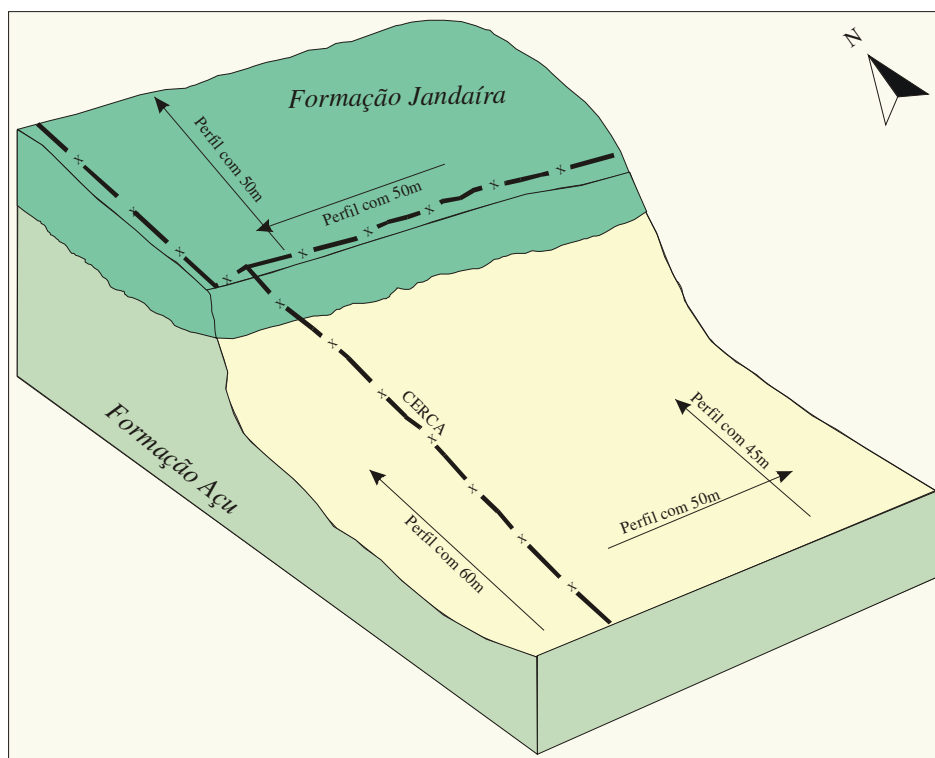


Figura 4.1 Bloco esquemático mostrando um esboço das unidades litoestratigráficas e da localização dos perfis GPR levantados.



Figura 4.2 Detalhe dos perfis geofísicos com GPR, na porção inferior da escarpa, ressaltando-se a presença de uma cerca e da escarpa.

Na porção superior da escarpa, sobre calcários da Formação Jandaíra, foram realizadas dos perfis GPR com espaçamento de 0,25m, segundo linhas de 50m, perpendiculares entre si e cravado piquetes a cada 5m (Figura 4.3). Como a área era plana não houve necessidade de se realizar levantamentos altimétricos complementares.



Figura 4.3 Detalhe da picada aberta para aquisição de dados GPR na porção superior da escarpa.

Os perfis de reflexão foram adquiridos com objetivo de identificar as geometrias dos estratos de forma a representá-los em três dimensões (3D). Durante o processamento dos dados de campo foi constatado que não havia suficiente contraste entre as propriedades físicas das rochas estudadas. Nos radargramas, não foram evidenciados refletores ou padrões de radar fácies que subsidiassem as interpretações geológicas (Figura 4.4). Para descartar a possibilidade da ausência de refletores está relacionada a problemas na aquisição dos dados de campo, foram analisados todos os espectros de amplitude versus frequência nos perfis adquiridos. Esta análise mostrou a boa qualidade dos dados adquiridos já que todos os perfis mostraram uma gaussiana quase perfeita (Figura 4.5).

Foram repetidas as aquisições de novas linhas GPR, entretanto, em nenhuma delas houve um ganho considerável na qualidade do resultado obtido. Acredita-se que este problema deva-se ao pequeno contraste existente entre a constante dielétrica das rochas analisadas.

Espera-se que durante o período de chuvas, com as rochas saturadas em água, o resultado possa ser diferente. Talvez, pequenos filmes de água retida no limite dos estratos possam servir de refletores, permitindo assim a identificação das geometrias

deposicionais. Problema similar foi assim solucionado por Porsani *et al.* (2001), na região de Itú, no estado de São Paulo, identificando fraturas em rochas graníticas.

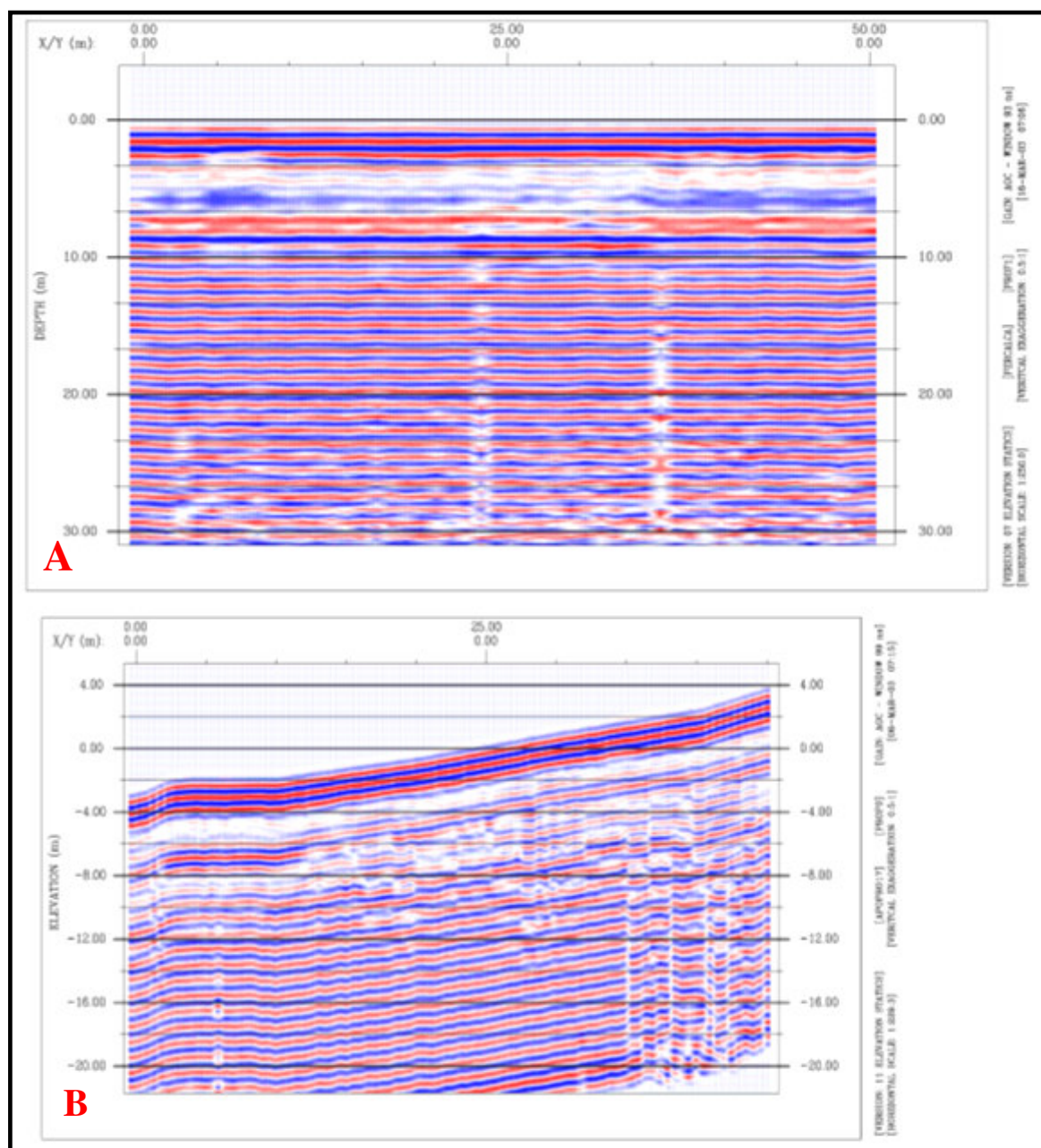


Figura 4.4 Radargramas processados mostrando a falta de refletores ou padrões de radar fácies. A- Radargrama de levantamento realizado na região superior da escarpa com antena de 50 MHz. B- Radargrama de levantamento realizado na região inferior da escarpa com antena de 100 MHz.

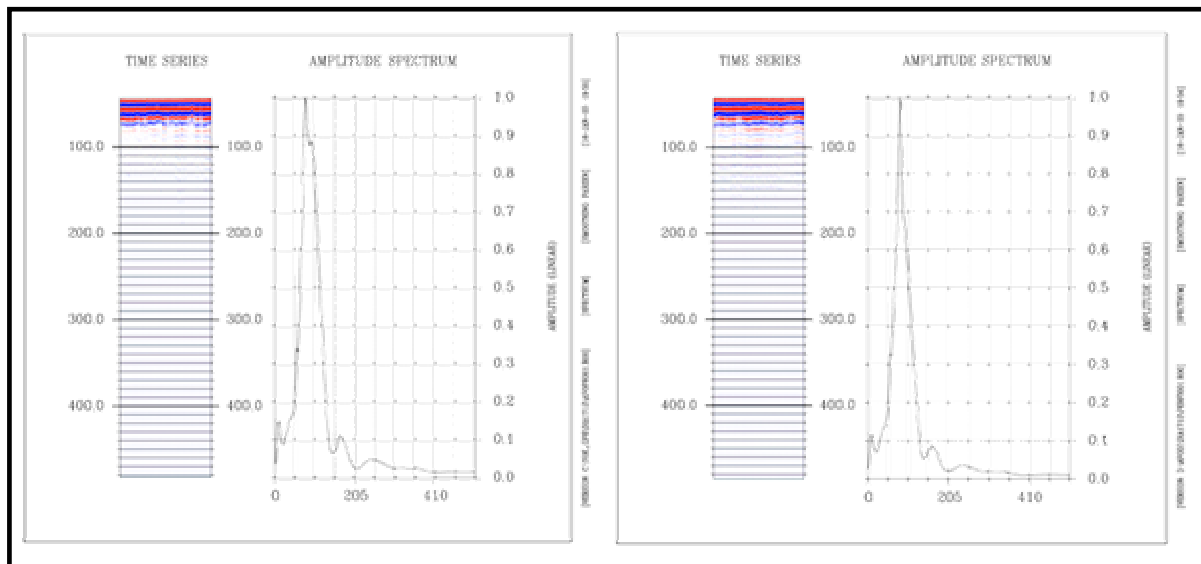


Figura 4.5 Espectros de amplitude analisados, mostrando boa simetria da curva gaussiana.

Os perfis de raios gama (Anexo 1) mostraram que os maiores valores de contagem total e de potássio estão relacionados à presença de conglomerados com clastos de argilas, arenitos com seixos de argilas e argilitos e siltitos laminados. Os menores valores estão associados, principalmente, com arenitos finos a muito finos, com estratificação cruzada acanalada. Em alguns casos os picos dos perfis de raios gama encontraram-se “defasados” de camadas ricas em argila como, por exemplo, nos valores de argilito siltoso da figura 4.6. Os deslocamentos dos picos das camadas de argila, em relação aos respectivos picos dos raios gama, podem ser explicados como ruído derivado da coleta de dados (Figura 4.7), como mostrado no trabalho de Svendsen e Hartley (2001).

Durante o levantamento de perfis radioativos em afloramentos foi observado um problema gerado pelo procedimento metodológico recomendado pelo fabricante do cintilômetro. Ele sugere a aquisição dos dados a partir da leitura de pontos regularmente espaçados a cada 30 cm. Comparando-se os perfis obtidos segundo este procedimento (Figura 4.8A) e outros, cuja aquisição foi controlada pelas variações texturais das camadas, percebe-se, claramente, a melhor correlação entre os argilitos e conglomerados com clastos de argila e os picos de raios gama, obtidos no segundo procedimento metodológico (Figura 4.8B). Com o levantamento de perfis de raios gama, usando espaçamento não fixo, percebe-se também que há um melhor detalhamento das variações das contagens totais de raios gamas, como pode ser comparado nas curvas da figuras 4.8 A e B.

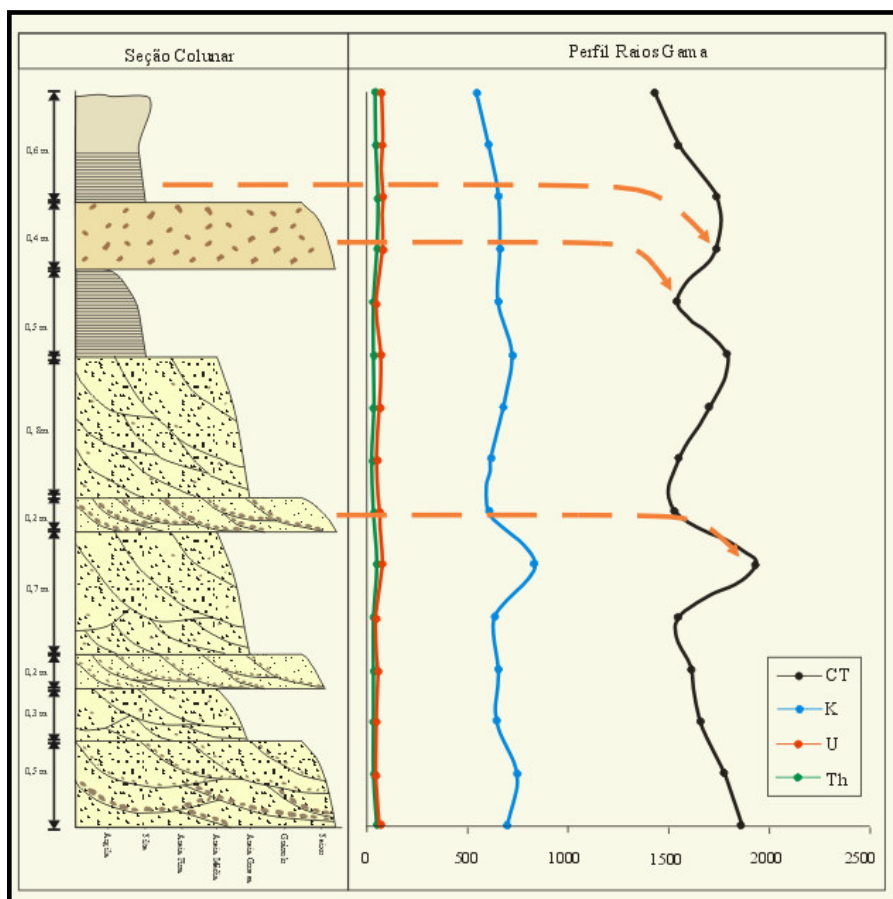


Figura 4.6 Seção colunar e perfil de raios gama levantados no afloramento ressaltando os picos defasados das respectivas camadas tanto as camadas argilosas quanto as conglomeráticas apresentam picos radioativos.

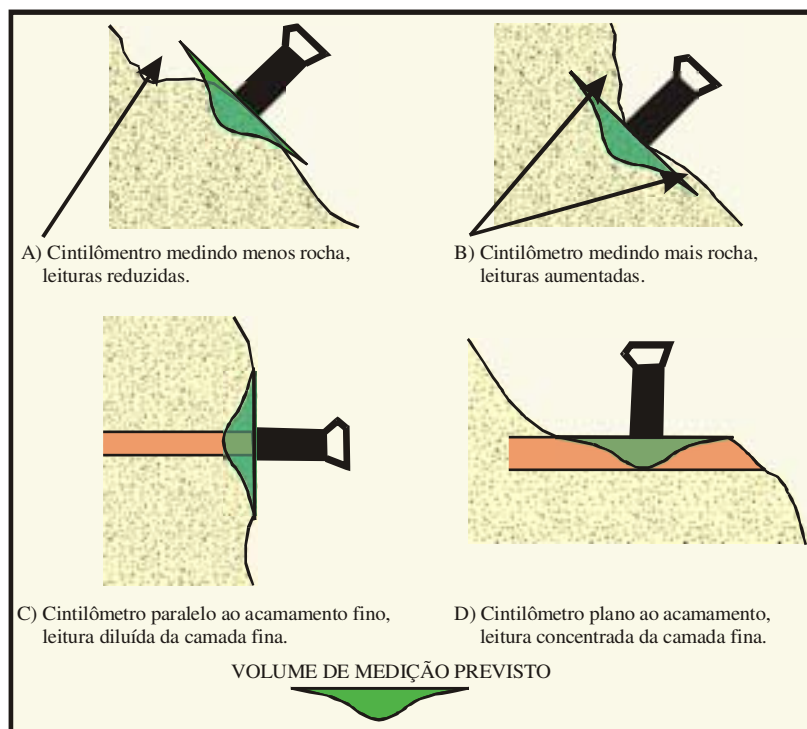


Figura 4.7 Problemas de falsa leitura ocasionado pela coleta inadequada de dados de raios gama (modificado de Svendsen e Hartley, 2001).

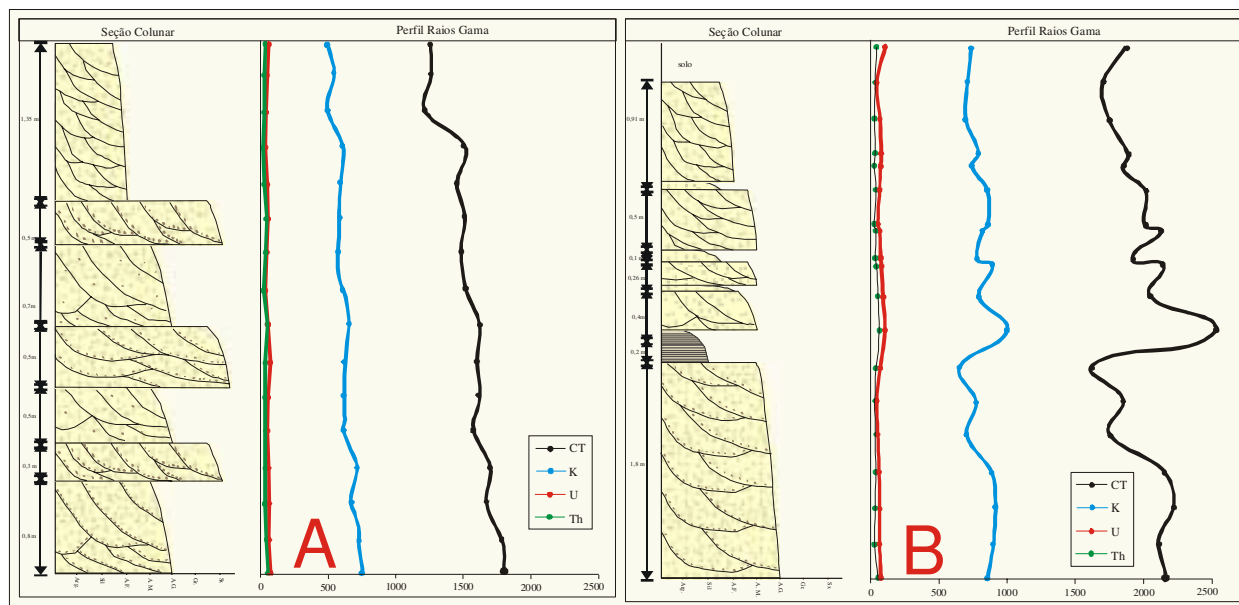


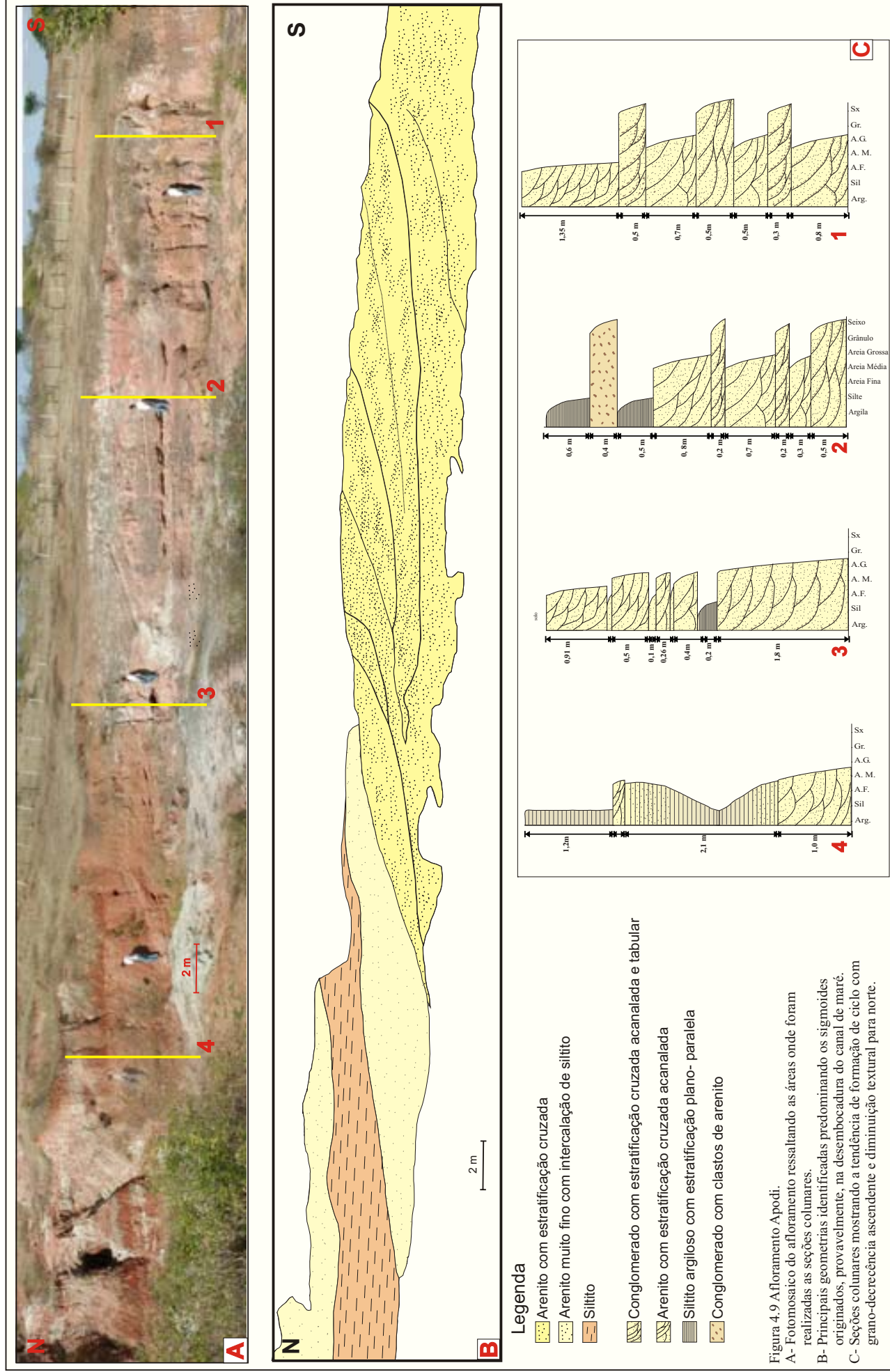
Figura 4.8 A- Perfil de raios gama obtido com espaçamento de 30cm, recomendada pelo fabricante, onde percebe-se que a curva apresenta poucas inflexões. B- Perfil de raios gama obtido segundo as variações texturais das camadas, a curva mostra melhor as variações litológicas.

Com o imageamento digital foram identificadas as principais geometrias deposicionais 2D (Figura 4.9), denominadas de sigmóide. As mesmas correspondem à superposição de diferentes barras de maré, com paleocorrente preferencial para norte, relacionadas à maré vazante. Percebe-se também a presença de laminação cruzada de pequeno porte, com sentido de paleocorrente para sul, mostrando o caráter bidirecional do fluxo. As sigmóides devem representar a entrada de barras de marés no mar, onde a diminuição brusca de energia, gerada pelo atrito do fluxo da água do canal de maré no mar, leva a deposição de corpos sedimentares com a forma lobada.

## 4.2 AFLORAMENTO OLHO D' ÁGUA DA BICA.

O afloramento de melhor exposição da área encontra-se localizado no povoado Olho d'Água da Bica. Neste afloramento foram realizados levantamentos de seções colunares, fotomontagem do afloramento com fotografia digital, levantamento de perfis de raios gama e perfis geofísica com GPR.

Neste afloramento ocorrem conglomerados com clastos de argilas marcando a estratificação cruzada acanalada de pequeno a médio porte, arenito com textura média, mostrando estratificação cruzada acanalada de médio porte, arenito fino com estratificação cruzada de pequeno porte e siltitos-argilitos laminados.



As estruturas sedimentares mais freqüentes são *flaser*, laminação ondulada (*wavy*), laminação lenticular (*linsen*) e estratificação cruzadas que formam sequencias de bundles de marés com diferentes mergulhos e espessuras (*tidal bundles*). Encontram-se também pares conjugados de argila (*mud couplets*) e estratificação cruzada do tipo espinha-de-peixe (*herringbone*).

Neste afloramento, o levantamento de perfis de raios gama mostrou que os picos de máxima radioatividade também mostraram uma boa correlação com os conglomerados ricos em clastos de argilas e com siltitos. Entretanto, o pico de raios gama que representa as camadas mais argilosas na porção superior da seção colunar, mostra uma defasagem, colocando-se um pouco abaixo da posição da camada (Figura 4.10). Os deslocamentos dos picos das camadas de argila, em relação aos respectivos picos dos raios gama, também podem ser explicados como ruído derivado da coleta de dados, como já demonstrado anteriormente.

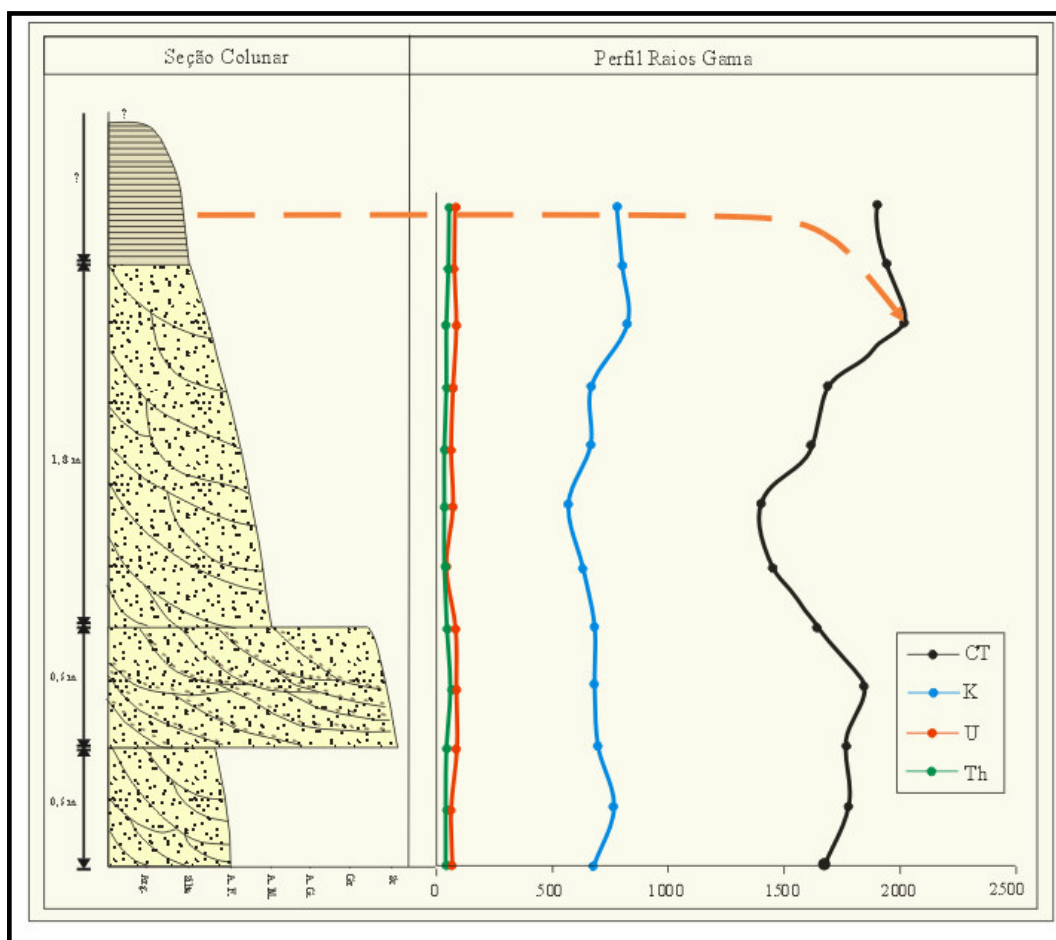


Figura 4.10 Seção colunar e perfil de raios gama levantados no afloramento Olho D' Água da Bica, ressaltando-se a presença de dois picos de contagem total (CT) em conglomerados com clastos argilosos e em pelitos. Na porção superior percebe-se uma defasagem da camada pelítica e seu pico respectivo.

Outro aspecto que deve ser ressaltado é a presença de picos positivos de radiação em rochas de textura grossa como, por exemplo, os conglomerados e arenitos, com clastos de argila. Quem trabalha com perfis elétricos/radiativos de poços, normalmente associa estes picos à camadas pelíticas. Portanto, geólogos e geofísicos devem tomar cuidados adicionais quando estiverem interpretando perfis de raios gama em poços que atravessem a zona de transição entre a Formação Açú e Jandaíra, em especial nos litótipos da Unidade Açú 4. Caso não sejam definidas corretamente as litologias correspondentes aos respectivos picos, podem ser feitas interpretações equivocadas como: espessuras de parassequências, conjuntos de parassequências e, conseqüentemente, a própria interpretação da posição dos estratos na curva de variação relativa do nível do mar.

Na aquisição dos dados GPR foi empregada apenas a antena de 100 MHz, segundo uma linha de 20 m, com espaçamento de 0,25 m e repetida a operação com espaçamento de 0,20 m. Os perfis de reflexão foram realizados em uma trincheira aberta numa altura de aproximadamente 8 m acima da base da escarpa (Figura 4.11) Os dados obtidos mostraram-se de qualidade inferior, com os sinais apresentando uma intensa reverberação, possivelmente causada pela reflexão da onda aérea nas paredes da trincheira (Figura 4.12).



Figura 4.11 Detalhe dos perfis geofísicas com GPR, ressaltando-se a trincheira com paredes laterais, aberta a aproximadamente 8m acima da base do afloramento.

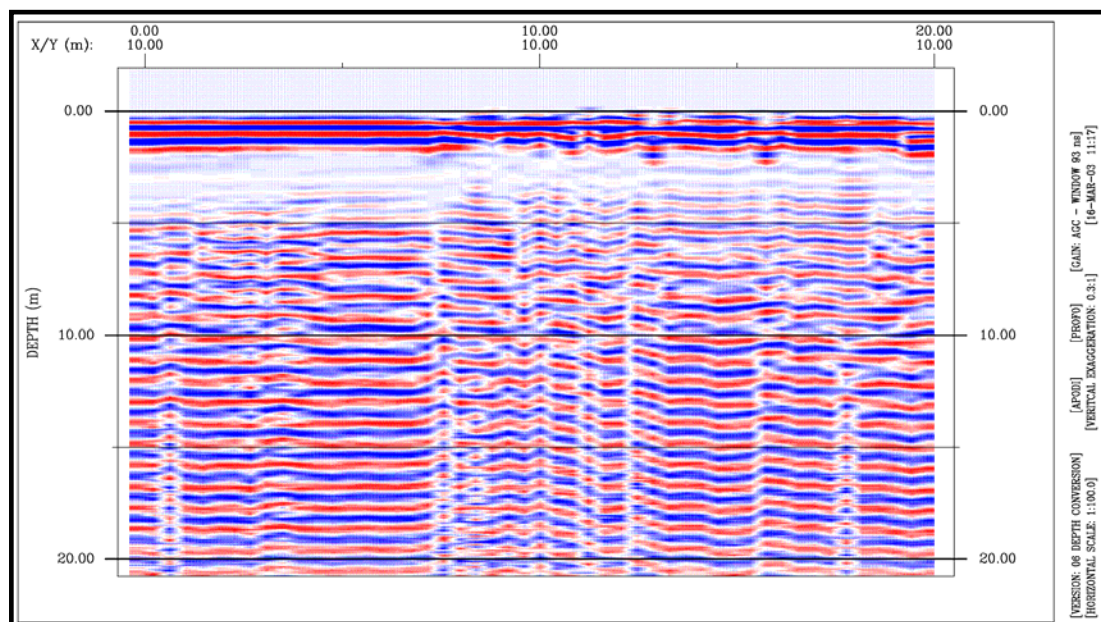


Figura 4.12 - Radargrama de levantamento realizado com antena de 100 MHz, mostrando reverberações e poucos refletores de interesse geológico.

No afloramento Olho d' Água da Bica observa-se geometrias interpretadas como a migração de barras de maré, onde observasse uma seqüência incompleta de *tidal bundles* limitadas por superfícies de 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordens. A variação da espessura e mergulho dos *bundles* é controlada pela ação de marés de sizígia e quadratura. No afloramento foi interpretada a presença dos depósitos gerados durante a ação de correntes de duas marés de quadratura e uma maré de sizígia (Figura 4.13).

A presença de estratificação cruzada do tipo espinha-de-peixe (*herringbone*), neste afloramento (Figura 4.14), mostra que em um determinado momento as marés de enchentes e de vazantes tiveram a mesma capacidade de transporte. Esta situação não é comum em outros afloramentos da bacia, uma vez que são encontradas com freqüência camadas onde se interpreta claramente a presença de uma corrente dominante e outra subordinada. Neste afloramento a corrente dominante corresponde à maré vazante, uma vez que o padrão de paleocorrente principal tem direção predominante para o norte, onde se localizava a paleolinha da costa no Cretáceo.

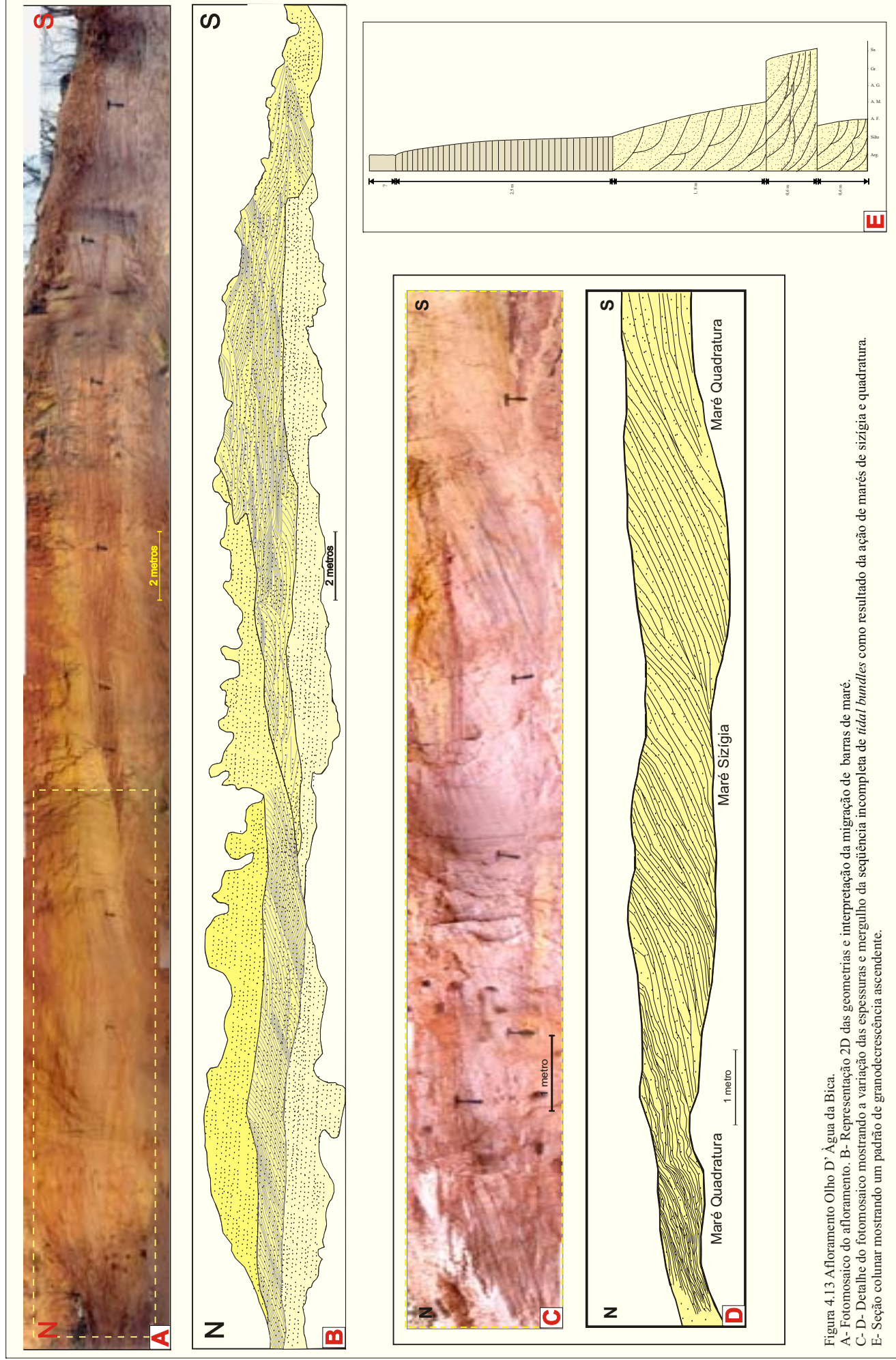


Figura 4.13 Afloramento Olho D'Água da Bica. A- Fotomontagem do afloramento. B- Representação 2D das geometrias e interpretação da migração de barras de maré. C-D- Detalhe do fotomontagem mostrando a variação das espessuras e mergulho da sequência incompleta de *tidal bundles* como resultado da ação de marés de sizígia e quadratura. E- Seção colunar mostrando um padrão de grandebrecência ascendente.

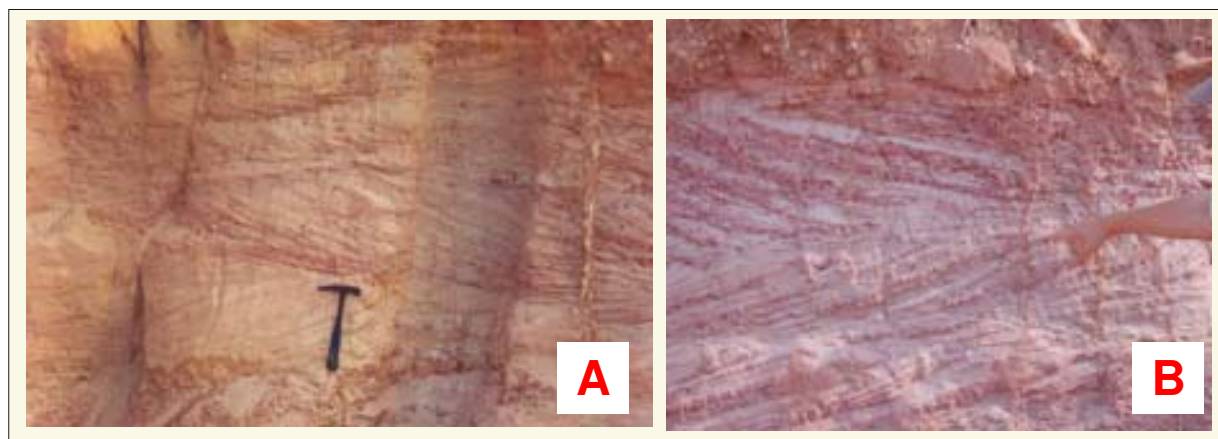


Figura 4.14 Fotos da estrutura espinha de peixe do afloramento Olho d' Água da Bica. A- Trincheira realizada para comprovar as paleocorrentes da estrutura. B- Detalhe da variação de paleocorrente.

### 4.3 AFLORAMENTO QUIXERÉ.

Os depósitos de tufas carbonáticas, reconhecidos pela primeira vez na Bacia Potiguar, estão localizados na porção central e oeste da Bacia Potiguar. O afloramento com melhor exposição está localizado na escarpa da estrada CE-377, próximo ao povoado de Serrinha, no município de Quixeré.

As tufas carbonáticas descritas neste trabalho foram estudadas principalmente no povoado Serrinha, onde foram levantadas oito seções colunares e um perfil altimétrico, acompanhados da composição de fotomosaicos obtidos a partir de fotografias digitais, e realizada um perfil GPR. Estes trabalhos tiveram por objetivo a descrição das fácies carbonáticas e o reconhecimento da geometria dos depósitos e de suas relações laterais. Adicionalmente, foram coletadas amostras para estudos petrográficos, via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectrômetro de energia dispersiva acoplado (EDS). Foi possível caracterizar os aspectos texturais das rochas carbonáticas, sua composição e observar possíveis feições de alteração diagenética. A partir das descrições petrográficas, foram selecionadas amostras, sem evidências de rescristalização ou dolomitização, para análises de isótopos estáveis de carbono e oxigênio, visando obter informações sobre as condições paleoambientais de formação das tufas carbonáticas.

O afloramento apresenta tufas carbonáticas derivadas da Formação Jandaíra. Foram encontradas tufas carbonáticas contendo folhas e fragmentos de estalactites (Figura 4.15), e tufas carbonáticas com matriz micrítica. Elas ocorrem em contato discordante sobre um substrato calcário intensamente intemperizado, ou com vestígios de

acamamento original, ou ainda fraturado e intemperizado; ou ainda sobre a Formação Açu.

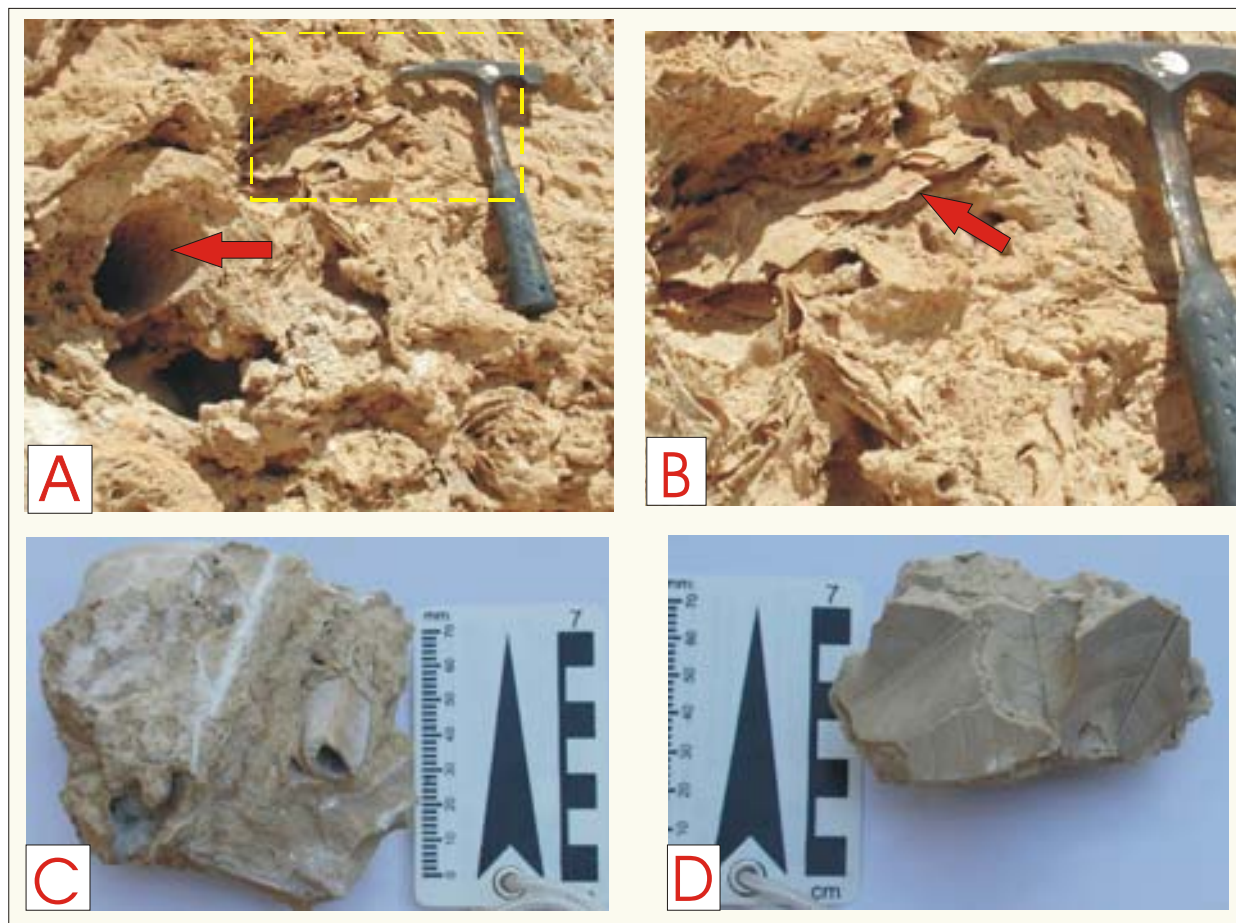


Figura 4.15 Foto das tufas carbonáticas contendo folhas e fragmentos de estalactites. A- Foto da tufas carbonáticas sendo ressaltados os fragmentos de estalactites. B- Ampliação da foto anterior mostrando molde de folhas. C- Detalhe de uma amostra com molde de folha dobrada. D- Amostra com molde de várias folhas.

Os fósseis vegetais ocorrem de forma dispersa, formando aglomerados associados com fragmentos de estalactites, predominando na fração seixo. Aparentemente, as folhas se acumularam em pequenos sumidouros, levadas pela água da chuva e pelo vento, que normalmente representam as porções mais superiores de cavernas. Este processo deve ter se mantido até o colapso das cavernas. (Figura 4.16).

Devido a relação estratigráfica de não conformidade com a Formação Jandaíra, de idade cretácica, as tufas carbonáticas de Quixeré possuem de idade mínima Terciário. Entretanto, tomando-se por base os moldes de folhas, supostamente sub-recente, que ocorrem em abundância e a topografia cárstica bem preservada, sua idade pode ser suposta como Quaternário.



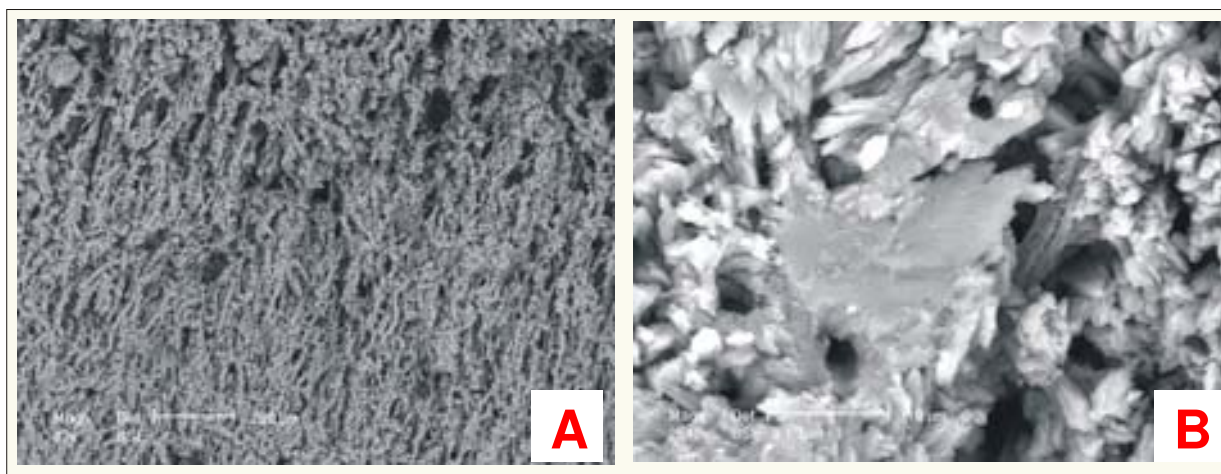


Figura 4.17 Fotografias obtidas no MEV, com o detector de elétrons retro-espalhados, mostrando o crescimento de calcita em agrupamentos colunares, com aumento de 82 vezes (A) e de 2640 vezes (B).

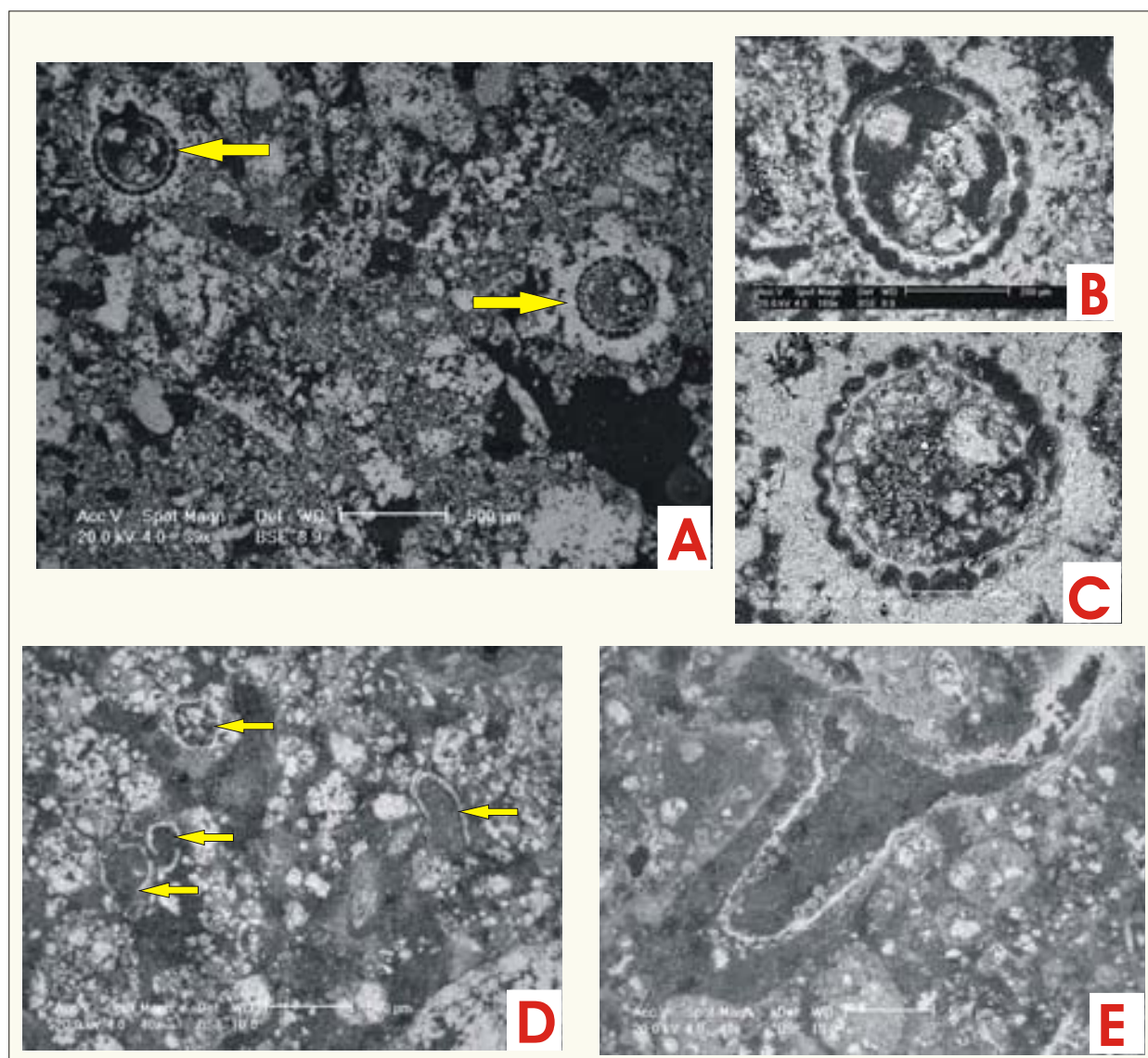


Figura 4.18 Fotografias obtidas no MEV, usando o detector de elétrons retro-espalhados, com diferentes aumentos, de microorganismos observados nas tufas. A- Seção de algas carófitas de águas doces. B-C Detalhe das carófitas. D-E. Provável ação de microorganismos (bioturbação)

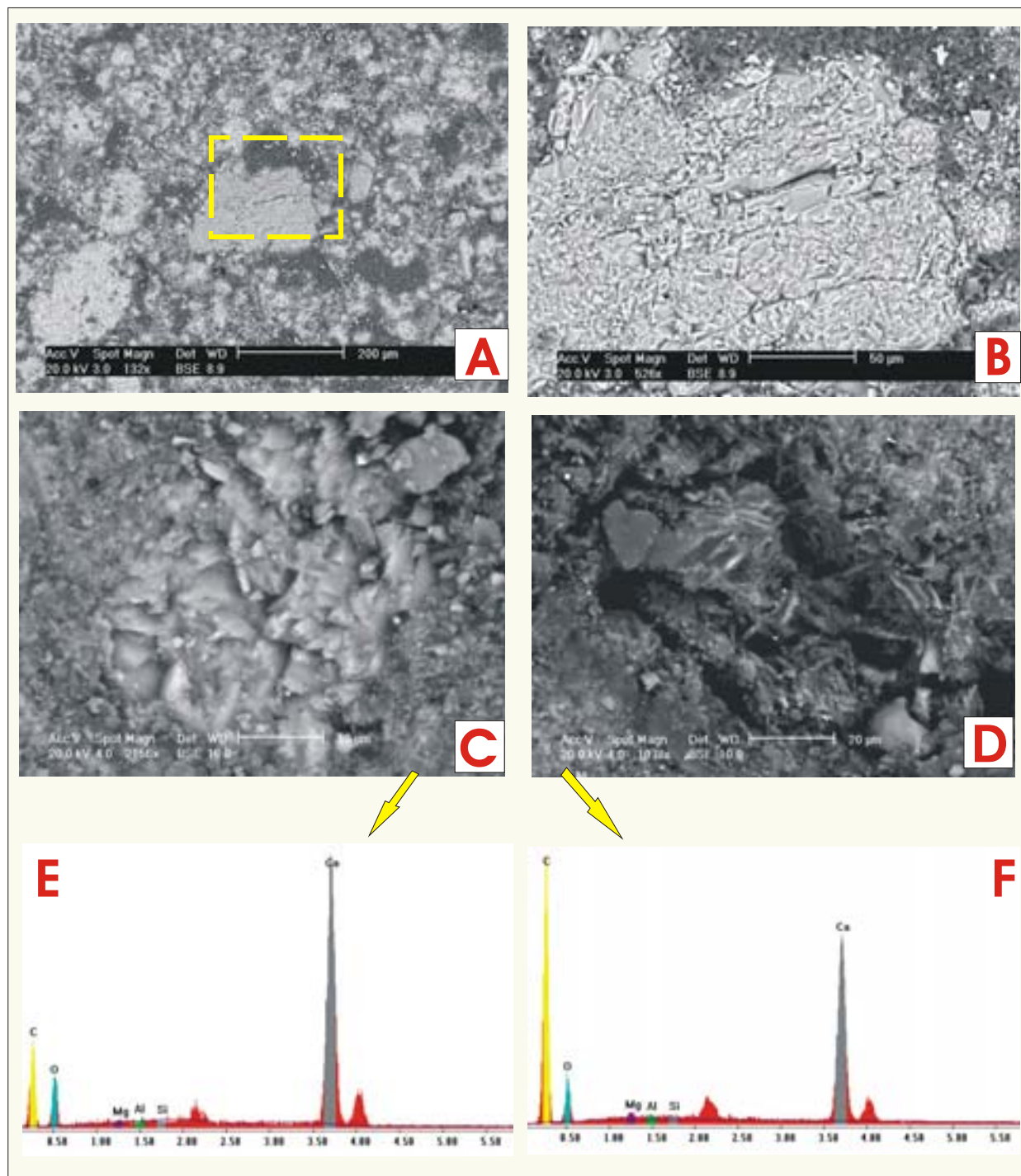


Figura 4.19 Fotografias obtidas no MEV, com o detector de elétrons retro-espalhados e análises químicas semi-quantitativas com EDS. A- Principais texturas da calcita. B-Detalhe da área de contato entre as duas texturas C- Detalhe da textura mais clara, com grãos mais compactos, onde foi realizado EDS. D- Detalhe da textura mais escura, com grãos mais fibrosos, onde foi realizado EDS. E- Gráfico com resultado do EDS mostrando enriquecimento em carbonato de cálcio. F- Gráfico com resultado do EDS mostrando enriquecimento em carbono o qual possivelmente este relacionado com uma maior presença de matéria orgânica.

As doze amostras analisadas para isótopos estáveis de carbono e oxigênio mostraram que os valores de  $\delta\text{O}^{18}$  (VPDB) oscilam entre  $-4,98\text{‰}$  e  $-6,61\text{‰}$ . Os valores de  $\delta\text{C}^{13}$  (VPDB) oscilam entre  $-9,99\text{‰}$  e  $-11,31\text{‰}$ . Os dados obtidos estão disponíveis no anexo 2. Os valores de  $\delta\text{C}^{13}$  (VPDB) apresentam pouca variação apesar de corresponderem a amostras de diferentes níveis, indicando que a formação das tufas aconteceu em condições paleoclimáticas estáveis. Estes valores oscilando perto de  $-10\text{‰}$  sugerem que a precipitação da calcita aconteceu na presença de atividade orgânica. Os valores de  $\delta\text{O}^{18}$  (VPDB) oscilando perto de  $-5\text{‰}$  indicam que a precipitação da calcita aconteceu em baixa temperatura, já que altos valores de  $\delta\text{O}^{18}$  (VPDB) indicam altas temperaturas de precipitação e vice-versa (Andrews *et al.* 1993, Zak *et al.* 2002).

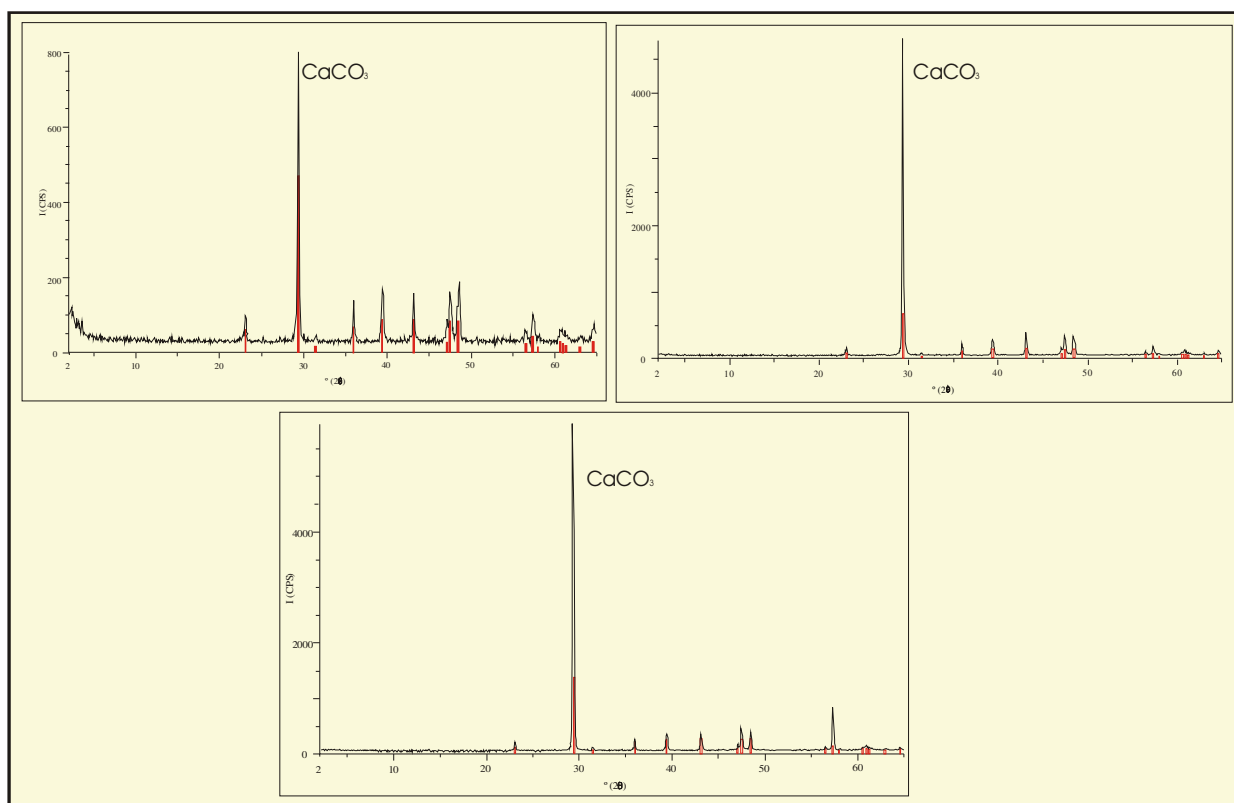


Figura 4.20 Difratomogramas de raios x onde pode ser evidenciado que a composição mineralógica fundamental das tufas é de  $\text{CaCO}_3$ .

Alguns dos valores de isótopos estáveis do calcário da Formação Jandaíra apresentados por Córdoba (2001) são comparados com os das tufas calcárias da região de Quixeré, mostrando como os processos de formação são completamente diferentes (Figura 4.21).

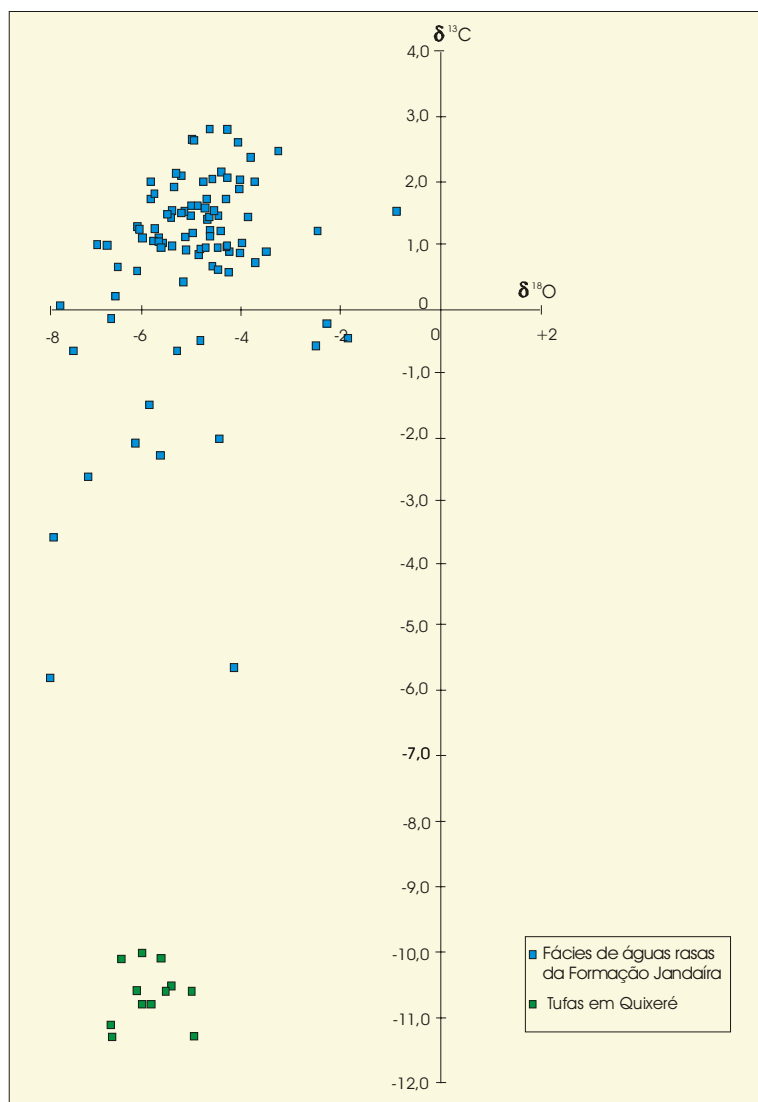


Figura 4.21 Valores de isótopos estáveis de amostras do calcário da Formação Jandaíra e das tufas calcárias de Quixeré mostrando que os processos de formação são diferentes (modificado de Córdoba 2001).

Os dois perfis GPR em Quixeré, com antenas de 100Mhz e 200Mhz, mostraram bons resultados. Em ambos o perfil levantado foi de apenas 50m com espaçamento de 0,25 m (separado por piquetes a cada 5m) devido à presença de uma cerca e da própria topografia irregular do terreno, onde afloram as tufas calcárias (Figura 4.22). Com a primeira antena foi possível investigar até aproximadamente 10m e com a antena de 200Mhz cerca de 4m. Entretanto, o radargrama obtido a partir da investigação com a antena de 200Mhz foi o que melhor representou o arcabouço geológico das tufas calcárias.



Figura 4.22 A- Vista frontal do afloramento onde foi levantado o perfil de GPR. B- Vista geral do afloramento onde pode ser ressaltado o local do perfil de GPR e a escarpa próxima.

Fazendo uma analogia com o procedimento utilizado para interpretação sísmica, após a definição das escalas (horizontal e vertical), o passo seguinte é a divisão do radargrama em discretos pacotes estratigráficos naturais. Para isto identifica-se e marca-se (por convenção com a cor vermelha) as terminações de reflexões. No caso de Quixeré, foram identificadas terminações em *onlap* e truncamento erosional (Figura 4.23). Onde as terminações mostram, de maneira consistente, uma linha no radargrama (e uma superfície em três dimensões), definida como uma superfície que na sismoestratigrafia é chamada de superfície sísmica (*seismic surface*) e aqui denominada de “superfície radar” (Figura 4.23).

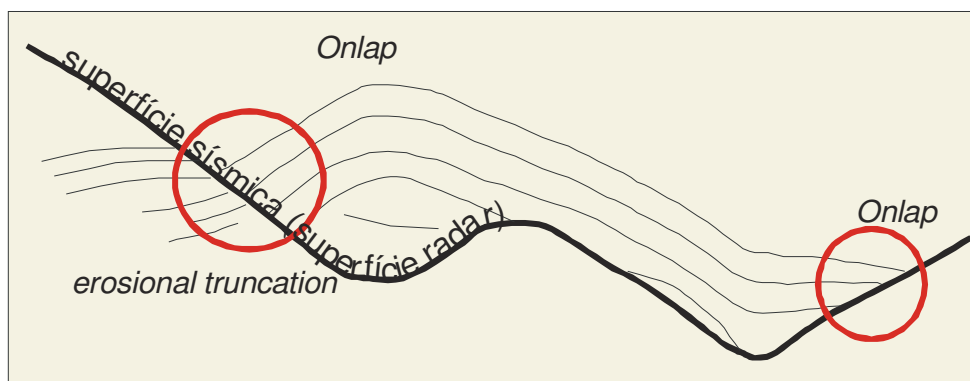
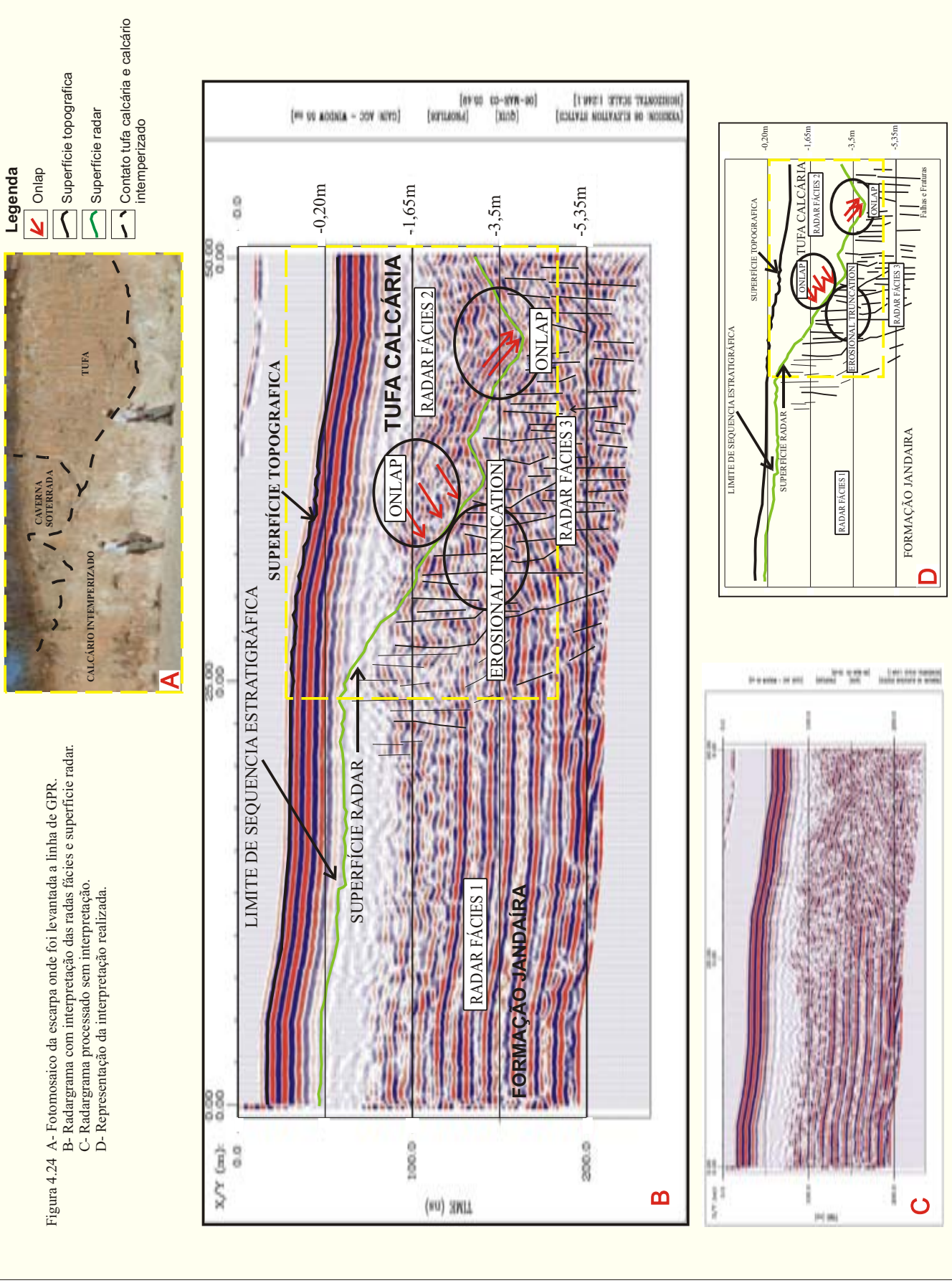


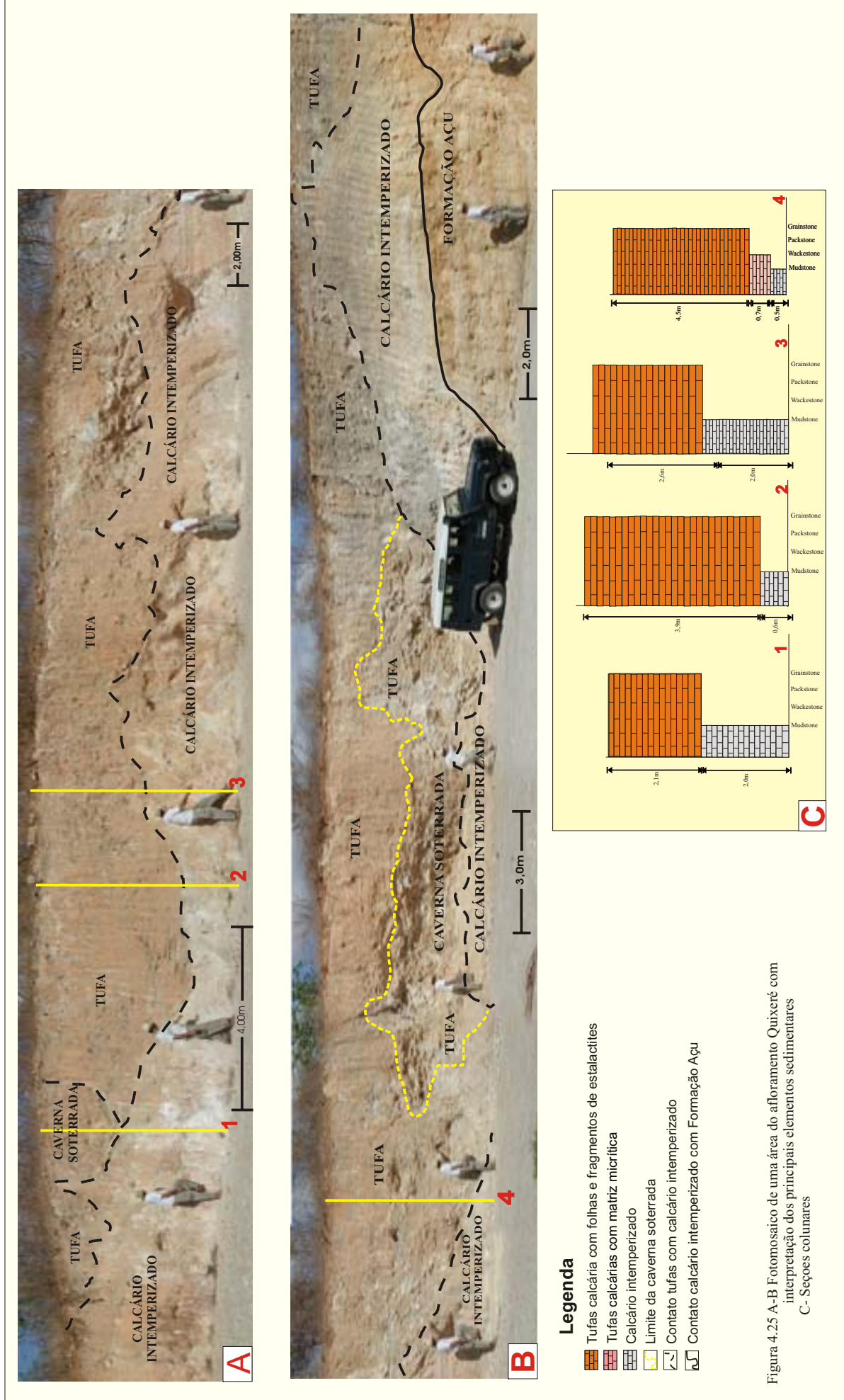
Figura 4.23 Padrões de terminações de reflexões usados na sismoestratigrafia e aqui utilizados por analogia na interpretação de radargramas.

Pelo menos três padrões de radar fácies podem ser identificados: 1) provavelmente associado às rochas de transição da Formação Açú/Jandaíra, definido por refletores planos e paralelos; 2) representado por tufas calcárias, marcado por refletores curvos, eventualmente entrecortados; 3) representados por arenitos da Formação Açú, afetados por falhas e fraturas, definido por refletores curtos, geralmente curvos e entrecortados (Figura 4.24).

A relação dos refletores, que representam as camadas de tufas, com o “refletor principal” do radargrama (antena de 200 Mhz) é marcada pela presença de terminações em *onlap*. O “refletor principal” marca o contato inferior da tufa calcária com o calcário intemperizado da Formação Jandaíra e representa uma “superfície radar”. A relação desta superfície com as camadas inferiores das formações Jandaíra e Açú é definida por terminações do tipo *erosional truncation* (Figura 4.24). A superfície aqui denominada de “principal” nada mais é do que um refletor que representa uma superfície limite de seqüências estratigráficas.

Abaixo do refletor principal, a partir da posição de 25m (tomando-se a origem a norte), nota-se a presença de refletores heterogêneos e irregulares, que podem estar relacionados com o colapso do teto de cavernas e devido a falhamentos que ocorrem próximos a posição de 30 metros do perfil. Um pouco antes da metade do perfil percebe-se uma forte inflexão desse refletor indicando o espessamento da camada de tufa calcária. O limite irregular (contato erosional que marca o limite de seqüência) da tufa com o calcário pode ser detectado da metade do perfil em diante. A geometria observada na interpretação dos fotomosaicos corresponde as tufas depositadas em pequenas cavernas, atualmente soterradas (Figura 4.25).





A investigação com a antena de 100 Mhz, também mostrou um bom resultado, entretanto, como a profundidade é maior perde-se um pouco de resolução. Como o objetivo foi comparar o radargrama com a fotomontagem percebe-se claramente que as escalas não são adequadas para comparação.

Comparando-se a fotomontagem com o radargrama de 200Mhz (Figura 4.24) pode-se perceber a boa superposição entre as feições encontradas no corte de estrada e aquelas interpretadas no radargrama. Acredita-se que poderia ainda ser maior se o perfil tivesse sido realizado mais próximo e paralelo à escarpa.

Foram observadas também a presença significativa de falhas e fraturas. Estas estruturas que afetam o depósito de tufas foram geradas por uma tectônica de gravidade, expressa por falhas normais, paralelas à escarpa da Bacia Potiguar. As falhas têm direção preferencial variando entre  $0 - 40^\circ$ , com mergulhos entre  $60^\circ - 70^\circ$ . Estas falhas formam planos caracterizados por superfícies planas a levemente onduladas, na maioria das vezes, como pares conjugados. Os rejeitos são geralmente de escala centimétrica a métrica. As falhas apresentam espessuras que variam de alguns milímetros até 25 cm e são preenchidas por calcita recristalizada. As falhas normais também separam camadas que variam de espessura ao longo do plano de falha, indicando deformação sindeposicional (Figura 4.26). O cálculo dos eixos de tensões associados às falhas, segundo o Método dos Diedros Retos, Angelier (1984), indica que o eixo sigma-1 é vertical, o eixo-sigma 2 é horizontal e tem direção aproximada de  $20^\circ$ , e o eixo-sigma 3, também horizontal, tem direção aproximada de  $300^\circ$ . A figura 4.27 apresenta pares de falhas conjugadas com direção do eixo-sigma 1 vertical. Tais dados indicam uma deformação dominada por falhas de gravidade, cuja distensão máxima (sigma 3) é aproximadamente perpendicular à direção da escarpa.

Na região de Palhano, localizada a aproximadamente 30 km a norte da área estudada, dados de mecanismo focal de terremotos indicam que a tensão máxima horizontal tem orientação aproximada  $300^\circ$  Az. Esta direção coincide com a direção da distensão máxima relacionada à tectônica que afeta a tufa, indicando que o evento tectônico que gerou os sismos e aquele que deformou a tufa são distintos.

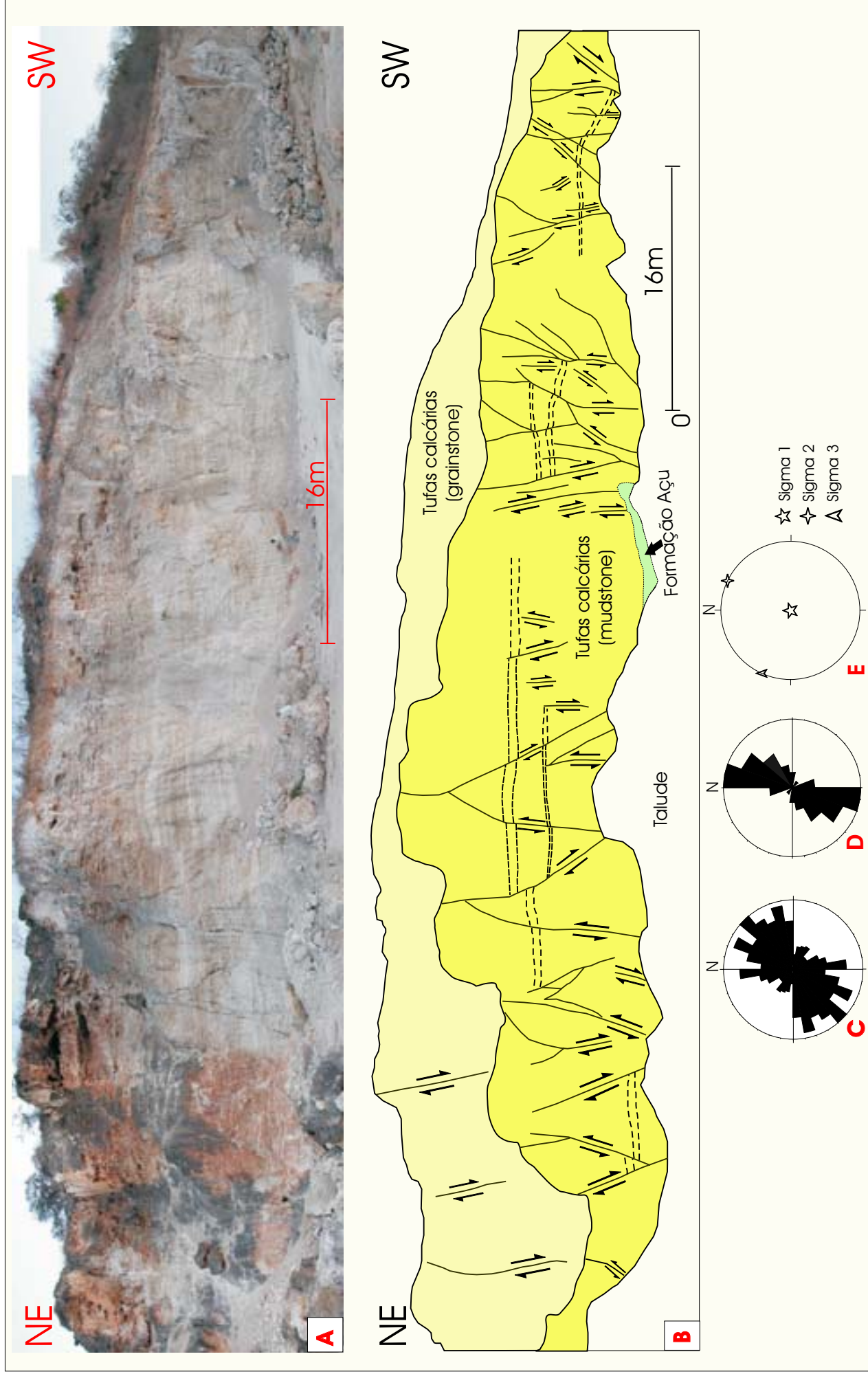


Figura 4.26 Afloramento de tufa calcária. A- Fotomosaico de uma área do afloramento Quixeré. B- Representação da interpretação realizada. C- Diagrama de roseta do alinhamento da escarpa (a roseta tem 446 medidas, cada unidade equivalente a 100m). E- Diagrama de roseta das falhas observadas no afloramento (30 medidas). F- Eixos de tensões relacionados ao evento que produziu as falhas



Figura 4.27 Pares de falhas conjugadas indicando a direção do eixo de maior esforço ( $\sigma_1$ ) vertical.

Do ponto de vista tectônico pode-se afirmar que estas tufas são compostas por rochas de comportamento plástico e sua deposição, em encostas, está relacionada com deslizamentos que ocorreram durante e posterior a sua deposição. Estes deslizamentos são acomodados por falhas normais paralelas à escarpa. Tais escarpas, por sua vez, são controladas por falhas pós-campanianas. As falhas que afetam as tufas estão, portanto, indiretamente relacionadas com as grandes zonas de falhas pós-campanianas que afetam a Bacia Potiguar (Figura 4.28).

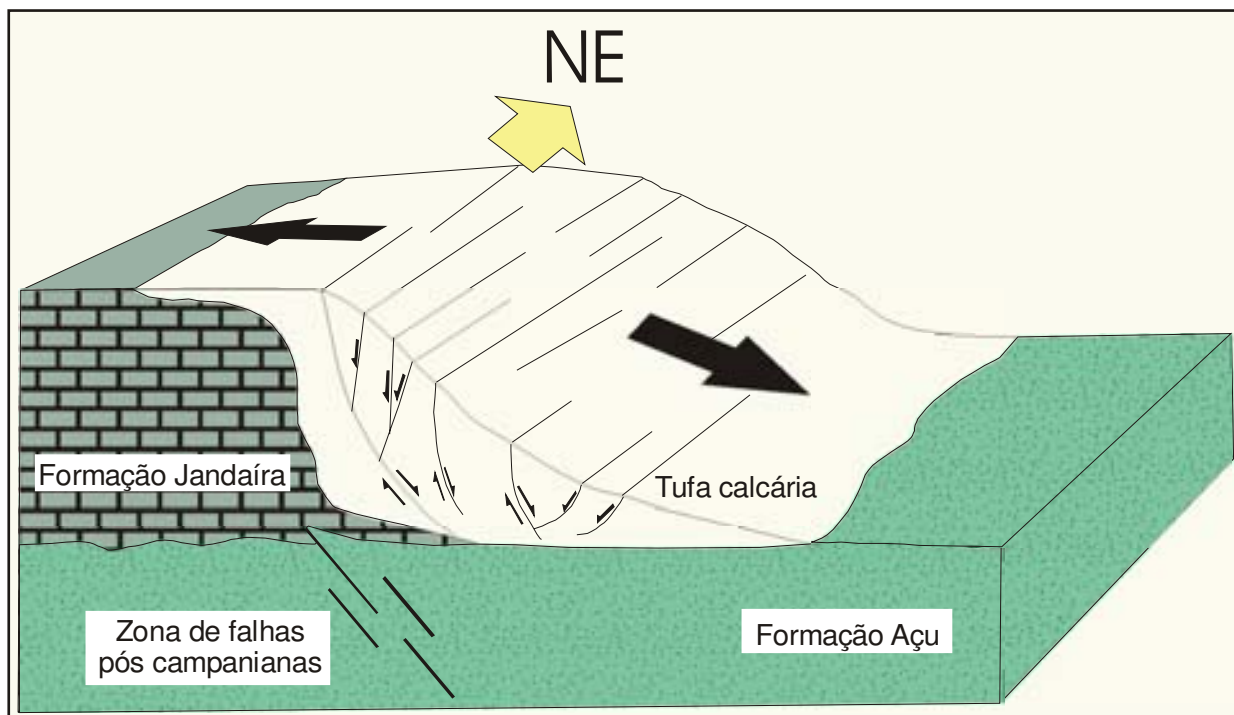


Figura 4.28 Bloco diagrama esquemático mostrando a relação entre os depósitos de tufas, escarpa da Formação Jandaíra e falhas pós-campanianas que afetam a Bacia Potiguar.

## **V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:**

---

Encontra-se aqui descritos os trabalhos realizados no desenvolvimento da presente dissertação bem com da metodologia adotada e resultados obtidos. Espera-se ao término desta dissertação ter contribuído no desenvolvimento metodológico para um melhor entendimento das geometrias dos depósitos sedimentares e contribuir para uma melhor compressão paleogeográfica do Albiano e do Quaternário da borda sudoeste da Bacia Potiguar.

Os trabalhos no afloramento Apodi, com perfis geofísicos GPR, não possibilitaram a determinação de geometrias deposicionais. A análise realizada mostrou que não existe suficiente contraste entre as propriedades físicas das rochas estudadas pelo qual recomenda-se efetuar novos levantamentos após um período de chuvas. Espera-se que a água retida no limite dos estratos possa servir de refletor e permitir assim a identificação das geometrias deposicionais.

Neste mesmo afloramento os perfis de raios gama mostraram que os maiores valores de contagem total e de potássio estão relacionados à presença de conglomerados com clastos de argilas, arenitos com seixos de argilas e argilitos e siltitos laminados. A metodologia recomendada pelo fabricante do cintilômetro aqui utilizado se mostrou pouco eficiente na correlação e detalhamento das variações das contagens totais de raios gamas. Recomenda-se que em trabalhos futuros, a aquisição de dados de raios gama siga o procedimento metodológico aqui proposto onde a amostragem é realizado sem espaçamento pré-definido dependendo das variações texturais das camadas estudadas.

Com o imageamento digital no afloramento de Apodi foram identificados sigmóides que correspondem à superposição de diferentes barras de maré, com paleocorrente preferencial para norte. Percebeu-se também a presença de laminação cruzada de pequeno porte, com sentido de paleocorrente para sul, mostrando o caráter bidirecional do fluxo.

Os trabalhos realizados no afloramento Olho d'Água da Bica, com perfis geofísicos GPR, mostraram-se de qualidade inferior, com os sinais mostrando uma intensa reverberação. Isto pode estar relacionado aos mesmos problemas verificados em Apodi acrescido do ruído originado pela reflexão da onda aérea nas paredes da trincheira onde foram realizadas as sondagens.

O levantamento de perfis de raios gama, nesse afloramento, mostrou que os picos de máxima radioatividade também apresentam uma boa correlação com os conglomerados e arenitos com clastos de argilas e pelitos. Ressalta-se os cuidados que devem ser tomados na interpretação de perfis de raios gama em poços que atravessem a zona de transição entre a Formação Açú e Jandaíra, em especial nos litótipos da Unidade Açú 4, pois caso não sejam identificadas corretamente as litologias correspondentes aos respectivos picos, podem ser feitas interpretações equivocadas.

No afloramento Olho d'Água da Bica observa-se geometrias interpretadas como migração de barras de maré, entre elas uma seqüência incompleta de *tidal bundles* limitada por superfícies de 2ª e 3ª ordens. Foram descritas camadas interpretadas como depositadas durante a ação de correntes de marés de quadratura e de maré de sizígia. Outras estruturas sedimentares como *flaser*, laminação ondulada (*wavy*), laminação lenticular (*linsen*), pares conjugados de argila (*mud couplets*) e estratificação cruzada do tipo espinha-de-peixe (*herringbone*) corroboram a interpretação de ação de correntes de marés.

Neste trabalho foi reconhecido, pela primeira vez na Bacia Potiguar, depósitos de tufas carbonáticas derivadas da Formação Jandaíra. A análise com difração de raios X e com espectrômetro de energia dispersiva acoplado (EDS) mostraram que a composição destas tufas é essencialmente carbonato de cálcio, portanto estes depósitos podem ser denominados de tufas calcárias. Os valores obtidos com a análise de isótopos estáveis de carbono e oxigênio indicam, que a formação das tufas, aconteceu em condições estáveis, e que a precipitação da calcita ocorreu num ambiente onde havia baixa temperatura e atividade orgânica.

Devido à relação estratigráfica de não conformidade com a Formação Jandaíra, de idade cretácea, as tufas carbonáticas de Quixeré possuem como idade mínima Terciário. Entretanto, tomando-se por base os moldes de folhas, supostamente Recente, que ocorrem em abundância e a topografia cárstica bem preservada, sua idade pode ser especulada como Quaternário.

A geometria deposicionais das tufas calcárias foi determinada com emprego de fotomosaicos digitais e de perfis geofísicos GPR. A geometria observada na interpretação

dos fotomosaico e no radargrama permite identificar a presença de cavernas e o contato entre as diferentes litologias.

Com o GPR foi possível determinar três padrões de radar fácies: 1) provavelmente associado às rochas de transição da Formação Açú/Jandaíra, definido por refletores planos e paralelos, 2) representado por tufas calcárias, marcado por refletores curvos, eventualmente entrecortados; 3) representados por arenitos da Formação Açú, afetados por falhas e fraturas, definido por refletores curtos, geralmente curvos e entrecortados.

Foi determinado um “refletor principal” o qual marca o contato inferior da tufa calcária com o calcário intemperizado da Formação Jandaíra, aqui denominado de “superfície radar” e que representa uma superfície Limite de Seqüências. A relação desta superfície com as camadas inferiores das formações Jandaíra e Açú é definida por terminações do tipo *erosional truncation*.

Do ponto de vista tectônico, o estudo das falhas e fraturas permite identificar o campo de tenções atuante e a causa da deformação das tufas. Pode-se afirmar que as estruturas frágeis que ocorrem nas tufas estão relacionadas a deslizamentos que ocorreram durante e posterior a sua deposição. Estes deslizamentos são materializados por falhas normais paralelas à escarpa, controladas provavelmente por falhas pós-campanianas. As falhas que afetam as tufas estão, portanto, indiretamente relacionadas com as grandes zonas de falhas pós-campanianas que afetam a Bacia Potiguar.

Recomenda-se, para uma completa caracterização das tufas calcárias, a realização de trabalhos de mapeamento em escala de detalhe dos diferentes afloramentos, estudos petrográficos, datação com método U/Th, bem como perfis geofísicos 3D com GPR.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

---

- Aigner T., Shauer M., Junghans W.D., Reinhardt L. 1995. Outcrop gamma-ray logging and its applications examples from the German Triassic. *Sedimentary Geology*, **100**: 47- 61
- Anderton R.1985. Clastic fácies models and analysis. In: P.J. Brenchley, B.P.J. Williams (eds.). Recent developments and Applied Aspects. Geological Society. Blackwell Scientificic Publication, Oxford, 31-47.
- Andrews J.E., Riding R., Dennis P.F. 1993. Stable isotopic compositions of Recent cyanobacterial carbonates from the British Isles: local and regional environmental controls. *Sedimentology*, 40: 303-314
- Andrews J.E., Pedley H.M., Dennis P.F. 1994. Stable isotope record of a palaeoclimate change in a British Holocene tufa. *Holocene*, **4**: 349-355.
- Andrews J.E., Riding R., Dennis P.F. 1997. The stable isotope of environmental and climatic signals in modern terrestrial microbial carbonates from Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **129**:171-189
- Andrews J.E., Pedley M., Dennis P.F. 2000. Palaeoenvironmental records in Holocene Spanish tufas: a stable isotope approach in search of reliable climatic archives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **47**:961-978
- Angelier, J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, **89**(B7): 5835-5848.
- Annan A. P. 1992. Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors and Software incorporated, Mississauga, Ontario, 150 p.
- Annan A.P., Cosway S.W. 1994. GPR frequency selection. In: Internacional Conference on Ground Penetrating Radar, Notario. Proceedings, Ontario, **5**:747-760
- Arnot M.J., Good T. R., Lewis J.J. 1997. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale outcrop data. AAPG Bulletin, **67**(5):984-987
- Apoluceno D.M. 1995. Faciologia e sistemas deposicionais das formações Açú e Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, na região de Apodi, RN. Departamento de Geologia, UFRN, Rio Grande do Norte, Relatório de Graduação, 139 p.
- Araripe P.T., Feijó F.J. 1994. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da PETROBRÁS. Rio de Janeiro, **8**(1):127-141.
- Auler A.S., Smart P.L. 2001. Late Quaternary Paleoclimate in Semiarid Northeastern Brazil from U-Series Dating of Travertine and Water-Table Speleothems. In: *Quaternary Research*, **55**: 159-167
- Bagnoli E. 1992. The Mossoró sandstone, Canto do Amaro oil field, Late Cretaceous of the Potiguar Basin, Brazil: An example of a Tidal Inlet-Channel reservoir. In: E. G. Rhodes, T. F. Moslow (eds.), Marine clastic reservoirs: examples and analogues, 183- 199
- Bagnoli E., Farias P. R. C. 1989. Roteiro da excursão à Bacia Potiguar emersa. PETROBRÁS/DEPEX/DEBAR, Natal, Relatório Interno, 10p.
- Bagnoli E., Farias P. R. C., Spadini A.R., Córdoba V.C. 1994. Estruturas sedimentares diagnósticas de marés em arenitos e calcários da Bacia Potiguar, Brasil. In: IAS, International Sedimentological Congress, 14, Recife, *Anais*, E10- E12

- Barton M., Angle E., Yeh J., Carrasco B.N. 1995. Characterization of heterogeneity style and permeability structure in fluvial reservoirs. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin (Relatório Final, contrato nº 65020321931), 42p.
- Becker M.R., Carrasco B.N., Socorro M., Faria P.R.C. 1992. Estudos de afloramentos para modelagem geológica e geoestatística do reservatório fluvial da Formação Açú, Bacia Potiguar. In: Seminário de Geologia de Desenvolvimento e Reservatório, 5, Rio de Janeiro, 1992. *Atas*, Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX-CENPES.
- Beres M., Green A., Huggenberger P., Horstmeyer, H. 1995. Mapping the architecture of glaciofluvial sediments with three-dimensional georadar. *Geology* **23**:1087–1090
- Bertani R.T., Costa I.G., Matos R.M.D. 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e “habitat” do petróleo na Bacia Potiguar. In: G. P. R. Gabaglia, E.J. Milani, (eds). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobrás, p.291-310
- Bridge J.S., Collier R.E.L., Alexander J. 1998. Large-scale structures of Calamus River deposits (Nebraska, U.S.A.) revealed using ground-penetrating radar: *Sedimentology*, **45**:977-986
- Bristow C.S. 1995. Internal geometry of ancient tidal bedforms revealed using ground penetrating radar. In: *Tidal Signatures in modern and ancient sediments*, Spec. Publ. Int. Ass. Sediment **21**:313-328
- Bristow C.S., Chroston P.N., Bailey S.D. 2000. The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: insights from ground penetrating radar surveys, Norfolk, UK. *Sedimentology*, **4**:923-944
- Câmara G. Souza R.C.M., Freitas U.M., Garrido J. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. *Computers & Graphics*, **20**: (3) 395-403.
- J. C. Castro, S. L. Barrocas, 1981. Roteiro de Campo, Fácies da Formação Açú, Bacia Potiguar. PETROBRÁS/CEPES, Rio de Janeiro Relatório Interno, 32p.
- Caracuel J.E., Cardenal J., Delgado-Garcia J., Garcia-López S. 2000. A simple photogrammetric method to improve quantitative image analysis in geoscience's research. *Journal of Sedimentary Research*, **70** (2):1337-1340
- Castro J.C. 1992. Facies, reservoirs and stratigraphic framework of the Mossoró Member (Latest Cenomanian- Earliest Turonian) in Potiguar Basin, NE Brazil: an example of a Tide and Wave dominated Delta. In: E. G. Rhodes, T. F. Moslow (eds.), *Marine clastic reservoirs: examples and analogues*, p.161- 182
- Castro J.C., Barrocas S.L.S., 1981. Roteiro de campo: fácies da Formação Açú, Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CEMPES. 30p, Relatório Interno 673-2256
- Córdoba V.C. 2001. A Evolução da Plataforma Carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: Análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Tese Doutorado, 239 p.
- Córdoba V.C., Castro J.C 1998. Parasequence types and high frequency sequences of the Lower and Intermediate Jandaíra Formation , Late Cretaceous of Potiguar Basin. In: *Internacional Sedimentological Congress*, 15, Alicante, Espanha, *Anais*, 270-272
- Córdoba V.C., Spadini A.R., Bagnoli E. 1994. Lajedo de Soledade, Bacia Potiguar: um exemplo de sedimentação carbonática sob influência de marés. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 38, Camboriú, *Anais*, 3: 293-295

- Córdoba V.C., Cruz Júnior F.W. 1996. Sistemas deposicionais transgressivos como registro inicial da sedimentação carbonática Jandaíra, Bacia Potiguar, na região de Felipe Guerra, RN. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 39, Salvador, *Anais*, 1:322-324
- Crosta A.P. 1993. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, ed. Rev. Campinas, SP, 170 p.
- Crosta A.P., Moore J. M. 1989. Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain, *International Journal of Remote Sensing*, **10** (3):505-514
- Darnley A.G., 1991. The development of airborne gamma-ray spectrometry: case study in technological innovation and acceptance; *Nuclear Geophysics*, **5**(4):377-402
- Darnley A.G., Ford K.L., 1989. Regional airborne gamma-ray surveys: a review; in *Proceedings of Exploration '87: Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater*, (ed.) G.D. Garland, Ontario Geological Survey, **3**:229-240
- Davis J.L., Annan A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, **37**:531-551
- Drury S.A., 1993. *Image Interpretation in Geology*, Chapman & Hall, London, second edition, 283 p.
- Duarte L., Vasconcelos M.E.C. 1980a. Vegetais do Quaternário do Brasil. I – Flórua de Russas, CE. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **52**(1): 37-48.
- Duarte L., Vasconcelos M.E.C. 1980b. Vegetais do Quaternário do Brasil. II – Flórua de Umbuzeiro, PB. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **52**(1): 93-108
- Esteban M., Klappa. 1983. Subaerial exposure environments. In: P.A. Scholle, D.G. Bebout, C.H. Moore (eds.), *Carbonate Depositional Environments*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa, OK, **33**:1- 96
- Farias P.R.C., CASTRO J.C., Tibana P; Barrocas S. L. S. 1990. Cretáceo da Bacia Potiguar - Roteiro de excursão. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 36, Natal, *Anais*, 43 p. (Separata).
- Folk R.L. 1993. SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks. *Journal of sedimentary Petrology*, **63**(5): 990-999
- Ford T.D., Pedley H.M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, **41**:117-175
- Françolím J.B.L., Sztamari P., 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Rev. Bras. Geociências*, **17**(2): 196-207
- Gawthorpe R.L.; Collier R.E.L, Alexander J., Bridge J.S., Leeder M.R. 1993. Ground penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies, in C. P. North and D. J. Prosser, eds., *Characterization of fluvial and aeolian reservoirs: Geological Society Special Publication* **73**:421-432
- Gil J.A. 1997. Estratigrafia e Análise Paleoambiental da Plataforma Carbonática Jandaíra; Turoniano-Campaniano da Porção Centro-Oeste da Bacia Potiguar. *Geociências*, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, 146 p.
- Gross W.H. 1952. Radioactivity as a guide to ore. *Economic Geology*, **47**: 772-742
- Guo L., Riding R. 1994. Origin and diagenesis of Quaternary travertine shrub fabrics, Rapolano Terme, central Italy. *Sedimentology*, **41**:499-520
- Harari Z. 1996. Ground Penetrating Radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *J. Appl. Geophys*, **36**:43-52

- Heimann A., Sass E. 1989. Travertines in the northern Hula Valley, Israel, *Sedimentology*, **36**: 95-108
- Hennig G.J., Grun R., Brunnacker K., 1983. Speleothems, travertines and paleoclimates. *Quaternary. Research*, **20**:1-29
- Herman J.S., Lorah M.M. 1987. CO<sub>2</sub> outgassing and calcite precipitation in falling spring creek, Virginia, U.S.A. *Chemical Geology*. **62**:251-262
- Hoefs, J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*. 4ed., Berlin: Springer-Verlag, 201p.
- Horvatincic N., Bronic I.K. Obelic B. 2003. Differences in the <sup>14</sup>C age, δ<sup>13</sup>C and δ<sup>18</sup>O of Holocene tufa and speleothem in the Dinaric Karst. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, article in press*, 3030:1-19
- Huggenberger P. 1993. Radar facies: recognition of facies patterns and heterogeneity estimation Pleistocene Rhine gravel, NE Switzerland . In: J. Best, C. Bristow (eds.) *Braided Rivers: Form, Processes and Economic Application*. Geol. Soc. London Spec. Publ. **75**:163–176
- Huggenberger P. Meier E., Beres M. 1994. Three-dimensional geometry of fluvial gravel deposits from GPR reflection patterns: A comparison of results of three different antennae frequencies. *Proc. Fifth Int. Conf. on Ground Penetrating Radar*, Kitchener, Ont., p. 805–816
- Jackson M.D., Muggeridge A.H., Yoshida S., Johnson H.D. 2000. Quantification of Heterogeneities in tidal sandstone reservoirs and their impact on recovery. *Reservoir Engineering*. Final Report for FORCE consortium. **2**:111 p.
- Jackson M.D., Yoshida S., Johnson, H.D., Muggeridge A.H., Naess A., Ringrose P., 1999. Three-Dimensional reconstruction and upscaling of complex bedform-scale Sedimentary Structures within tidal sandstone reservoirs. In: (T. Hentz, L. Wood, (eds.), *Advanced Reservoir Characterization for the 21st Century*. GCS-SEPM Special Publication.
- Johnson H.D., Muggeridge A.H., Jackson M.D., Yoshida S., 1999. Quantification of heterogeneities in tidal sandstone reservoirs and their impact on recovery. *Interim Report II for FORCE consortium*. 158 p.
- Jordan D.W., Slatt R.M., Gillespie R.H., D'Agostino, Stone, C.G. 1993. Gamma-ray loggings of outcrops by a truck-mounted sonde. *AAPG Bulletin*, **77**:118-123
- Jordan D.W., Slatt R.M., Gillespie R.H., D'Agostino A.E., Scheiling M.H. 1991. Applications of outcrop gamma-ray logging to field development and exploration. In: R. Sneider *et al.* (eds). *The integration of geology, geophysics, petrophysics, and petroleum engineering in reservoir delineation, description and management: Proceedings of the First Archie Conference, AAPG, Tulsa, Oklahoma*, p. 104-122
- Julia R. 1983. Travertines. In: P.A. Scholle, D.G. Bebout, C.H. Moore (eds), *Carbonate Depositional Environments*. American Association Petrol. Geology. Mem., **33**: 64-72
- Killeen P.G., 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration - application and interpretation; in *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*, (ed.) P.J. Hood, Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, p. 163-230.
- Kreidler W.L., Andery P.A. 1949. Mapa Geológico da área sedimentar costeira do estado do Rio Grande do Norte e parte do Ceará. Rio de Janeiro, Conselho Nacional do Petróleo. p. 86-90. Inédito.

- Lanzarini W.L. 1995. Modelos e simulações de fácies e seqüências sedimentares fluviais e eólicas de reservatórios petrolíferos. Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 205p.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. 1994. Remote Sensing and image interpretation, John Wiley & Sons, Inc. New York, 3<sup>rd</sup> edition, 750 p.
- Lima Filho F.P., Martinelli A.E., Silva A.R. 2002. Microscópio Eletrônico de Varredura XL 30 ESEM: Usos e Aplicações In: SBG, Congr. Bras. Geol., 41, João Pessoa, *Anais*, 1, p.161
- Lima Neto F.F. 1985. Magmatismo pós-paleozóico na Bacia Potiguar – Comentários sobre informações disponíveis. Natal, PETROBRÁS. Relatório Interno.
- Lorah M.M., Herman J.S. 1988. The chemical evolution of a travertine-depositing stream: geochemical processes and mass transfer reactions. *Water Resources Researches*, **24**: 1541-1552
- Magnin F., Guendon J.L., Vaudour J., Martin P. 1991. Les travertins; accumulatioes carbonatées associes aux systems karstiques, sequences sedimentaires et paleoenvironments quaternaires. *Bulletin de la Société Geologique de France*, **162**: 585-594.
- Matos R.M.D. 1987. Sistema de riftes cretáceos do NE brasileiro: In Seminário de Tectônica da PETROBRÁS, 1. Rio de Janeiro. *Atas*, 125-159
- Matos R.M.D. 2000. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. In: W. Mohriak, M. Talvani (ed.) *Atlantic Rifts and continental margins*. American Geophysical Union, Geophysical Monography, **115**:331-354
- Matsuda N.S. 1988. Caracterização petrográfica, mineralógica e paleoambiental da anomalia radioativa associada às rochas carbonáticas do Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, Rio Grande do Norte, Brasil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de mestrado, 131p.
- Matsuda N.S., Viviers M.C. 1989. Caracterização do Marco Radioativo da parte superior da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar. In: SBP, Congr. Bras. Paleontologia, 11, *Anais*, 1029-1041
- Mayer E. 1974. Estratificação preliminar na Plataforma Continental da Bacia Potiguar, Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. Relatório Interno.
- Mcmechan G.A., Gaynor G.C., Szerbiak R.B. 1997. Use of ground-penetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoir analogs. *Geophysics* **62** (3): 786-796
- Menezes L., Lima Filho F.P., Reyes Y. A., Gauw, D.S. 2002. Arquitetura de fácies de depósitos fluviais da Formação Açu (Unidade Açu 3), Bacia Potiguar-RN, In: SBG, Congr. Bras. Geol., 41, João Pessoa, p 666.
- Miall A.D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Reviews*, Amsterdam, **22**:261 – 308
- Miall A.D., 1988. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstone- lessons from outcrop studies. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Tulsa, **72**:682-697
- Miall A.D., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*, 1ed., New York, 582p.
- Mizuzaki A.M.P. 1987. A Formação Macau, Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, Relatório interno.

- Moeri E.N. 1979. Microfacies and sedimentary environment of na Upper Cretaceous mini- basin near Macau, Rio Grande do Norte, Brasil. *Rev. Bras. Geociências*, **9**(1):60-70
- Monteiro M., Farias R. 1990. Formação Jandaíra. In: Projeto Potiguar. PETROBRÁS / CENPES / DIRNOE/ DEBAR. 7p. Relatório interno.
- Morley L.W. 1969. Regional geophysical mapping; in *Mining and Groundwater Geophysics 1967*, edited by L.W. Morley, Geological Survey of Canada, Economic Geology Report **26**:249-258
- Mosham R.M., Foote R.S., Bunker C.M., 1965. Gamma ray spectrometer studies of hydrothermally altered rocks, *Economic Geology*, **60**:653-671
- Murton J.B., Baker A., Bowen D.Q., Caseldine C.J., Coope G.R., Currant A.P., Evans J.G., Field M.H., Green C.P., Hatton J., Ito M., Jones R.L., Keen D.H., Kerney M.P., McEwan R., McGregor D.F.M., Parish D., Robinson J.E., Schreve D.C., Smart P.L. 2001. A late Middle Pleistocene temperate-periglacial-temperate sequence (Oxygen Isotope Stages 7-5e) near Marsworth, Buckinghamshire, UK. *Quaternary Science Reviews*, **20**:1787-1825
- Nalbant S.S., Alptekin O. 1995. The use of Landsat Thematic Mapper imagery for analysing lithology and structure of Korucu-Dugla area in wertern Turkey, *International Journal of Remote Sensing*, **16**(13): 2357-2374
- Neal A., Roberts C.L. 2000. Applications of ground-penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments. In: K. Pye, J.R.L. Allen, (eds.), *Coastal and Estuarine Environments: Sedimentology, Geomorphology and Geoarchaeology*. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. **175**: 139-171
- North C.P., Boering M. 1999. Spectral Gamma Ray Logging for Facies Discrimination in Mixed Fluvial-Eolian Sucessions: A Cautionary Tale. *AAPG Bulletin*, **83**(1):155-169
- Oliveira Júnior J.G. 2001. Dois testes de imageamento com GPR em problemas de Controle Ambiental em regiões tropicais: migração de dunas e localização de dutos de óleo enterrados. Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dissertação de Mestrado, 56p.
- Oliveira L.D.D. 1980. Aspectos macropaleontológicos e sedimentológicos dos calcários de governador Dix-Sept Rosado, RN, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Dissertação de Mestrado, 220p.
- Ordoñez S., Garcia del Cura, M.A. 1983. Recent and Tertiary fluvial carbonates in Central Spain. *Special Publication International Association Sedimentology*, **6**: 485-497
- Ordoñez S., Gonzales-Martin J.A., Garcia del Cura M.A. 1986. Sedimentación carbonatica actual y paractual en las Lagunas de Ruidera. *Rev. Mat. Proc. Geol. Univ. Complutense, Facultad Ciencias Geologicas*, **4**:229-255
- Pazdur A., Pazdur M.F., Starkel L., Szule J., 1988. Stable isotopes of Holocene Calcareous tufa in southern Poland as paleoclimatic indicators. *Quaternary Research*, **30**:177-189
- Pedley H.M., 1990. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sedimentary Geology*, **68**:143-154

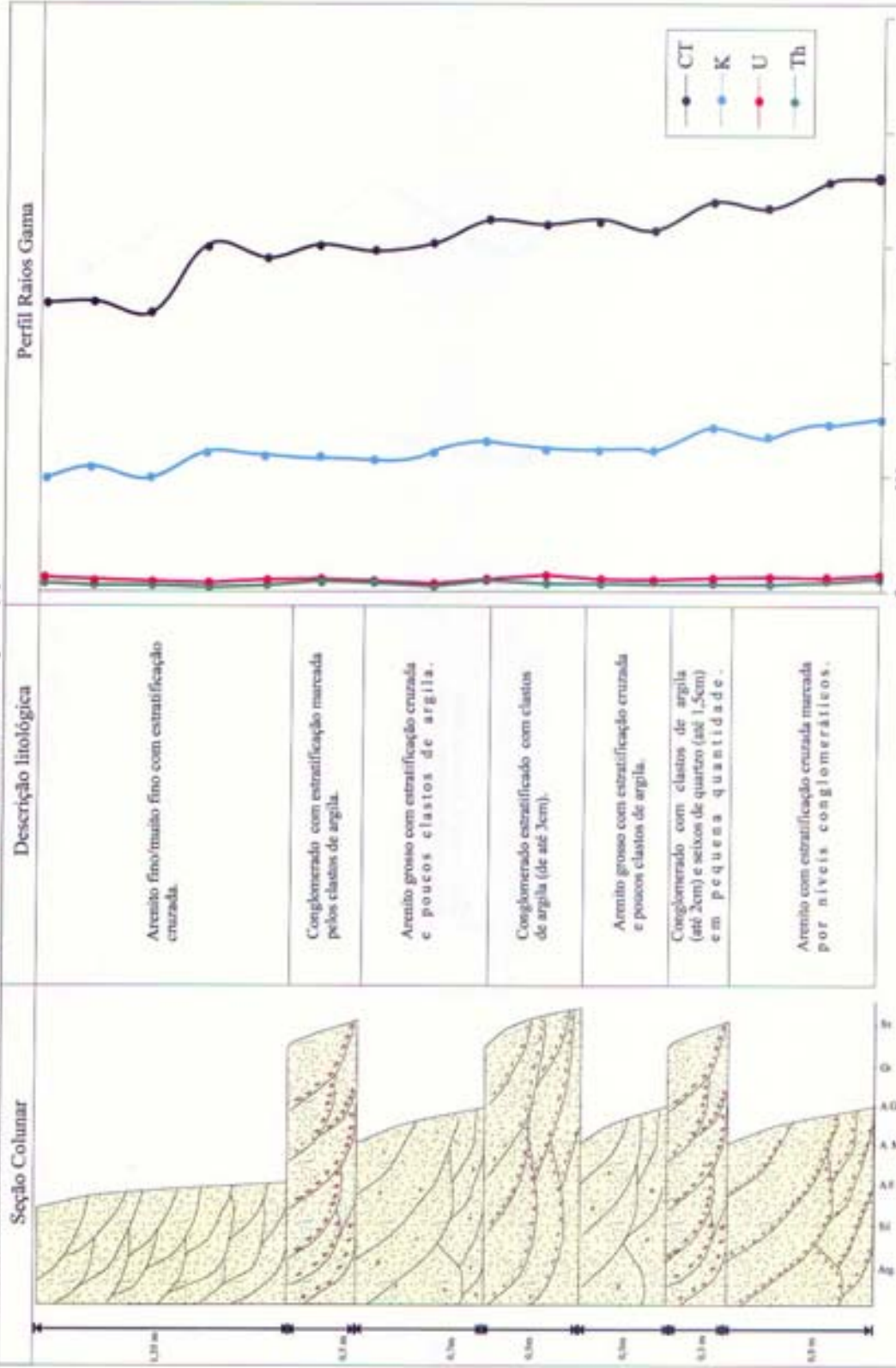
- Pedley H. M., Hill I., Denton P., Brasington J. 2000. Three-dimensional modelling of a Holocene tufa system in the Lathkill Valley, north Derbyshire, using ground-penetrating radar. *Sedimentology*, **47**:721-737
- Pentecost A. 1996. The quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor. *Quaternary Science Reviews*, **14**:1005-1028
- Porsani J.L., Rodrigues A.R. 1995. O Método GPR Aplicado à Caracterização de Reservatórios: Um Exemplo no Afloramento Açú – Bacia Potiguar – RN. In: 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. 1º Conferência da União Latino-Americana de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil, 843-845
- Porsani J.L., 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, São Paulo, Tese de Doutorado, 145p.
- Porsani J.L., Hiodo F.Y., Elis V.R. 2001. Investigações geofísicas em rochas graníticas no Município de Itu, São Paulo, Brasil. In: 7º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Salvador, Bahia.
- Porsani J.L. 2002. Método GPR: Aplicações em geologia, geotecnia, médio ambiente e planejamento urbano, IV Escola de Verão de Geofísica. IAG- Universidade de São Paulo. Apostila de curso.
- Pratt B.R., Miall A.D. 1993. Anatomy of a bioclastic grainstone megashoal (Middle Silurian, southern Ontario) revealed by ground-penetrating radar: *Geology*, **21**:223-226
- Regali M.S.P., Gonzaga S.M. 1985. Palinocronoestratigrafia da Bacia Potiguar, Rio Grande do Norte, Brasil. In: D.A. Campos et al(ed.), Coletânea de trabalhos paleontológicos, Brasília, 443-460, (Série Geologia, 27)
- Regali M.S.P., Uesugui N., Santos A.S. 1974. Palinologia dos sedimentos Mesozoicos do Brasil(II). *Boletim Técnico da PETROBRÁS*, **17**(4): 263-301
- Reynolds J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley, Chichester.
- Reyes Y.A., Lima Filho, F.P., Appi, C.J., Menezes L., Araujo V.D. 2002. Estudo de Afloramentos Análogos a Reservatórios Influenciados pela ação de correntes de maré na Bacia Potiguar. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 41, João Pessoa, *Anais*, 1, p.671
- Reyes Y. A., Bezerra F.H.R., Lima Filho F.P. 2003. Falhas de Gravidade em Tufas Calcárias na Bacia Potiguar, NE do Brasil. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos (SNET), Armação de Búzios, Rio de Janeiro, 9, inédito.
- Ribeiro F.B., Roque A., Boggiani P.C., Flexor J.M. 2001. Uranium and Thorium series disequilibrium in Quaternary carbonate deposits from the Serra da Bodoquena and Pantanal do Miranda, Mato Grosso do Sul State, Central Brazil. *Applied Radiation and Isotopes*, **54**(1):153-173
- Sampaio A.V., Schaller H. 1968. Introdução à Estratigrafia da Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, *Boletim Técnico PETROBRÁS*, **11**(1):19-44
- Sancho C., Pena J.L., Melendez A. 1997. Controls on Holocene and present-day travertine formation in the Guadalaviar river (Iberian Chain, NE Spain). *Z. Geomorph*, **3**(41):289-307
- Shives R.B.K., Charbonneau B.W., Ford K.L. 1997. The detection of potassic alteration by gamma ray spectrometry- recognition of alteration related to mineralization. In:

- "Geophysics and Geochemistry at the Millenium", Proceedings of the Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration (Exploration 97). Toronto, Canadá, 1100 p.
- Sikka D.B., 1962. Aero-gamma ray spectrometer aids in the detection of faults; Research Bulletin of the Panjab University, Parts I-II, **13**: 91-102
- Silva A.C. 1966. Considerações sobre o Quaternário do Rio Grande do Norte. Natal, UFRN. Arq. Inst. Antropol., **2**( ½): 275-301
- Silva A.O., Abrahão D., Santos M.B., 1994. Estratigrafia de seqüências do Cenomaniano Superior-Turoniano Inferior da Bacia Potiguar. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 38, Camboriú, *Anais*, 590-592
- Slatt R.M., Borer J.M., Horn B.W., Al-Siyabi H.A., Pietraszek S.R. 1995. Outcrop gamma-ray logging applied to subsurface petroleum geology. *Mountain Geologist*, **32**:81-94
- Souza S.M. 1982. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 33, Salvador, *Anais*, **5**: 2392-2406
- Suguo K 1992. Dicionário de Geologia Marinha, São Paulo. Ed. T.A. Queiroz , 171p.
- Svendsen J.B., Hartley N.R. 2001. Comparison between outcrop-spectral gamma ray logging and whole rock geochemistry: implications for quantitative reservoir characterization in continental sequences. *Marine and Petroleum Geology* **18**:657-670
- Tibana P., Terra G.J.S. 1981. Seqüência carbonáticas do Cretáceo da Bacia Potiguar. Rio de Janeiro, Bol. Técnico PETROBRÁS, **24**(3):174-183.
- Van Der Meer F., Vazquez-Torres M., Van Dijk P.M. 1997. Spectral characterization of ophiolite lithologies in the Troodos Ophiolite complex of Cyprus and its potential in prospecting for massive sulphide deposits, *International Journal of Remote Sensing*, **18**(6):1245-1257
- Van Overmeeren R.A. 1998. Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics*, **40**:1-18
- Vasconcelos E.P., Lima Neto F.F., Roos S. 1990. Unidades de correlação da Formação Açú, Bacia Potiguar. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 36, Natal, *Anais*, **1**: 227- 240
- Viviers M.C., Regali M.S.P. 1987. Estudo Paleoambiental preliminar do Cretáceo da Bacia Potiguar. *Rev. Bras. Geociências*, **17**(2):123-130
- Viviers M.C., Nascimento N.L., Ritcher A.J., Shimabukuro S., Dino R., Telles Jr A.S., Moura J.A. 1992. Texto explicativo da Carta Bioestratigráfica da Bacia Potiguar. In: G. Beurlen (ed.), Bioestratigrafia das bacias mesozóicas-cenozóicas brasileiras, Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/ SUPED/DIVEX/SEBIPE, Bacia Potiguar a Foz do Amazonas, **2**:337-408
- Viles H. A., Goudie A.S. 1990. Tufas, travertines and allied carbonate deposits. *Progress in Physical Geography*, **14**:19-41
- Yoshida S., Jackson M.D., Johnson H. D., Muggeridge A. H., Martinius A. W. 2001. Outcrop Studies of tidal sandstones for reservoir characterization (Lower Cretaceous Vectis Formation, Isle of Wight, Southern England). In: *Sedimentary Environments Offshore Norway- Paleozoic to Recent*; Martinsen, O., and Dreyer, T., (eds.). Norwegian Petroleum Society, Special Publication, **10**:233- 257
- Yoshida S., Johnson H. D., Gupta R., Martinius A. W. 1999. Outcrop Studies of Lower Cretaceous Tidal Sand Bodies for Reservoir Characterization of the Tilje Formation

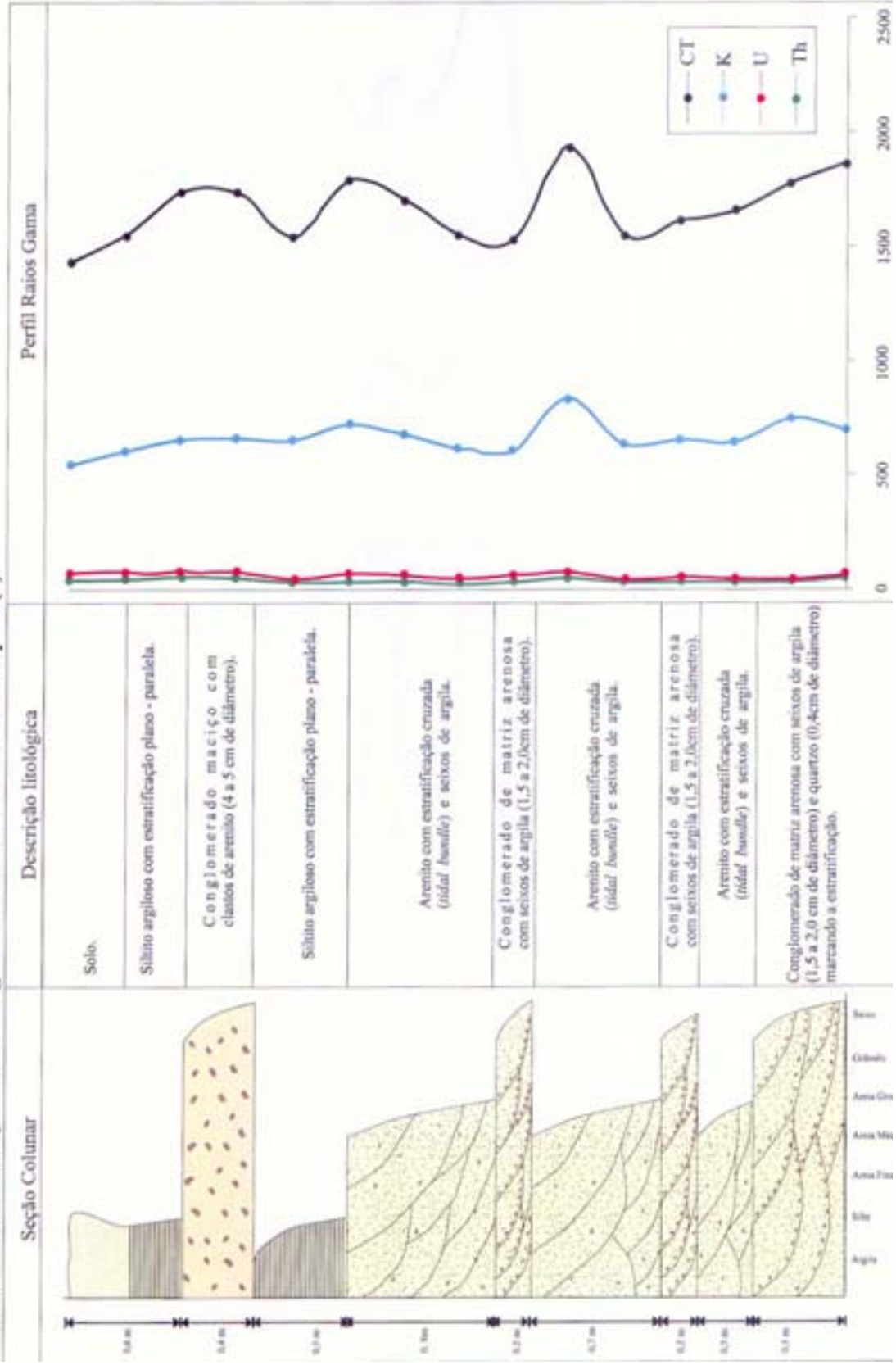
- (Lower Jurassic), offshore Mid-Norway. In: (T. Hentz, and L. Wood, Eds), Advanced Reservoir Characterization for the 21st Century. GCS-SEPM Special Publication (in CD-ROM).
- Yoshida S., Johnson H.D., Jackson, M. D., Muggeridge, A. H., 2000, Quantification of Heterogeneities in Tidal Sandstone Reservoirs and Their Impact on Recovery. Volume I: Reservoir Geology. Final Report for FORCE consortium. 114 p.
- Walker R. G., 1984. Facies Models, Geosciences Canada, Reprint Series 1. Canada. p.316
- Wanderley M.D. 1987. Estudo de uma seção cretácica da Bacia Potiguar com base em nanofósseis calcários, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 162p.
- Wanderley M.D. 1996. Interpretações cronoestratigráficas e paleoecológicas na Formação Jandaíra – Parte emersa (Cretáceo Superior da Bacia Potiguar), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 158p.
- Weijermars R., Mulder-Blanken C. W., Wiegers J., 1986. Growth rate observation from the moss-built Checa travertine terrace central Spain. *Geol. Mag.*, **123**: 279-286.
- Willis B. J., White C.D. 2000. Quantitative outcrop data for flow simulation. *Journal of Sedimentary Research*, **70**(4):788- 802
- Willis B.J., Gabel S. L., White C. D. 2001. Sharp-based, tide-dominated, delta deposits of the Sego sandstone, Book Cliffs, Utah. *AAPG Annual Meeting Abstracts Volume*.
- Woldai T., 1995. Lithologic and structural mapping in a vegetated low-relief terrain using multiple-source remotely sensed data: a case study of the Calañas area in southwest Spain, *ITC Journal*, **2**:95-114
- Wright V.P., Tucker M.E., 1991. Calcretes: an introduction. In: V.P. Wright, M.E. Tucker, (eds.), Calcretes, IAS Reprint Series, Blackwell, Oxford, **2**:1– 22
- Zak K., Vojen L., Kadlec J., Hladikova J., Cílek V. 2002. Climate-induced changes in Holocene calcareous tufa formations, Bohemian Karst, Czech Republic. In: *Quaternary International*, **91**: 137–152

**ANEXO 1**

**Seção colunar com perfil de raios gama levantada no Afloramento Apodi (1)**

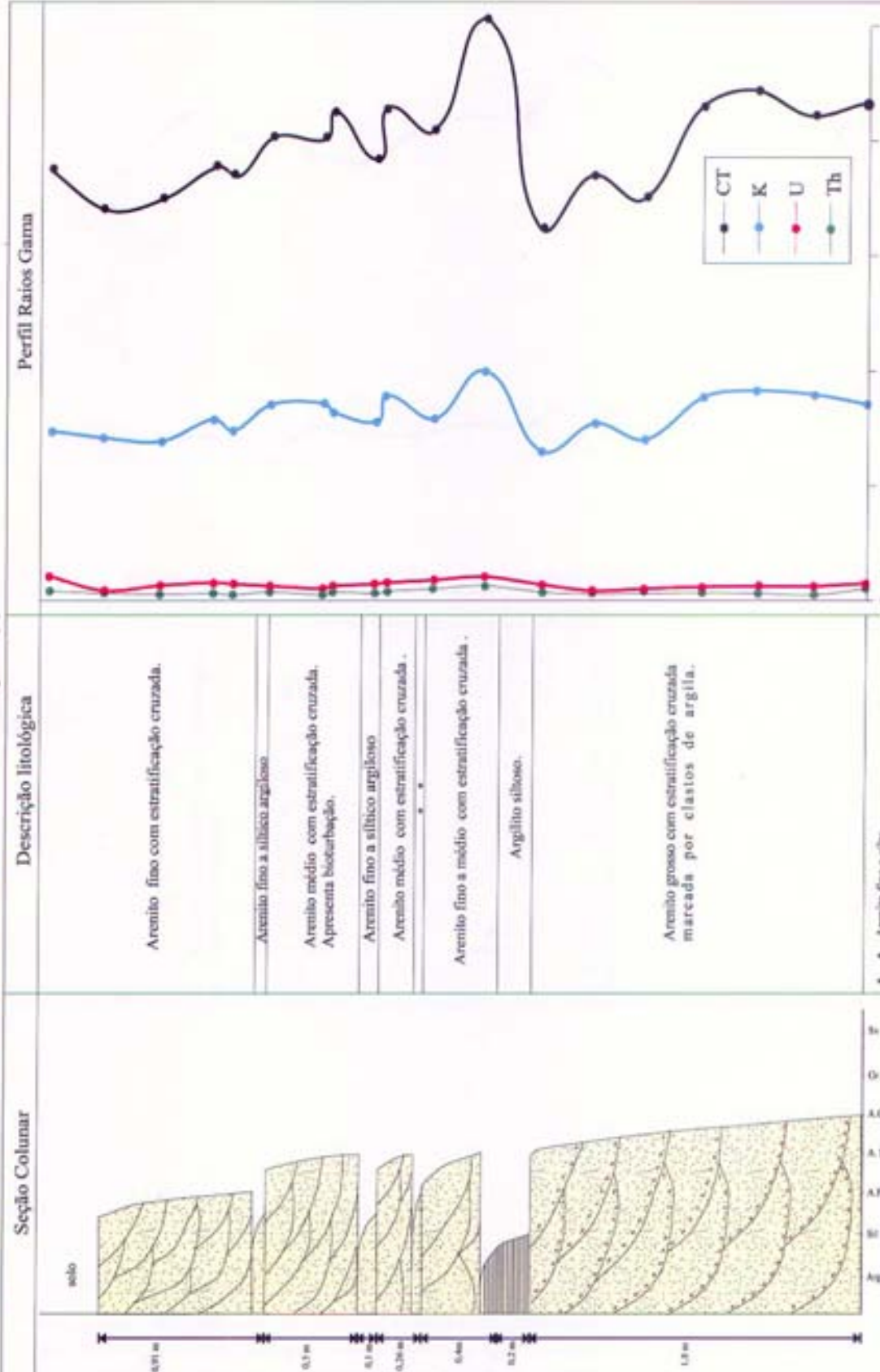


**ANEXO 1**  
**Seção colunar com perfil de raios gama levantada no Afloramento Apodi (2)**

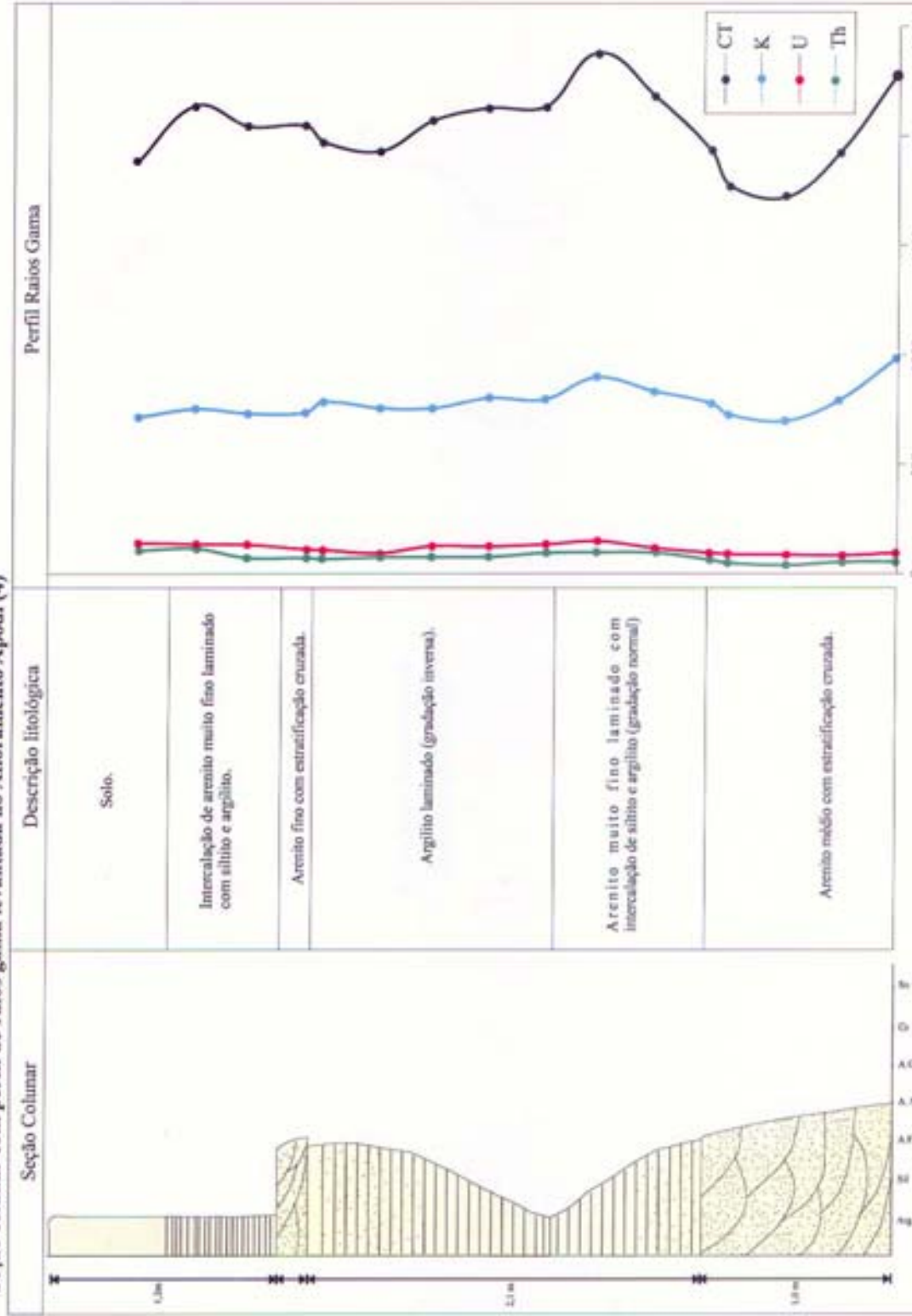


**ANEXO 1**

**Seção colunar com perfil de raios gama levantada no Afloramento Apodi (3)**

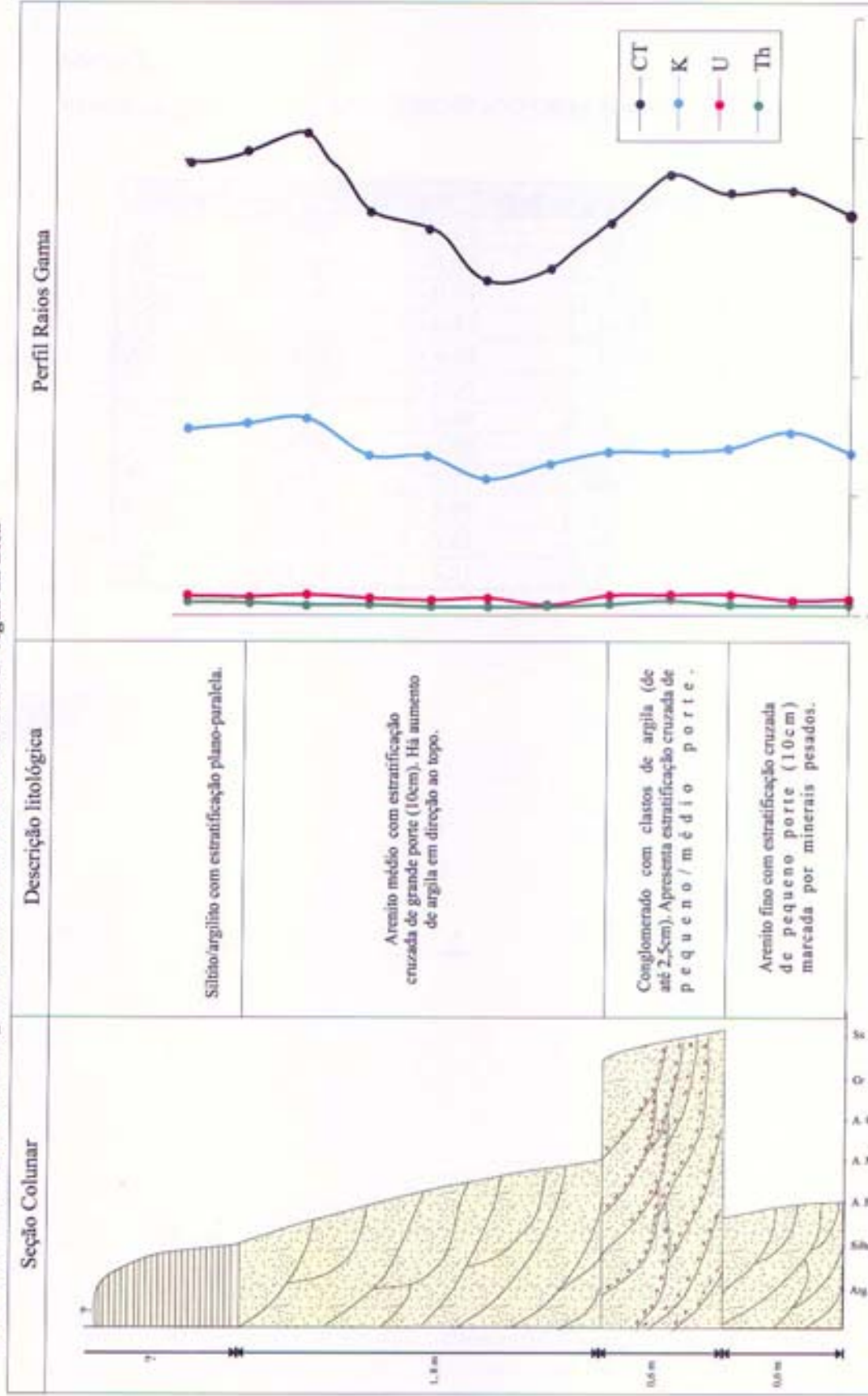


**ANEXO 1**  
**Seção colunar com perfil de raios gama levantada no Afloramento Apodi (4)**



ANEXO 1

Seção colunar com perfil de raios gama levantada no Afloramento Olho D'Água da Bica



## Anexo 2.

Valores de isótopos de oxigênio (SMOW e VPDB) e carbono (VPDB)

Amostra	$\delta O^{18}$ SMOW	$\delta O^{18}$ VPDB	$\delta C^{13}$ VPDB
A1	+ 24,87	- 5,81	- 10,79
A2	+ 24,05	- 6,61	- 11,14
A3	+ 24,07	- 6,59	- 11,31
A4	+ 24,57	- 6,11	- 10,60
A5	+ 25,72	- 4,98	- 11,32
F1	+ 25,66	- 5,05	- 10,61
P1	+ 24,22	- 6,44	- 10,16
P2	+ 24,76	- 5,92	- 9,99
P3	+ 24,91	- 5,77	- 10,14
P4	+ 24,68	- 5,99	- 10,83
P5	+ 25,27	- 5,42	- 10,54
P6	+ 25,18	- 5,51	- 10,65

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Ciências Exatas e da Terra - CCET  
Programa de Pesquisa e Pós-Graduação  
em Geodinâmica e Geofísica - PPGG  
Caixa Postal: 1596  
59078-970 - Natal - RN  
Home-page: [http://www.ccet.ufrn.br/geodinamica\\_e\\_geofisica/](http://www.ccet.ufrn.br/geodinamica_e_geofisica/)