

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A APLICABILIDADE DO MÉTODO RB/SR EM
ROCHAS SEDIMENTARES E MATERIAIS
ARGILOSOS**

Eduardo Patrício dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Umberto Giuseppe Cordani

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2001/15)

SÃO PAULO
2001

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A APLICABILIDADE DO MÉTODO Rb/Sr EM ROCHAS
SEDIMENTARES E MATERIAIS ARGILOSOS**

EDUARDO PATRÍCIO DOS SANTOS

DISCIPLINA 0440500 - TRABALHO DE FORMATURA

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Umberto Giuseppe Cordani

U. Cordani

Prof. Dr. Colombo C.G. Tassinari

Colombo C.G. Tassinari

Prof. Dr. Oswaldo Siga Júnior

Oswaldo Siga Júnior

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900009434

A APLICABILIDADE DO MÉTODO RB/SR EM ROCHAS SEDIMENTARES E MATERIAIS ARGILOSOS

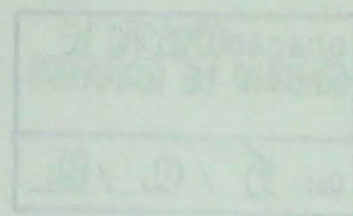


Eduardo Patrício dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Umberto Giuseppe Cordani

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF-2001/15)

São Paulo
2001



TF
S237
EP. a

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

A APLICABILIDADE DO MÉTODO REISS
EM ROCHAS SEDIMENTARES E
MATERIAIS ARGILOSOS



Eduardo Pádua dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Umberto Giuseppe Cordani

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF-2001/15)

São Paulo
2001

DOAÇÃO COMISSÃO DE
TRABALHO DE FORMATURA

Data: 15 / 02 / 02

Agradecimentos

Agradeço ao meu coordenador Delfino G. Corrêa por tudo que proporcionou, e a Petrópolis pela minha graduação.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, mas em especial, aos meus pais e amigos Osvaldo Silva Jr. e Lucy Gomes Sant'Anna.

Agradeço também a todos os professores que participaram deste trabalho, seja diretamente ou não, os quais: Divalda Pereira da Trindade, Jeanne Jamil Sayegh, Flávio Machado de Souza, Celso de Paula, Paulo Ernesto Neri, José Paulo Santos, Liliane Aguiar de Fátima, Valencio, Anna Tereza, Otoni, Alina Soares, Maria N. Bonini, Maria Rêgo Bonini, Val Gil, Isabel Ferreira Ruiz, Lúcia Paula-Barbosa Almeida, Maria Adilene Pereira dos Anjos, Wilson Manoel Pinheiro, e em especial, aos meus dois mentores, Sérgio Roberto de Souza e Vitor Hugo Miranda do Silva Pereira.

Agradeço a todos os meus amigos, e a minha filha Maria Eduarda por sua paciência e compreensão, e por estar ao meu lado.

Agradeço a todos os colegas que passaram comigo esta vida acadêmica, e em especial, aos meus amigos, que por mim se doaram.

... e mesmo que eu ande no vale da
sombra e da escuridão
não temerei o mal
porque Tu estás comigo.
Salmo 23 cap.4

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Umberto G. Cordani por tudo que proporcionou, e a Petrobrás pela ajuda científica.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, mas em especial, pela ajuda e empenho Oswaldo Siga Jr. e Lucy Gomes Sant'Anna.

Agradeço também a todos os profissionais que participaram deste trabalho, seja diretamente ou não, os quais: Daniela Ferraz de Toledo, Isaac Jamil Sayeg, Flávio Machado de Souza Carvalho, Paulo Ernesto Mori, José Paulo Sertek, Liliane Aparecida Petronilho, Artur Takashi Onoe, Mitzi Sonoki, Helen N. Sonoki, Ivone Keiko Sonoki, Kei Sato, Izabel Ramos Ruiz, Luiz Paulo Barbosa Ribeiro, Vasco Antônio Pereira dos Loios, Walter Maurício Proesser, e em especial, pela força de espírito, Solange Lucena de Souza e Vera Lúcia Miranda da Silva Pereira.

Agradeço a minha esposa Roberta e a minha filha Maria Eduarda pela paciência e compreensão, e aos meus pais pela ajuda.

Agradeço a todas as pessoas que cruzaram minha vida neste mundo chamado Geologia. Fiat, valeu velhinho, olhe por nós aí do céu.

ÍNDICE

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	9
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	10
3.1. BACIA DO SOLIMÕES	10
3.2. BACIA DO RECÔNCAVO	11
4. TRABALHOS PRÉVIOS SOBRE A METODOLOGIA RB/SR	13
5. GEOQUÍMICA DO RUBÍDIO E DO ESTRÔNCIO	15
5.1. RUBÍDIO	15
5.2. ESTRÔNCIO	15
6. O MÉTODO RB/SR	17
7. METODOLOGIA	19
7.1. AMOSTRAS DA BACIA DO SOLIMÕES	19
7.1.1. ATAQUE QUÍMICO	21
7.1.2. ESPECTROMETRIA DA MASSA	22
7.2. AMOSTRAS DA BACIA DO RECÔNCAVO	22
7.2.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	25
7.2.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COM MICROANÁLISE POR ENERGIA DISPERSIVA ACOPLADA (EDS).	26

7.2.3. DIFRAÇÃO DE RAIOS X	27
7.2.4. ATAQUE QUÍMICO	28
7.2.5. ESPECTROMETRIA DE MASSA	28
8. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	29
9. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	30
9.1. BACIA DO SOLIMÕES	30
9.2. BACIA DO RECÔNCAVO	31
9.2.1. AMOSTRA P7-MG-405-BA	31
9.2.2. AMOSTRA P7-AR-36-BA	32
9.2.3. TESTE DE MOAGEM	33
9.2.4. EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO ÁCIDA	33
10. ANÁLISES ISOTÓPICAS	35
10.1. BACIA DO SOLIMÕES	35
10.2. BACIA DO RECÔNCAVO	35
11. INTERPRETAÇÃO/DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
11.1. BACIA DO SOLIMÕES	37
11.2. BACIA DO RECÔNCAVO	38
12. CONCLUSÕES	40
13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
14. ANEXOS (FIGURAS, MAPAS E DIAGRAMAS)	44

RESUMO

Este trabalho contribui para a discussão da aplicabilidade do método Rb/Sr em rochas sedimentares e materiais argilosos pertencentes à Bacia do Recôncavo e à Bacia do Solimões, respectivamente. As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas por intermédio da Petrobrás.

O método geocronológico Rb/Sr baseia-se no decaimento radioativo do ^{87}Rb em ^{87}Sr , permitindo a obtenção de razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ que analisadas em diagrama isocrônico, possibilita interpretações correspondentes às épocas de deposição, diagênese e metamorfismo das bacias sedimentares.

As diferentes frações finas estudadas da Bacia do Solimões foram extraídas de arenitos reservatórios das formações Juruá e Jandiatuba, e correspondem a ílitas e interestratificados ílita-esmectita, cujos dados analíticos alinharam-se em diagrama isocrônico em torno de 280 milhões de anos, idade essa interpretada preliminarmente como decorrentes de modificações isotópicas ocorridas tardiamente.

O sistema rocha total, lixiviado e resíduo das amostras estudadas da Bacia do Recôncavo foram retirados de folhelhos e siltitos localizadas no Marco Cronoestratigráfico 15, limite entre as formações Pojuca e Marfim, e também da Formação São Sebastião. Os dados obtidos sugerem forte influência de minerais de origem detrítica, resultando em idades mais antigas que as considerada estratigraficamente.

ABSTRACT

This work contributes to applicability issues on Rb/Sr methods over sedimentary rocks and argillaceous materials which belong to Recôncavo and Solimões basins, respectively. The samples analyzed on this work were obtained via Petrobrás.

Geochronological method Rb/Sr is based on radioactive decay from ^{87}Sr to ^{87}Rb , leading to isotopic ratios $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, which, when analyzed in isochrons diagrams, allow interpretation of deposition, diagenesis and metamorphism ages of sedimentary basins.

Different fine fractions of Solimões basin were extracted from reservoir sandstones of Juruá and Jandiatuba formations, corresponding to illite and interstratified illite-smectite. Analytic date from this samples aligned in isochron diagram about 280 G.yr., this age being preliminary interpreted as due to late isotopic changes.

The whole rock, leachate and residuals systems from Recôncavo Basin samples were extracted from shales and siltstones from chronostratigraphic Mark 15, in border of Pojuca and Marfim formations and also São Sebastião formation.

Obtained data suggest a strong influence of detrital origin minerals, resultant in older than that from stratigraphic.

1. INTRODUÇÃO

A linha de pesquisa do Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) do Instituto de Geociências (IGc) da Universidade de São Paulo (USP), na datação de rochas sedimentares apresenta larga experiência de cerca de três décadas em análises isotópicas na aplicação dos métodos Rb/Sr e K/Ar, os quais geraram considerável volume de publicações (e.g. Kawashita, 1972).

O presente trabalho foi realizado no CPGeo, com a aplicação da metodologia Rb/Sr em rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo e materiais argilosos da Bacia do Solimões.

A datação dos argilominerais e de suas rochas portadoras tem grande importância para a indústria do petróleo, pois indica, com o possível fechamento de seu sistema químico, a entrada dos hidrocarbonetos brutos nas unidades reservatórios (Misuzaki *et al*, 1990). Este fator pode direcionar, em adição a outros dados, toda uma campanha exploratória.

O projeto contou com a parceria científica da Petrobrás, consolidando a experiência de pesquisas do CENPES (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello) nos campos de exploração e produção de petróleo, os quais estão sendo ampliados no Brasil com intervenção de muitas empresas estrangeiras. Essa linha, que pretende a formação de recursos humanos em pesquisas relevantes para a Geologia do Petróleo, está sendo priorizada inclusive no próprio IGc com a implantação de uma opção de concentração em geologia do petróleo no seu curso de graduação.

2. OBJETIVOS

Este projeto tem por objetivo verificar aplicabilidade do método Rb/Sr em rochas sedimentares e materiais argilosos, utilizando amostras de furos de sondagem de dois campos de exploração da Petrobrás, o campo de Urucu, pertencente à Bacia do Solimões, e o campo de Araçás, da Bacia do Recôncavo.

A verificação das razões Rb/Sr é influenciada por diversos fatores, como a situação geológica, granulometria, composição mineralógica e procedimentos de tratamento e análises do material em estudo.

As amostras da Bacia do Solimões foram trabalhadas por Misuzaki *et al* (1990) aplicando-se a metodologia K/Ar. O referido trabalho está sendo aplicado como base do presente estudo pois, os resultados analíticos obtidos pela autora serão confrontados com os resultados obtidos da aplicação da metodologia Rb/Sr, uma vez que são as mesmas amostras analisadas.

O conjunto de amostras recebidas da Bacia do Recôncavo incluiu rochas provenientes de seis furos de sondagem, que foram analisadas por fluorescência de raios X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difratometria de raios X, para conhecer as características mineralógicas e composicionais do material escolhido.

Os dados geocronológicos obtidos de cada amostra são comparados com sua idade estratigráfica.

O escopo do trabalho levanta algumas hipóteses e possíveis soluções para problemas relacionados à aplicabilidade da metodologia de datação absoluta Rb/Sr.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. Bacia do Solimões

A Bacia do Solimões, do período paleozóico, localiza-se na região norte do Brasil. É limitada à oeste com a Bacia do Acre pelo arco de Iquitos e à leste, com a Bacia do Amazonas pelo arco de Purus (figura 3.1.1)

Segundo Zalán *et al* (2000) é dividida estratigraficamente em nove formações as quais: Benjamin Constant, Jutai, Uerê, Jandiatuba, Juruá, Carauari, Fonte Boa, Alter do Chão e Solimões, sendo respectivamente da mais velha para a mais nova (figura 3.1.2).

O embasamento da Bacia do Solimões é caracterizado pelo Grupo Purus.

A Formação Benjamin Constant é caracterizada por arenito mal selecionado e folhelhos cinza escuro a preto. Apresenta ambiente deposicional marinho raso a costeiro, gradualmente passando ao domínio de marés; tem idade mesoordoviciana.

A Formação Jutai e o Membro Biá tem idade neosiluriana a eodevoniana, é caracterizada principalmente por folhelho cinza escuro e acastanhado intercalado com arenito fino e siltito cinzento. É interpretado para estas rochas um ambiente deposicional marinho transgressivo.

O Grupo Marimari é composto pelas formações Uerê e Jandiatuba. A Formação Uerê caracteriza-se por rochas predominantemente silicosas. Sua idade vai de neoeifeliana ao eofameniana, e seu ambiente de deposição é interpretado como marinho raso e transicional, e flúvio-eólico a litorâneo. A Formação Jandiatuba é caracterizada pela presença de folhelho cinza escuro a preto intercalado com silte e arenitos finos com espículas, e em direção ao topo da formação é crescente a presença de arenitos. A Sub-Bacia do Juruá apresenta arenitos silicificados, silexites, folhelhos, siltitos e diamictitos, o ambiente deposicional é interpretado como marinho costeiro, sendo que os diamictitos podem caracterizar ambiente glacial.

O Grupo Tefé é dividido nas formações Juruá, Carauari e Fonte Boa. A Formação Juruá é composta por arenitos, siltitos, folhelhos, calcário e anidrita, e interpreta-se como sendo de idade eopensilvaniana. O ambiente de deposição é interpretado como flúvio-deltaico, passando para eólico costeiro. A Formação Carauari é caracterizada por uma associação cíclica de folhelhos, calcilutitos, anidritas e halitas, e também pela presença de três soleiras intrusivas de diabásio. Apresenta idade pensilvaniana e ambiente de deposição interpretado como marinho. A Formação Fonte Boa é composta por siltitos e folhelhos com intercalações de arenitos, de idade asseliana a eosakamariana.

O Grupo Javari reúne as formações Alter do Chão e Solimões. A Formação Alter do Chão é composta por arenitos grossos friáveis de idade mesoalbianiana a turoniana, e apresenta um ambiente de deposição interpretado como continental fluvial. A Formação

Solimões é caracterizada por argilitos com camadas de conchas e linhito, e arenito grosso variegado. Apresenta idade cenozóica e o ambiente de deposição é interpretado como flúvio-lacustre.

A seção da Bacia do Solimões estudada neste trabalho compreende amostras da Formação Juruá, poço 1-RUC-1-AM do campo de Urucu, e da Formação Jandiatuba, poço 1-LUC-1-AM do campo do leste de Urucu (figura 3.1.2. Localização dos Poços). Estas duas formações estão dentro do sistema de petróleo da Bacia do Solimões (Zalán *et al* 2000).

Cabe ressaltar que no trabalho base de Misuzaki *et al* (1990), estes poços eram reportados às formações Itaituba e Curuá, respectivamente. A mudança na nomenclatura aqui presente faz parte da revisão estratigráfica realizada por Eiras *et al* (1994).

3.2. Bacia do Recôncavo

A Bacia do Recôncavo do período cretáceo localiza-se na região nordeste do Brasil (figura 3.2.1). Limita-se a leste com o embasamento por intermédio de falhamentos de grande rejeito, e a oeste por falhamentos menores.

Segundo Caixeta *et al* (1994) é dividida em quatro grupos litoestratigráficos como segue: Brotas, do Jurássico, na fase pré-rift da bacia; Santo Amaro, Ilhas e Massacará, do Cretáceo, na fase rift da bacia (figura 3.2.2).

O Grupo Brotas congrega as formações Aliança e Sergi. A Formação Aliança comporta os membros Boipeba, caracterizada por arcóseos, e Capianga, caracterizada por folhelhos. É uma formação com sedimentos depositados em ambientes flúvio-lacustres e de idade neojurássica. A Formação Sergi é composta por arenitos e intercalações de folhelhos e conglomerados. Interpreta-se como sendo de idade neojurássica e seu ambiente de deposição é interpretado como flúvio-eólico.

O Grupo Santo Amaro reúne as formações Itaparica, Água Grande, Candeias e Maracangalha. A Formação Itaparica é caracterizada por folhelhos depositados em ambiente lacustre no Eoberriasiana. A Formação Candeias reúne os membros Tauá e Gomo, e é caracterizada basicamente por folhelhos com camadas delgadas de arenitos e calcários. A Formação Maracangalha que abrange os membros Pitanga e Curuaçu é caracterizada por folhelhos com camadas lenticulares de arenito, de idade valenginiana e interpreta-se seu ambiente deposicional como lacustre.

O Grupo Ilhas incorpora as formações Marfim, Pojuca e Taquipe. A Formação Marfim caracteriza-se por arenitos muito finos e folhelhos cinza esverdeados, e comporta o membro Catu. Interpreta-se como sendo de ambiente deltaico e de idade valenginiana a hauteriviana. A Formação Pojuca comporta o Membro Santiago e é caracterizada por

intercalações de folhelhos, arenitos, siltitos e calcários, formados em ambiente deltaico, com idade hauteriviana a aptiana. A Formação Taquipe caracteriza-se por folhelhos com lentes de arenito maciço, de ambiente deltaico e idade hauteriviana a barremiana.

O Grupo Massacará congrega a Formação São Sebastião, que é caracterizada pela presença de arenito grosso com intercalações de argila siltica. A Formação São Sebastião reúne os membros Paciência, Passagem dos Teixeiras e Rio Joanes; sendo interpretada como de ambiente fluvial com idade berrasiana a eoapitiana.

A Formação Salvador caracteriza-se pela presença de conglomerados e arenitos, formada em ambiente de leques aluviais, com uma idade interpretada como valanginiana a aptiana.

A seção da Bacia do Recôncavo estudada neste trabalho (figura 3.2.1.) abrange as amostras de quatro furos (P7-AR-36-BA, P7-AR-28-BA, P7-AR-248-BA e P7-AR-27-BA) pertencentes ao Grupo Ilhas. Predominam variedades areno-argilosas que se referem às formações Marfim, com arenitos finos intercalados com folhelho cinza esverdeado, e Pojuca, com intercalações de arenito muito fino, folhelho, siltito e calcário. Outros dois poços amostrados pertencem ao Grupo Santo Amaro, Formação Candeias, membro Tauá, caracterizado por folhelhos escuros físseis (P7-TA-3BA), e ao Grupo Massacará, Formação São Sebastião, com arenito grosso e intercalações de argila siltica (P7-MG-405-BA).

Alguns desses pontos de coleta dos poços foram bem caracterizados quanto a marcos cronoestratigráficos, como é o caso das amostras P7-AR-36-BA e P7-AR-248-BA, que estão delimitadas pelo Marco 15 da formação Pojuca (Andar Aratu). Segundo Mato *et al* (1991), este marco ocorre na *Biozona Paracypridea obovata*, permanecendo, em toda sua extensão, numa posição entre duas subzonas desta biozona, o que lhe confere caráter cronoestratigráfico. Portanto este marco está no topo da Formação Marfim e na base da Formação Pojuca.

4. TRABALHOS PRÉVIOS SOBRE A METODOLOGIA Rb/Sr

O método isocrônico Rb/Sr de datação foi primeiramente aplicado em rochas sedimentares por Compston e Pidgeon em 1962. Eles assumiram que o rubídio dos sedimentos finos se concentram nos argilominerais e que o estrôncio sofre homogeneização isotópica ao mesmo tempo ou logo após a sedimentação.

Diversos trabalhos foram feitos no CPGeo aplicando a metodologia Rb/Sr em datações de rochas sedimentares e frações argilosas (e.g. Kawashita, 1972).

O sistema de isócronas, que podem indicar a idade da diagênese, deve incluir amostras de litologias semelhantes, ou seja, de um só ambiente de formação, isto deve acontecer para que se respeite uma das premissas básicas da aplicação da metodologia Rb/Sr, que é a homogeneização isotópica (Kawashita, 1972).

Thomaz Filho (1976) trabalhando com sedimentos argilosos de idades paleozóicas e eopaleozóicas aplicou com sucesso o método radiométrico Rb/Sr, obtendo isócronas de sistemas de rocha total com idade absoluta da deposição muito semelhante àquela representada pela idade estratigráfica. Determinou também a idade absoluta da diagênese através de isócronas amostrais em fração fina, lixiviado e resíduo. Segundo Cordani *et al* (1985) as isócronas dos diagramas de Rb/Sr podem indicar as idades de sedimentação.

Segundo Couto *et al* (1981) um problema na utilização da geocronologia pela metodologia Rb/Sr reside na dificuldade interpretativa causada por materiais detríticos, pois estes causariam incremento na idade devida à presença de estrôncio radiogênico herdado pelos sedimentos na época da deposição, sendo este problema atenuado com o emprego da metodologia nas frações mais finas, que segundo Alves (1990) concentra a maior parte dos argilominerais diagenéticos.

Conforme transcrito em Faure (1986), as rochas sedimentares apresentam quantidade suficiente da razão Rb/Sr para que possa ser enriquecida de ^{87}Sr . O rubídio seria proveniente tanto de minerais autigênicos (argilominerais, adularia, silvita e carnallita entre outros) como de alogênicos e detríticos (micas, argilominerais e feldspato potássico entre outros). Normalmente os minerais autigênicos são formados durante a deposição das rochas sedimentares, ou seja, no próprio sítio deposicional, e por este fato, podem indicar a idade de sedimentação desta rocha, uma vez que o sistema químico dos minerais tenha se fechado neste período.

O mesmo autor defende ainda que as interpretações de dados isocrônicos são dificultadas, pois a homogeneização isotópica não ocorre necessariamente durante a deposição, mas também podem ser resultantes de diagênese, deformações estruturais, e recristalização durante o metamorfismo incipiente.

O emprego da lixiviação ácida em rochas sedimentares data do fim da década de 60, e geralmente este processo remove maior quantidade de estrôncio e pouca

quantidade de rubídio, causando assim incremento na razão Rb/Sr e também da razão isotópica do estrôncio.

Bonhomme *et al* (*apud* Clauer&Chaudhuri 1995) sugeriram que os argilominerais autigênicos separados das respectivas rochas sedimentares produzem informações sobre a idade da diagênese. O mesmo autor defende ainda que enquanto isócronas de frações argilosas produzem idades mais baixas que a idade de sedimentação, as isócronas de rocha total produzem idades mais altas que a referida.

Clauer&Chaudhuri (1995) acreditam que a determinação da época da diagenese da illita pode ser definida somente quando esta ocorrer num curto espaço de tempo, porque se este for prolongado, pode sugerir idades errôneas para o processo de ilitização.

O Rubídio tem dois isótopos naturais, o ^{87}Rb e o ^{85}Rb . O ^{87}Rb é instável e decai para o ^{87}Sr através de um processo natural de decaimento β^- . Este processo é importante durante o processo de alteração crustal, especialmente para as rochas ricas em rubídio.

O Rubídio tem dois isótopos naturais, o ^{87}Rb e o ^{85}Rb . O ^{87}Rb é instável e decai para o ^{87}Sr através de um processo natural de decaimento β^- . Este processo é importante durante o processo de alteração crustal, especialmente para as rochas ricas em rubídio.



onde β^- é o elétron beta, $\bar{\nu}$ é o antineutrino e Q é a energia de decaimento com valor de 0,275MeV.

6.2. Estrôncio

O Estrôncio (Sr) é um metal alcalino-terroso do grupo 2A de tabelas periódicas, juntamente com o Berílio (Be), Cálcio (Ca), Bário (Ba) e Rádio (Ra). Seu peso atômico é ligeiramente maior que o do Cálcio (Sr=87,62 e Ca=40,08). Esta alta taxa promove a substituição do Cálcio pelo Estrôncio em minerais contendo cálcio como a apatita, fluorapatita e aragonita.

A incorporação do Estrôncio (Sr^{2+}) em substituição do cálcio (Ca^{2+}) na estrutura cristalina depende da distribuição de coordenação e da energia cristalina. Para um mesmo número de coordenação, a substituição de Sr^{2+} por Ca^{2+} é favorecida quando a energia de solvatação do Sr^{2+} for menor que a do Ca^{2+} . A substituição de Sr^{2+} por Ca^{2+} também pode ocorrer em substituição dos íons de potássio (K^+) nos argilominerais, especialmente em illita, quando houver também substituição de Ba^{2+} por K^+ , devido ao tamanho e à carga elétrica similares.

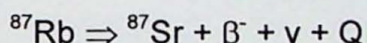
5. GEOQUÍMICA DO RUBÍDIO E DO ESTRÔNCIO

5.1. Rubídio

É volumoso o número de publicações a respeito do tema aqui abrangido, neste caso tanto este item quanto o posterior, são um compêndio de alguns autores selecionados (e.g. Faure (1986); Kawashita (1972); Thomaz Filho (1976) e Misuzaki (1992)).

O Rubídio (Rb) é um metal alcalino do grupo IA da tabela periódica, assim como o Lítio (Li), Sódio (Na), Potássio (K), Césio (Cs) e Frâncio (Fr). Apresenta raio iônico muito similar ao do potássio ($Rb=1,48\text{\AA}$ e $K=1,33\text{\AA}$). Este fato faz com que o Rubídio seja um mineral disperso, facilitando sua substituição em minerais potássicos como: muscovita, biotita, argilominerais e evaporitos. O fato de o Rubídio ser mais alcalino que o Potássio é importante durante o processo de adsorção desses elementos pelos devidos minerais retentores.

O Rubídio tem dois isótopos naturais: o ^{87}Rb e o ^{85}Rb . O ^{87}Rb é radioativo e decai para o ^{87}Sr estável, pela emissão natural da partícula β^- . Este decaimento isotópico (radioativo) se consome através da seguinte equação:



onde β^- é a partícula beta; ν é o antineutrino e Q é a energia de decaimento, com valor de $0,275\text{MeV}$.

5.2. Estrôncio

O Estrôncio (Sr) é um metal alcalino-terroso do grupo IIA da tabela periódica, juntamente com o Berílio (Be), Cálcio (Ca), Bário (Ba) e Rádío (Ra). Seu raio iônico é levemente maior que o do Cálcio ($Sr=1,13\text{\AA}$ e $Ca=0,99\text{\AA}$), fato este que possibilita a substituição do Cálcio pelo Estrôncio em minerais contendo cálcio como a apatita, plagioclásio e aragonita.

A capacidade do íon estrôncio (Sr^{2+}) em substituir íon de cálcio (Ca^{2+}) é limitada, pois favorece posições octaédricas de coordenação, e os íons de cálcio, por seu tamanho menor, favorecem posições de coordenação octaédricas e hexaédricas. Os íons de estrôncio (Sr^{2+}) podem ser capturados em substituição aos íons de potássio (K^+) nos feldspatos potássicos, mas este fato é controlado a ocorrer somente quando houver também substituição do íon Si^{4+} por Al^{3+} , para que seja mantida a neutralidade elétrica.

Existem quatro formas de Estrôncio natural: ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr e ^{84}Sr . Diferentemente do Rubídio, o Estrôncio forma minerais próprios, ou seja, ocorre como maior cátion do mineral, como a estroncionita (SrCO_3) e a celestita (SrSO_4).

O Rubídio e o Estrôncio são comumente encontrados em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Suas concentrações em diferentes tipos de rochas assim como a coerência geoquímica entre o Rubídio e o Potássio, e o Estrôncio e o Cálcio estão descritos na tabela 5.2.1, logo abaixo:

Tipo de Rocha	Rb (ppm)	K (ppm)	Sr (ppm)	Ca (ppm)
Ultrabásica	0.2	40	1	25,000
Basaltos	30	8,300	465	76,000
Sienito	110	48,000	200	18,000
Folhelhos	140	26,600	300	22,100
Carbonatos	3	2,700	610	302,300
Arenitos	60	10,700	20	39,100
Argilas Marinhas	110	25,000	180	29,000

(Modificado de Turekian&Wedepohl, 1961; *apud* Faure 1986))

6. O MÉTODO Rb/Sr

Para que possa ser empregado o método radiométrico Rb-Sr, tem que se estabelecer alguns critérios prévios como:

- As perdas ou ganhos de núclídeos pais (^{87}Rb) e filhos (^{87}Sr) tem que ser nula, a não ser se esta tenha ocorrido por decaimento radioativo;
- Tem que se conhecer com exatidão a meia vida do núclídeo pai (^{87}Rb);
- A quantidade original do estrôncio tem que ser perfeitamente conhecida;
- A gênese da rocha ou do mineral tem que ser concluída num curto intervalo de tempo, quando comparado com sua idade.

Obedecidas estas premissas, segue-se então à determinação das idades absolutas.

A determinação de idades geológicas através da metodologia Rb-Sr é baseada na reação nuclear espontânea do isótopo de rubídio (^{87}Rb), no qual, por emissão de partícula β se transforma no isótopo ^{87}Sr .

O cálculo para obtenção das idades, uma vez conhecida as razões envolvidas, é baseada na seguinte equação:

$$T = 1/\lambda \cdot \ln \left[1 + \frac{(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_p - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i}{^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}} \right]$$

onde;

λ é a constante de desintegração, que neste trabalho é assumida como $0,142 \cdot 10^{-10}$;

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_p$ é a razão isotópica atual do estrôncio atual contido no material;

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ é a razão isotópica do estrôncio contido originalmente no material, denominada razão inicial;

$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$ dedutível a partir de concentrações de Rb e Sr no material, e das composições isotópicas atuais desses elementos.

A equação acima permite a determinação da idade convencional da rocha ou mineral. Para rochas sedimentares, no qual as razões $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ do sistema são desconhecidas, utiliza-se o método das isócronas. O diagrama isocrônico é o nome dado ao gráfico que apresenta a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na ordenada e a razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ na abcissa. A reta do diagrama isocrônico é chamada de isócrona, e a idade do material estudado é dada por sua inclinação em relação ao eixo das abcissas.

Para amostras cogenéticas a idade (T) e a razão inicial $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ são iguais para todas as amostras devida a homogeneização isotópica. Esta homogeneização ocorre em

temperaturas superiores a 250°C, onde há uma redistribuição iônica das várias espécies isotópicas de estrôncio, isto independe da proporção deste elemento no material analisado, pois, a rocha terá uma razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ redistribuída e homogênea por toda a rocha.

7.1. Amostras da Serra do Colônia

As amostras de feldspas livres da Serra do Colônia foram selecionadas após análise por difração de raios-X e com caracterização de feldspas por volume. Para garantir um estado preservado com preservação da forma original, composição mineralógica e distribuição de impurezas, as amostras foram analisadas por microscopia (MEV) para determinação da morfologia e composição química das amostras presentes. A determinação de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da feldspas livres é feita de se identificar os argumentos prévios. Devido ao baixo conteúdo de feldspas livres as quais foram coletadas para análise de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e então foram analisadas por 1 método de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ que envolve divisão, principalmente quando há presença de outros ao $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a seguir na figura 7.1.1 temos a morfologia das amostras da Serra do Colônia.

7. METODOLOGIA

Foram analisadas amostras de testemunhos de sondagens das bacias do Solimões e do Recôncavo.

7.1. Amostras da Bacia do Solimões

As amostras de frações finas da Bacia do Solimões tiveram tratamento prévio realizado por Misuzaki *et al* (1990), e esta caracterização é aceita no atual trabalho. Este consistiu em estudos petrográficos com determinação de feições texturais, composição mineralógica e reconhecimento de eventos diagenéticos, microscopia eletrônica de varredura (MEV) para determinação da morfologia e composição química dos argilominerais presentes; e difratometria de raios X da fração argilosa a fim de se identificar os argilominerais presentes. Decorreu-se então a separação das frações finas as quais foram datadas pela metodologia K/Ar e estão agora sendo confrontadas com a metodologia Rb/Sr, que envolve diversos procedimentos químicos laboratoriais adicionais ao K/Ar. A seguir na figura 7.1.1 temos a metodologia empregada nas amostras da Bacia do Solimões.



Figura 7.1.1 Metodologia empregada no tratamento das amostras da Bacia do Solimões.



Figura 7.1.1: Metodologia empregada no tratamento das amostras da Bacia do Solimões.

7.1.1. Ataque Químico

Foram selecionadas dez amostras para estas análises. Como não foi possível a realização de fluorescência de raios-X, devido a pouca quantidade de material, foi optado para fazer análises por Diluição Isotópica, e o critério para seleção de amostras foi estabelecido com relação à presença de dolomita e potássio, que segundo Kawashita&Torquato (1994), como o raio iônico do Rubídio é bastante semelhante ao do Potássio, este permite ser substituído pelo primeiro em vários minerais; e o raio iônico do Estrôncio é ligeiramente superior ao do Cálcio, permitindo também sua troca em muitos minerais, assim como na dolomita.

As amostras da Bacia do Solimões selecionadas para a aplicação do método radiométrico Rb/Sr estão descritas na tabela 7.1.1.1:

Amostra	Prof. (m)	Fração (μm)
1-RUC-1-AM	2445.5	4
1-RUC-1-AM	2445.5	2
1-RUC-1-AM	2445.5	10
1-RUC-1-AM	2445.5	5
1-RUC-1-AM	2437.5	0.1
1-RUC-1-AM	2437.5	0.5
1-RUC-1-AM	2437.5	1
1-LUC-1-AM	2456.8	1
1-LUC-1-AM	2456.8	0.5
1-LUC-1-AM	2456.8	0.1

Tabela 7.1.1.1: Modificado de Misuzaki *et al* (1990)

As amostras da Bacia do Solimões foram analisadas segundo a metodologia de trabalho do laboratório de Rb/Sr do Instituto de Geociências, e para o ataque químico foram seguidos os procedimentos abaixo descritos:

- Para todas as amostras foi estimada para o spike uma proporção de 500ppm de Sr e 200ppm de Rb.

- Colocou-se cerca de 0,020g de amostra em béquer "saville", (envolveu-se o béquer em papel alumínio para evitar o problema de estática) e adicionou-se cerca de 1,0 μl de spike de estrôncio e 4,0ml de spike de rubídio;

- Adicionou-se 1ml de ácido nítrico (HNO_3) concentrado e destilado e 2ml de ácido fluorídrico (HF) destilado;

- Colocou-se em ultrassom por, aproximadamente, 60 minutos;

- Deixou-se em aquecimento sob lâmpada, em evaporador, por uma hora ($\pm 60^\circ\text{C}$), depois retornou a amostra para o "saville";

-Como a amostra não foi totalmente dissolvida, colocou-se em bomba tipo Parr durante 5 dias , com ácido fluorídrico (HF) e nítrico (HNO₃), em estufa a 200°C, depois colocou-se para evaporar até a secura, sob chapa aquecedora.

-Dissolveu-se com ácido clorídrico (HCl) 6N destilado e deixou-se sob lâmpada por 1 noite ($\pm 60^{\circ}\text{C}$);

-Evaporou-se até a secura e dissolveu-se com ácido clorídrico (HCl) 2,62N;

-Transferiu-se a amostra para o tubo de centrifuga, onde ficou por cerca de 15 minutos;

Após isto se transferiu as amostras para as colunas de troca iônica:

-Precedeu-se a centrifugação durante o tempo suficiente para que o líquido ficasse com o resíduo totalmente depositado no fundo;

-Usando uma trompa de vácuo e com ácido clorídrico (HCl) 2,62N fez-se refluxo em todas as colunas de resina catiônica (AG-50 WX8, 200-400 mesh);

-Deixou-se escoar todo o ácido e iniciou-se a deposição da amostra (de acordo com a calibração);

-Coletou-se o Rb e o Sr usando-se ácido clorídrico (HCl) 2,62N em béquer "saville", previamente descontaminado;

-Adicionou-se algumas gotas de ácido nítrico (HNO₃) concentrado e colocou-se para secar em evaporadores até a secura total. Este ácido tem o poder de eliminar a resina que por ventura tenha escapado da coluna;

- O resíduo seco foi levado para o espectrômetro para a análise isotópica.

Obs: regenera-se a resina passando pela coluna ácido clorídrico (HCl) 6N.

7.1.2. Espectrometria da Massa

Após o procedimento de análise e ataque químicos laboratoriais, as amostras da Bacia do Solimões foram encaminhadas para o espectrômetro de massa da marca *Varian Matt*, modelo VG354 que trabalhou com os padrões NBS987, sendo que no período das análises os modelos *standards* garantiram as análises realizadas.

7.2. Amostras da Bacia do Recôncavo

As amostras vindas da Bacia do Recôncavo tiveram que ser caracterizadas previamente antes da aplicação da metodologia Rb/Sr. A metodologia empregada para o tratamento e das amostras analisadas está esquematizada na figura 7.2.1.

Primeiramente as nove amostras tiveram seu reconhecimento visual, onde se constatou duas litologias diferentes: folhelho e siltito. Em seguida elas foram limpas para que se eliminasse todo e qualquer resquício de material argiloso proveniente de lama de perfuração, pois algumas dessas lamas podem conter esmectita e/ou interestratificado illita/smectita, assim como barita. A presença destes argilominerais de uma fonte exógena à rocha estudada pode produzir interferência nos dados analíticos e, por conseguinte, interpretações irreais.

Seguiu-se então à fragmentação mecânica das amostras, a uma granulometria maior que trinta e cinco mesh, por intermédio de um pilão de tungstênio, o qual era descontaminado com álcool, estopa e jato de ar, para que não houvesse contaminação cruzada.

Figura 7.2.1 Metodologia empregada na obtenção das amostras.

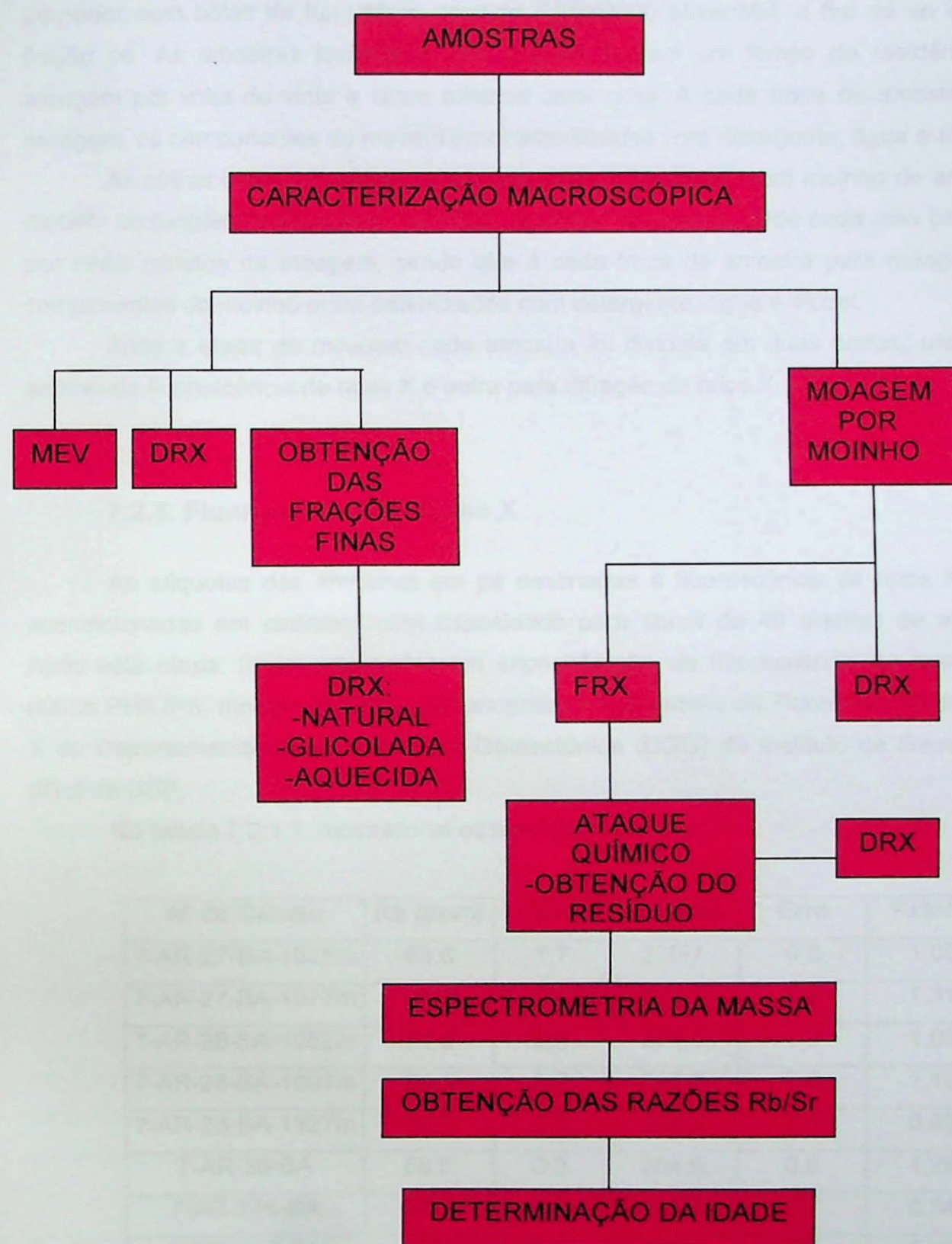


Figura 7.2.1: Metodologia empregada no tratamento das amostras.

Para comparação de possíveis efeitos decorrentes do emprego de moinhos automáticos na moagem do material, cinco amostras foram levadas a um aparelho triturador com bolas de tungstênio, modelo SPEX8000 Mixer/Mill, a fim de se obter a fração pó. As amostras levadas a este moinho tiveram um tempo de residência de moagem por volta de vinte e cinco minutos cada uma. A cada troca de amostra para moagem, os componentes do moinho eram esterilizados com detergente, água e álcool.

As outras quatro amostras foram reduzidas à fração pó num moinho de anéis de carbeto de tungstênio da marca *FRITSCH* modelo Pulverisette, onde cada uma perdurou por cinco minutos na moagem, sendo que a cada troca de amostra para moagem, os componentes do moinho eram esterilizados com detergente, água e álcool.

Após a etapa de moagem cada amostra foi dividida em duas partes, uma para análise de fluorescência de raios X e outra para difração de raios X.

7.2.1. Fluorescência de Raios X

As alíquotas das amostras em pó destinadas à fluorescência de raios X foram acondicionadas em cadinhos com capacidade para cerca de 40 gramas de amostra. Após esta etapa, foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios X da marca PHILIPS, modelo PW2400, pertencente ao Laboratório de Fluorescência de Raios X do Departamento de Mineralogia e Geotectônica (DGG) do Instituto de Geociências (IGc) da USP.

Na tabela 7.2.1.1. mostram-se os resultados obtidos:

Nº de Campo	Rb (ppm)	Erro	Sr (ppm)	Erro	Fator F
7-AR-27-BA-1025m	93,6	1,7	270,7	0,8	1,00
7-AR-27-BA-1077m	100,8	0,5	222,3	1,2	1,31
7-AR-28-BA-1052m	94,6	0,4	274,4	1,3	1,00
7-AR-28-BA-1091m	84,4	0,8	212,0	0,8	1,15
7-AR-28-BA-1327m	76,7	0,4	233,6	0,0	0,95
7-AR-36-BA	89,5	0,3	204,9	0,0	1,26
7-AR-248-BA	65,4	0,8	347,8	0,7	0,54
7-MG-405-BA	107,6	0,4	156,5	0,6	1,99
7-TA-3-BA	94,9	0,3	151,9	0,4	1,81

Levando em conta os resultados da tabela acima, foi considerado um conjunto de três amostras para a aplicação da metodologia Rb/Sr. As amostras escolhidas foram as listadas abaixo na tabela 7.2.1.2.:

Identificação	Marco Cronoestratigráfico	Testemunho	Profundidade (m)
Poço 7-AR-36-BA	15	25	1346
Poço 7-AR-248-BA	15	22	1297
Poço 7-MG-405-BA	B	04	1418

Seguiu-se então a caracterização mineralógica das amostras por intermédio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difratometria de raios X.

7.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Microanálise por Energia Dispersiva Acoplada (EDS).

Para efetuar as análises de microscopia eletrônica de varredura com microanálise por energia dispersiva acoplada (MEV/EDS) foram estabelecidos alguns critérios prévios, como posição, corte e tamanho da amostra a ser analisada. Decidiu-se fazer as varreduras em planos ortogonais e também paralelos à seção de laminação característica da amostra, para melhor observação e imageamento dos minerais individuais, e determinar a sua morfologia e composição. O imageamento das texturas e estruturas da rocha também foi feita.

A preparação das amostras consistiu na lavagem, das mesmas, com água corrente a fim de se eliminar qualquer possível contaminação advinda da lama dos furos de sondagem.

Em seguida as amostras foram secas ao ar e fragmentadas manualmente com o auxílio de graal e pistilo de ágata para a obtenção de fraturas frescas. Os fragmentos mais interessantes foram amoldados com material específico pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV).

Decorrida a separação dos fragmentos a serem analisados, estes foram acondicionados em estufa a 35°C para que se eliminasse toda água superficial ainda presente. Seguiu-se então a impregnação com carbono, formando a camada que conduz os elétrons formadores da imagem.

Utilizou-se para tais análises o microscópio de varredura eletrônica modelo LEO440i, do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LABMEV) do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental (DGSA) do IGc-USP.

7.2.3. Difração de raios X

A aplicação de estudos de difratometria de raios X teve como finalidade a caracterização mineralógica da rocha total. Após a etapa de moagem, todas as nove amostras foram levadas ao difratômetro e analisadas como pó de rocha total. Utilizou-se para tais análises o difratômetro pertencente ao Laboratório de Difração de Raios X do IGc-USP, da marca *Siemens*, modelo D5000 com espelhos Göbel acoplados, que operou com radiação CuKalpha, 40kV, 40mA, goniômetro com velocidade de 2° 2theta/min, passo de 0.05° e 0.5 segundo como tempo de contagem.

Foi utilizado o *software* EVA, da própria *Siemens*, versão 1997, com fichas do *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS), para a interpretação dos difratogramas de raios X.

Para comparação com os difratogramas de pó de moagem em moinho automático, três amostras (P7-AR-36-BA, P7-AR-248-BA e P7-MG-405-BA) foram também analisadas por DRX como pó de rocha total, obtido por moagem manual em graal de ágata. Adicionalmente, o resíduo do ataque químico da lixiviação, do processo de estudo geocronológico também foi analisado.

As amostras P7-AR-36-BA e P7-MG-405-BA tiveram ainda análises mais detalhadas da fração argilosa, para que se pudesse distinguir os argilominerais presentes e, por conseguinte, possíveis portadores do Rubídio e do Estrôncio que foram analisados geocronologicamente.

O primeiro passo para a separação das frações finas destas duas amostras foi a lavagem das mesmas com água corrente, para se evitar contaminação prévia por lama de perfuração.

Com isto realizado, as amostras foram acondicionadas em béqueres onde sofreram ataque químico a frio com ácido clorídrico a 10%, por aproximadamente duas horas (amostra P7-MG-405-BA) e vinte e quatro horas (amostra P7-AR-36-BA). Seguiu-se a esse ataque químico a lavagem com água destilada, processo feito por cinco vezes, repetidamente, para a eliminação total do HCl e do lixiviado.

Utilizando-se o método de pipetagem foram separadas as frações menores do que $12\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$ para as duas amostras, além da fração menor que $0,5\mu\text{m}$ para a P7-MG-405-BA. A presença de uma fração a mais nesta amostra deveu-se a sua boa quantidade durante a coleta.

A fração menor que $4\mu\text{m}$ foi a primeira a ser coletada da proveta contendo um litro de água com as amostras. Após a coleta inicial, as demais frações mais finas foram separadas utilizando-se a centrífuga HITACHI 5000, do Laboratório de Sedimentologia do DGSA-IGc-USP. Os tempos e as velocidades de operação da centrífuga foram determinados a partir de parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante e utilizando-se a lei de Stoke.

Após a separação das frações finas, foram confeccionadas as lâminas de amostras orientadas, destinadas a difração de raios X. Estas lâminas foram analisadas ao natural (sem tratamento prévio), glicolada com etileno-glicol por cerca de quinze horas e aquecida a 500°C por quatro horas. Estes procedimentos contribuem na diferenciação entre os grupos de argilominerais, pois somente a análise do material seco ao natural não é suficiente na caracterização dos mesmos.

7.2.4. Ataque Químico

As amostras da Bacia do Recôncavo foram analisadas segundo a metodologia de trabalho do laboratório de Rb/Sr do Instituto de Geociências com a adição do processo de lixiviação ácida da rocha total para as três amostras analisadas.

O processo de lixiviação ácida foi desenvolvido segundo o esquema abaixo descrito:

- Pesou-se aproximadamente 1g de amostra;
- Adicionou-se 10ml de ácido clorídrico (HCl) com concentração de 0,1N;
- Deixou-se este em ultrassom por um período de 10 minutos;
- Centrifugou-se a fim de separar totalmente o resíduo do lixiviado;
- Retirou-se o sobrenadante e lavou-se o resíduo com água tri-distilada e adicionou-se esta água ao sobrenadante;
- Colocou-se para evaporar;
- Pesou-se o lixiviado e adicionou-se o spike de Rb e de Sr;
- Pesou-se cerca de 100mg de resíduo e fez-se o procedimento de ataque químico rotineiro do laboratório de Rb/Sr do CPGeo (como descrito no item 7.1.1), e retirou-se uma alíquota para que fosse adicionado o spike de Sr e outra alíquota para que se adiciona-se o spike de Rb.

7.2.5. Espectrometria de Massa

As amostras da Bacia do Recôncavo, após o processo de ataque químico, foram analisadas no espectrômetro de massa marca *Varian Matt*, modelo VG354, que trabalhou com os padrões NBS987, sendo que no período das análises os modelos *standards* garantiram as análises realizadas.

8. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Do cronograma inicialmente proposto, do qual o trabalho teria duração de nove meses, pouco se manteve.

As análises de rochas sedimentares e materiais argilosos pela metodologia Ar/Ar não foram executadas devido à demora na obtenção das amostras da Petrobrás. Estas somente vieram a fazer parte efetiva do trabalho durante o mês de setembro do atual ano.

Abaixo segue o cronograma das atividades realizadas durante a confecção do Trabalho de Formatura, e em anexo temos uma tabela resumindo este cronograma:

-Fevereiro (2001) a Março (2001):

- a) Pesquisa Bibliográfica
- b) Estágio de aperfeiçoamento em argiliominerais no CENPES (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello) no setor de "Gerência de Tecnologia de Rochas"

c) Elaboração do Projeto Inicial

-Abril (2001) a Julho (2001):

- d) Ataque Químico (Rb/Sr) de Três Amostras da Bacia do Solimões
- e) Elaboração do Relatório de Progresso
- f) Espectrometria de Massa

-Agosto (2001) e Setembro (2001):

- g) Emprego dos Métodos Analíticos
- h) Recebimento das Amostras da Bacia do Recôncavo
- i) Fluorescência de Raios X
- j) Difração de Raios X
- k) Microscopia Eletrônica de Varredura

-Outubro (2001):

- l) Execução técnica da metodologia Rb/Sr
- m) Espectrometria de Massa
- n) Interpretação dos resultados
- o) Elaboração do Relatório Final

9. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

9.1. Bacia do Solimões

As amostras da bacia do Solimões abrangem arenitos reservatórios com a seguinte composição mineralógica: quartzo, ortoclásio, plagioclásio, microclínio, fragmentos líticos, dolomita, anidrita, opacos, muscovita, zircão, turmalina, pirita, caulinita, clorita e minerais do grupo da illita.

Os resultados das análises de difração de raios X são mostrados em termos de mineralogia de argilas e mineralogia total. A análise da mineralogia total, apresentada na forma qualitativa, apresentou quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, barita, dolomita, calcita e argilominerais, onde se verificou que o teor médio destes minerais varia conforme a fração granulométrica. A concentração dos minerais não argilosos está nas frações granulométricas mais grossas, diminuindo gradativamente para as frações mais finas, onde há predominância dos argilominerais.

Análises mais detalhadas (índice de cristalinidade) indicam que os argilominerais presentes nas frações granulométricas mais finas (<10 μ m) são illitas, interestratificados illita-esmectita muito (rico em illita), clorita e caulinita.

O conjunto de dados obtidos nos diferentes tipos de análises (MEV, DRX entre outras) indica que para as diferentes frações estudadas não houve contaminação por illitas detríticas. Os dados de mineralogia dos argilominerais estão na tabela 9.1.1.:

Amostra	Prof. (m)	Fração (μ m)	I-S	I	% I no I/S	DOL	KF	Idades K/Ar (M.a)
1-RUC-1-AM	2445.5	4	5			PR	PR	346,7 \pm 9,9
		2	5 e 15		80 e 90	PR	PR	267,2 \pm 3,9
		10	TR			PR	PR	280,9 \pm 31,4
		5	10			PR	PR	259,0 \pm 4,5
1-RUC-1-AM	2437.5	0.1	35	65	75 e 85			153,1 \pm 1,8
		0.5	35	65	75 e 85	PR		204,1 \pm 3,1
		1	20	80	80 e 90	PR	PR	191,5 \pm 3,1
1-LUC-1-AM	2456.8	1	TR	100			PR	236,5 \pm 6,0
		0.5	TR	100			PR	212,6 \pm 6,9
		0.1	TR	100				202,2 \pm 3,5

Tabela 9.1.1.: Modificado de Misuzaki *et al* (1990)

I-S = illita-esmectita

CAL = calcita

I = illita

DOL = dolomita

KF = feldspato potássico

9.2. Bacia do Recôncavo

Devido aos resultados obtidos durante a caracterização do material estudado, optou-se pela apresentação destes resultados por amostra como sistema rocha total, lixiviado e resíduo.

Como os testes de moagem e os testes de eficiência do processo de lixiviação ácida foram feitos com amostras da Bacia do Recôncavo, estes testes são apresentados também nesta seção.

9.2.1. Amostra P7-MG-405-BA

A amostra P-7-MG-405-BA corresponde a um folhelho de cor verde clara, com proeminente laminação (figura 9.2.1.1) e contendo quartzo, feldspato, mica, clorita e interestratificado illita-esmectita e barita.

Durante as análises de difração de raios X o quartzo foi o principal mineral detrítico identificado nos difratogramas, ocorrendo nas frações menores do que $12\mu\text{m}$ e que $4\mu\text{m}$. No MEV observou-se que este mineral ocorre como grãos arredondados a subarredondados, envoltos pela matriz laminada (figura 9.2.1.2.).

O feldspato apresenta-se como grãos pontiagudos de feldspato potássico detrítico imersos na matriz (figura 9.2.1.3.) e existem picos de muito baixa intensidade nos difratogramas obtidos de Rocha Total e Frações Finas (figura 9.2.1.4.).

A mica, provavelmente de origem detrítica conforme sugerido por sua granulação grossa e formas subarredondados (figura 9.2.1.5.), está concentrada nos difratogramas de raios X de amostras das frações menores do que $12\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ (figura 9.2.1.4.).

Adicionalmente, clorita está presente nos difratogramas das frações maiores do que $2\mu\text{m}$, e interestratificado illita-esmectita foi encontrado nos gráficos das frações menores que $1\mu\text{m}$ (figura 9.2.1.4). A clorita caracteriza-se por reflexão basal 001 com 14\AA , que se mantém neste valor após glicolagem, e aquecimento (Figura 9.2.1.6). Este mineral não foi encontrado nos estudos por MEV, mas sua origem diagenética é admitida tendo em vista o grau de soterramento e compactação que a rocha sofreu. O interestratificado I-S apresenta reflexão de $11,69\text{\AA}$ no difratograma da amostra em $1\mu\text{m}$ (figura 9.2.1.7) ao natural, desdobrando-se para $18,14\text{\AA}$ (devido à expansão da esmectita) e $10,7\text{\AA}$ (pico característico da illita) após glicolagem e contraindo-se para $10,06\text{\AA}$ após o aquecimento. A matriz argilosa apresenta argilominerais com bordas onduladas sugestivas da presença de interestratificados diagenéticos, também observados nas bordas das placas de mica detrítica (figura 9.2.1.3. e 9.2.1.5. respectivamente) e na superfície de grãos de quartzo (Figura 9.2.1.2.).

Em imagens de elétrons retroespalhados obtidas no MEV, foi possível detectar a presença de barita como cristais anedrais de granulação fina disseminados na superfície da amostra (superfície de fratura fresca) (figura 9.2.1.1. e, 9.2.1.8). Esta barita é provavelmente diagenética e seu crescimento ocorreu em meio à matriz argilosa (figura 9.2.1.8).

9.2.2. Amostra P7-AR-36-BA

A amostra P7-AR-36-BA corresponde a um siltito de cor cinza escura, com estrutura maciça (Figura 9.2.2.1) e alto grau de litificação. Sua mineralogia detrítica é composta por quartzo, feldspato e mica.

Durante as análises de difração de raios X o quartzo e o feldspato mostraram-se principalmente nas frações maiores que $4\mu\text{m}$ (figura 9.2.2.2)

A mica está presente nas frações granulométricas acima de $2\mu\text{m}$ e seu caráter detrítico foi indicado por sua morfologia de placas subarredondadas (Figura 9.2.2.3). A clorita com reflexão basal 001 em 14\AA foi encontrada nos difratogramas de raios X das frações menores do que $12\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ (figuras 9.2.2.4, 9.2.2.5 e 9.2.2.6 respectivamente). Sua identificação está baseada na manutenção desta reflexão nos gráficos obtidos para amostras ao natural, glicolada e aquecida destas mesmas frações e na presença do pico $4,7\text{\AA}$ correspondente a reflexão 003 da clorita. Nos difratogramas das amostras aquecidas, foi observado o desaparecimento do pico de 7\AA , o que poderia sugerir a presença de caulinita, mas esta não foi confirmada até o momento, sendo necessário tratamentos prévios adicionais para destruição da clorita (ataque com ácido clorídrico à quente para destruir completamente a clorita) e segregação da caulinita caso ela exista. De qualquer forma, a existência de pico $4,7\text{\AA}$ (reflexão 003 da clorita) e ausência do pico $2,38\text{\AA}$ (reflexão 003 da caulinita) é uma boa indicação da presença de clorita na amostra em detrimento da caulinita (Moore&Reynolds, 1997).

A clorita está melhor caracterizada nos difratogramas de raios X nas frações granulométricas acima de $2\mu\text{m}$, porém sua presença não foi observada ao MEV. No entanto, sua origem diagenética é interpretada a partir do alto grau de compactação da rocha.

Argilominerais interestratificados foram identificados como illita-clorita (I-CI) nos difratogramas de raios X das frações menores que do $12\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$, e como illita-esmectita (I-S) no gráfico da fração menor do que um micra.

O interestratificado I-CI caracteriza-se pela manutenção de picos com cerca de $10,6\text{\AA}$ nos difratogramas de amostras ao natural, glicolada e aquecida das frações menores que $12\mu\text{m}$ e que $2\mu\text{m}$.

O interestratificado I-S apresenta, na fração menor do que $1\mu\text{m}$, pico de $10,78\text{\AA}$ no difratograma da amostra natural; desdobramento deste valor para $18,7\text{\AA}$ (devido a expansão da esmectita) e $9,8\text{\AA}$ (correspondente a illita) no difratograma da amostra glicolada e, contração para $10,2$ angstroms após aquecimento (figura 9.2.2.7).

No MEV foi possível observar argilominerais ondulados típicos de interestratificados (provavelmente I-S) crescendo a partir das bordas de grãos detríticos de feldspato (figura 9.2.2.8) e mica (figura 9.2.2.9).

Adicionalmente foram encontrados como minerais diagenéticos a calcita (pico $3,03\text{\AA}$ em difratograma de RT, figura 9.2.2.2) e pirita (figura 9.2.2.10) esta crescida na porosidade da rocha (Figura 9.2.2.11).

9.2.3. Teste de Moagem

Confrontando os resultados dos difratogramas de raios X obtidos para as amostras preparadas em moinhos automáticos com aqueles de amostra moídas no graal de ágata (Figuras 9.2.3.1 e 9.2.3.2), notamos que há uma intensa diminuição das reflexões dos argilominerais nos primeiros. Isto se deve ao fato de que a moagem automática aplica uma pressão e temperatura muito altas para minerais tão frágeis, causando danos à estrutura dos argilominerais presentes. Nos três difratogramas são observados este efeito nocivo aos argilominerais, submetidos aos moinhos automáticos em comparação ao graal de ágata.

9.2.4. Eficiência do Processo de Lixiviação Ácida

Para o controle da eficiência do processo de lixiviação ácida das amostras destinadas às análises geocronológicas, ou seja, para sabermos se o ataque dissolveu todos os carbonatos presentes, foram realizadas análises de difratometria de raios X no resíduo dessa lixiviação.

O difratograma de raios X da amostra P7-AR-36-BA do pó de rocha total foi comparado com o difratograma do respectivo resíduo da lixiviação (figura 9.2.4.1). Notamos então que o carbonato presente na mineralogia da rocha total desapareceu por completo no difratograma do resíduo, mostrando assim que para essa rocha, a concentração do ácido e o tempo empregados foram suficientes.

A amostra P7-MG-405-BA teve os mesmos processos analíticos da amostra anterior e, apresentou perda do carbonato inicial mostrado no difratograma de raios X da amostra de rocha total (figura 9.2.4.2), indicando a eficiência do processo de lixiviação utilizado.

10. No caso da amostra P7-AR-248-BA, o mesmo procedimento foi empregado, mas a análise do difratograma de raios X do resíduo acusou a presença de carbonato de ferro (ankerita) o qual também estava presente na amostra de rocha total (figura 9.2.4.3). Este fato sugere que para esta amostra, a concentração do ácido e/ou o tempo utilizado não foram suficientes.

10.1. Dado do Sarcosina

As amostras do Dado do Sarcosina foram analisadas no espectrômetro de massa e foram obtidos os dados gravados a seguir, shown na tabela 10.1.1.

Amostra	Prof. (m)	Profund. (µm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Err.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Err.
1-RUC-1-AM-2445.5		4	81.28	485.45	0.5447	0.0045	0.71764	0.00007
		2	76.95	435.75	0.563	0.004	0.71752	0.00001
		10	73.79	543.45	0.5634	0.0050	0.71741	0.00002
		5	47.28	723.45	0.5734	0.009	0.71980	0.00004
1-RUC-1-AM-2437.5		0.1	216.73	280.73	2.1641	0.0170	0.72344	0.00004
		0.5	190.45	112.74	0.7742	0.0760	0.71733	0.00004
		1	234.57	180.89	3.8604	0.0332	0.72562	0.00021
1-LUC-1-AM-2458.8		1	252.11	201.34	3.6325	0.0505	0.73024	0.0001
		0.5	248.62	134.29	5.2905	0.0412	0.73703	0.00016
		0.1	250.43	104.83	0.5352	0.0531	0.74172	0.0009

10.2. Dado do Resíduo de

Para as amostras do Dado do Resíduo de foram obtidos os espectrômetros de massa isotópica natural para as amostras do natural e para o sistema hidrotermal, que estão na tabela 10.2.1 e 10.2.2 a seguir.

Tabela 10.2.1. amostras com Estância natural

Amostra	Material	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Err.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Err.
P7-AR-35-BA	Rocha Total	65.5	204.9	1.760	0.004	0.7135380	0.000042
P7-AR-245-BA	Rocha Total	63.4	347.8	0.564	0.005	0.71544	0.000042
P7-AR-404-BA	Rocha Total	107.87	150.5	1.933	0.014	0.72042	0.000058

10. ANÁLISES ISOTÓPICAS

Os resultados das análises isotópicas das duas bacias sedimentares estudadas foram interpretadas com o auxílio do programa Isoplot Ver. 2.10b, desenvolvido por K.R. Ludwig, da Berkeley Geochronology Center.

10.1. Bacia do Solimões

As amostras da Bacia do Solimões foram analisadas no espectrômetro de massa e foram obtidos os dados analíticos listados abaixo na tabela 10.1.1.:

Amostra	Prof. (m)	Fração (μm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Erro	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Erro
1-RUC-1-AM	2445.5	4	91.28	485.46	0.5447	0.0043	0.71764	0.00007
		2	76.36	439.78	0.503	0.004	0.71738	0.00004
		10	73.79	583.45	0.3664	0.0036	0.71741	0.00005
		5	93.26	723.46	0.3734	0.003	0.71668	0.00004
1-RUC-1-AM	2437.5	0.1	216.73	290.22	2.1641	0.0176	0.72066	0.00024
		0.5	190.48	712.74	0.7742	0.0064	0.71739	0.00004
		1	238.52	188.89	3.6624	0.0302	0.72962	0.00021
1-LUC-1-AM	2456.8	1	252.11	201.34	3.6320	0.0308	0.73024	0.0001
		0.5	248.62	134.39	5.3695	0.0435	0.73703	0.00016
		0.1	250.43	104.93	6.9302	0.0561	0.74172	0.0001

10.2. Bacia do Recôncavo

Para as amostras da Bacia do Recôncavo foram obtidas, no espectrômetro de massa razões isotópicas para as amostras ao natural e para o sistema lixiviado/resíduo, que estão na tabela 10.2.1. e 10.2.2. a seguir:

Tabela 10.2.1. amostras com Estrôncio natural:

Amostra	Material	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Erro	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Erro
P7-AR-36-BA	Rocha Total	89.5	204.9	1.265	0.004	0.718838	0.000043
P7-AR-248-BA	Rocha Total	65.4	347.8	0.544	0.006	0.715441	0.000029
P7-MG-405-BA	Rocha Total	107.6	156.5	1.993	0.014	0.72042	0.000058

Tabela 10.2.2. amostras analisadas por diluição isotópica:

Amostra	Material	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Erro	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Erro
P7-AR-36-BA	Lixiviado	15.19	1240.3	0.0355	0.0004	0.7123	0.00045
	Resíduo	82.02	88.82	2.6763	0.0219	0.72161	0.00004
P7-AR-248-BA	Lixiviado	11.5	893.92	0.0373	0.0004	0.71255	0.00050
	Resíduo	76.26	383.03	0.5767	0.0056	0.71562	0.00050
P7-MG-405-BA	Lixiviado	54.4	1537.8	0.1024	0.0011	0.71017	0.00079
	Resíduo	53.67	62.66	2.4834	0.0198	0.72791	0.00005

11. INTERPRETAÇÃO/DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

11.1. Bacia do Solimões

Em análise discriminada observa-se que as amostras compostas por frações granulométricas mais finas (0,1 μ m e 0,5 μ m) apresentaram razões $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ superiores às amostras com maior fração granulométrica (1 μ m, 2 μ m, 4 μ m, 5 μ m e 10 μ m) esses posicionados próximos à origem do diagrama isocrônico para $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (figura 11.1.1.).

O fato de estas razões serem maiores nas frações granulométricas inferiores causa, um alinhamento inversamente proporcional entre fração granulométrica e valores das razões isotópicas adotadas, verificando que os minerais mais finos apresentam uma maior quantidade de ilitas diagenéticas, e conseqüentemente, maior quantidade de ^{87}Rb e, portanto de ^{87}Sr . Isto se confirma ao observarmos a tabela 9.1.1. onde podemos observar a concentração de ilitas e interestratificados ilita-esmectita diagenéticos contidos nas diversas frações analisadas.

Das dez amostras da Bacia do Solimões analisadas em um diagrama isocrônico, nove apresentam-se relativamente alinhadas, sugerindo uma homogeneização isotópica de Estrôncio em torno de 274 ± 15 milhões de anos. A amostra que não se alinhou apresentou problemas, possivelmente analíticos, que fizeram com que fosse descartada. O evento de homogeneização presente nestas amostras pode ter diferentes causas, a exemplo:

- Diagênese tardia;
- Metamorfismo de baixo grau (Anquimetamorfismo);
- Alteração hidrotermal pervasiva.

A idade estratigráfica das formações Juruá e Jandiatuba, donde foram extraídas estas amostras, é interpretada como relativa ao Carbonífero médio a superior e Carbonífero inferior, respectivamente, em função de seu posicionamento estratigráfico (Eiras *et al* 1994). Observa-se, portanto que a idade isocrônica obtida é cerca de 50 e 60 M.a. mais jovem que as interpretadas como de deposição dessas rochas. Tal diferença pode estar relacionada a modificações isotópicas introduzidas pelos eventos citados acima. Em períodos de diagênese prolongada, Lee *et al* (*apud* Misuzaki 1990), sugere-se que as frações mais grossas apresentam idades mais antigas quando comparadas às frações granulométricas mais finas.

11.2. Bacia do Recôncavo

As amostras da Bacia do Recôncavo apresentaram pontos analíticos dispersos no diagrama isocrônico (Figura 11.2.1.) e sem alinhamentos significativos para o sistema rocha total, lixiviado e resíduo. A “best fit line”, considerando todos os pontos analíticos, apresenta idade de 340 M.a., com elevado erro analítico (130 M.a.). Tal valor absoluto é bastante superior a idade estratigráfica interpretada (130 M.a., segundo Zalán *et al* 2000).

A diferença entre estas idades e o alto erro analítico da idade calculada (± 130 M.a) invalidam estes dados para uma datação absoluta das formações Pojuca e São Sebastião.

Acredita-se que as análises geocronológicas aqui apresentadas parecem ter sofrido forte influência dos minerais detríticos, intrínsecos das amostras estudadas. Esta mineralogia detrítica contendo ^{87}Sr radiogênico herdado das áreas fonte teria produzido esta idade mais antiga, assim como seu alto erro analítico.

Na amostra P7-AR-36-BA os resultados das análises radiométricas do sistema rocha total, lixiviado e resíduo apresentaram-se dispersos no diagrama isocrônico. A razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ do lixiviado foi a menor, quando comparada à rocha total e resíduo. Isto pode ser função decorrente do fato que a composição química do lixiviado concentrou o estrôncio do carbonato contido na rocha total. O ataque com ácido clorídrico do carbonato permitiu que todos os seus elementos químicos tornassem parte integrante do lixiviado. O resíduo apresentou uma razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ alta, o que é interpretado como sendo consequência do déficit em estrôncio devido à lixiviação do carbonato e aumento do teor de rubídio no resíduo com a alta proporção de interestratificados illita esmectita (I/S). Este interestratificado contém ^{87}Rb nos estratos ilíticos, contribuindo assim para o aumento da razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. A análise da rocha total da amostra P7-AR-36-BA teve razões isotópicas intermediárias aquelas encontradas no lixiviado e no resíduo, o que é de se esperar, pois é a soma de todas as razões contidas na rocha.

Na amostra P7-MG-405-BA as razões isotópicas $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtidas para o lixiviado foram baixas devido a sua alta concentração de ^{86}Sr após a dissolução de todos os componentes mineralógicos que continham este isótopo, sendo este então concentrado no lixiviado.

O resíduo apresentou alta concentração das razões isotópicas analisadas. Isto se deve a presença de feldspatos detríticos que causaram aumento na concentração de ^{87}Rb e ^{87}Sr . A rocha total, como esperado, apresentou valores intermediários ao resíduo e ao lixiviado.

A amostra P7-AR-248-BA apresentou baixos valores das razões isotópicas para todos os padrões analisados. O lixiviado, por conter maior concentração de ^{86}Sr herdado dos carbonatos, apresentou baixos valores para as razões isotópicas estudadas.

O resíduo e a rocha total apresentaram valores muito próximos para as razões $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Este fato é decorrente da ineficácia do processo de lixiviação adotado para esta amostra, pois no resíduo ainda encontra-se carbonato (ankerita), implicando no acréscimo do valor de ^{87}Sr para este sistema, e portanto na diminuição da razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$.

O relativo alinhamento das dez frações mais ricas para as amostras de Bacia de Solimões indica uma homogeneização isotópica de Sr em cerca de 250 milhões de anos. Tal fato não é observável quando utilizada a metodologia 100% rocha total, sendo a idade derivada de uma única fração de cerca de 450 milhões de anos, função provavelmente da perda de Sr radiogênico pelas frações mais ricas (tabela 9.1.1).

A idade obtida para as frações pesadas das amostras reservatório da Bacia de Solimões, de cerca de 250 milhões de anos, pode relacionar-se à migração isotópica ocorrida tardiamente como reflexo de alguma colisão formada da cordilheira Andina.

Quanto à Bacia de Roraima o alto alinhamento em diagrama isotópico Rb/Sr das amostras bridade, rocha e rocha total sugere influência na formação da estrutura. No caso destas amostras, acredita-se que o evento orogênico que proporcionou a formação dos embasamentos das Províncias Poje de São Sebastião não foi intenso e suficiente para que ocorresse a homogeneização isotópica do sistema para os diferentes valores apresentados.

12. CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho demonstra que a metodologia Rb/Sr quando aplicado a rochas sedimentares necessita de critérios básicos quanto a sistemática de coleta, caracterização do grau de diagênese e/ou anquimetamorfismo presente, separação das frações envolvidas (sistema fração fina, lixiviado, resíduo e rocha total), além da determinação e qualificação de minerais detríticos e diagenéticos. Tais estudos são fundamentais para a interpretação dos dados em diagrama isocrônico, podendo indicar as épocas relacionadas à sedimentação, diagênese e/ou anquimetamorfismo, ou mesmo dados sobre as áreas fontes ou eventos tectônicos tardios.

O relativo alinhamento das dez frações finas obtidas para as amostras da Bacia do Solimões indica uma homogeneização isotópica de Sr em cerca de 280 milhões de anos. Tal fato não é observado quando utilizada a metodologia K/Ar nessas frações finas, onde a idade distribui-se num amplo intervalo de tempo, entre aproximadamente 150 e 350 milhes de anos, função provavelmente da perda de Ar radiogênico nessas frações mais finas (tabela 9.1.1)

A idade obtida para as ilitas presentes nos arenitos reservatórios da Bacia do Solimões, de cerca de 280 milhões de anos, pode relacionar-se a modificações isotópicas ocorridas tardiamente como reflexo do evento colisional formador da cordilheira Andina.

Quanto a Bacia do Recôncavo o não alinhamento em diagrama isocrônico Rb/Sr dos sistemas lixiviado, resíduo e rocha total sugere influência de minerais detríticos. No caso destas amostras, acredita-se que o evento diagenético que proporcionou a formação dos argilominerais das Formações Pojuca e São Sebastião, não favoreceu ou não foi intenso o suficiente para que ocorresse a homogeneização isotópica do estrôncio para os diferentes sistemas analisados.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. B. – 1990 – Influência dos Tratamentos de Dispersão de Amostra na Análise dos Argilominerais por Difração de Raios X. Aplicação nos Folhelhos Cretáceos do Flanco Noroeste da Foz do Amazonas. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências –UFRJ. pp. 437.

CAIXETA, J. M.; BUENO, G.V.; MAGNAVITA, L. P.; FEIJÓ, F. – 1994 – Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. Rio de Janeiro, vol. 8 (1) p.163-172.

CAIXETA, J. M.; MAGALHÃES, M. R. C.; MATO, L. F. – 1991 – Marco 15: Um evento Transgressivo Lacustre na Base da Formação Pojuca (Andar Aratu-Cretáceo inferior), Bacia do Recôncavo, Bahia. *XII Congresso Brasileiro de Paleontologia*. Resumo das Comunicações, Sociedade Brasileira de Paleontologia. São Paulo, p.49.

CLAUER, N.&CHAUDHURI, S. Clays in Crustal Environments: Isotope Dating and Tracing. 1995. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin - Germany. p. 359. 2^a ed.

CORDANI, U. G., KAWASHITA, K., e THOMAZ FILHO, A. – 1978 – *Applicability of the Rubidium – Strontium method to shales and related rocks*. Tulsa/, AAPG./Separata de American Association of Petroleum Geologists. *Contributions to The Geologic time scale*. / Tulsa/, s.d. pp. 93-117 (AAPG, Studied in Geology, 6).

CORDANI, U. G.; THOMAZ-FILHO, A.; BRITO-NEVES, B. B. & KAWASHITA, K. On the applicability of the Rb-Sr method to argillaceous sedimentary rocks: some examples from Precambrian sequences of Brazil. *Giornale di Geologia*. Bologna, 1985. ser. 3^o, vol 47/1-2, pp. 253-280.

CORDANI, U. G.; BRITO-NEVES, B. B.; FUCK, R. A.; PORTO R.; THOMAZ-FILHO, A. & CUNHA F. M. B. Estudo preliminar de integração do pré-Cambriano com os eventos tectônicos das Bacias Sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro. PETROBRAS. CENPES. SINTEP, 1984. p. 70., Publicação n. 15.

CORDANI, U. G; KAWASHITA, K.; KIKUCHL, R. K. P.; CÔRTEZ, P. L. & SIMOMOTO, M. A. - 1985 - Sistemática Rb-Sr em rochas sedimentares argilosas do Paleozóico da Bacia Amazônica. *Anais do II Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém. pp. 94 - 105.

COUTO, J. G. P.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K.; IYER, S. S. & MORAES, N. M. P. - 1981 - Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*. vol. II., pp. 5 - 16.

DICKIN, A. P. Radiogenic Isotope Geology. 1997. Cambridge CB : Cambridge University, xvi, 490 p. : il.

EIRAS, J. F.; BECKER, C. R.; SOUZA, E. M.; GONZAGA, F. G.; SILVA, J. G. F.; DANIEL, L. M. F.; MATSUDA, N. S. - 1994 - Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. Rio de Janeiro, vol.8 (1), p.17-45.

FAURE, G. Principles of isotope geology. 1986. John Wiley & Sons, Inc. New York. p. 589. 2ª ed.

GOMES, C. F. Argilas: O que São e Para que Servem. Edição da Fundação Calouste Gulbenkian. 1988. Lisboa. 1ª ed.

KAWASHITA, K. - 1972 - O Método Rb-Sr em Rochas Sedimentares. Aplicação para as Bacias do Paraná e do Amazonas. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. pp. 111.

LIEWIG, N.; CLAUSER, N.; - 2000 - K-Ar Dating of Varied Microtextural Illite in Permian Gas Reservoirs, Northeast Germany. *Clay Minerals*, Vol 35, pp. 271-281.

MATO, L. F.; SANCHES, C. P.; SOUSA, E. M. - 1989 - Eventos Transgressivos Lacustres: Origem dos marcos Elétricos/Radioativos da Formação Candeias (Cretáceo Inferior) Compartimento Nordeste da Bacia do Recôncavo, Bahia. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Paleontologia*. Curitiba, vol. 2, p. 984-999.

MILANI, E. J., & ZALÁN, P. V.; - 1999 - An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. *Episodes - Journal of International Geoscience*, Vol 22, No. 3, pp. 199-205.

MIZUSAKI, A. M.P. - 1992 - Comportamento do Rb e Sr em Sedimentos Recentes Implicações na Datação Radiométrica de Rochas Sedimentares. Tese de doutoramento. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. pp. 140pp.

MIZUSAKI, A.M.P.; KAWASHITA, K.; THOMAZ FILHO, A. (1999) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em sedimentos recentes implicações na datação radiométrica de rochas sedimentares. *Revista Pesquisas IG/UFRGS*, v. 25, n. 1, p. 75-88.

MISUZAKI, A. M. P.; ANJOS, S. M. C.; WANDERLEY FILHO, J. R.; SILVA, O. B.; COSTA, M. G. F.; LIMA, M. P.; KAWASHITA, K. – 1990 – Datação K/Ar de Ilitas Diagenéticas. *Boletim de geociências da Petrobrás*. Rio de Janeiro, 4 (3): 237-252.

SANT'ANNA, L. G. – 1994 – Mineralogia das Argilas e Evolução Geológica da Bacia de Fonseca minas Gerais. Tese de mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. pp. 151pp.

SANT'ANNA, L. G. – 1999 – Geologia, Mineralogia e Gênese das Esmeclitas dos Depósitos Paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de doutoramento . Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. pp. 293pp.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de Argilas. Editora Edgard Blucher Ltda. 1989. São Paulo – SP – Brasil. 2ª ed. Vol. 1.

THOMAZ FILHO, A. – 1976 – Potencialidades do Método Rb-Sr para Datação de Rochas Sedimentares Argilosas. Tese de doutoramento. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. pp. 128pp.

TORQUATO, J.R.; KAWASHITA, K.; (1994) Geocronologia Nuclear. *Revista de Geologia -Igc-USP*, v. 7, Capítulo V, p. 91-124.

14. ANEXOS



Figura 1.1.1 Mapa de distribuição das espécies de aves e dos registros de avifauna
atualizados, modificados de Zúñiga et al. (2004)

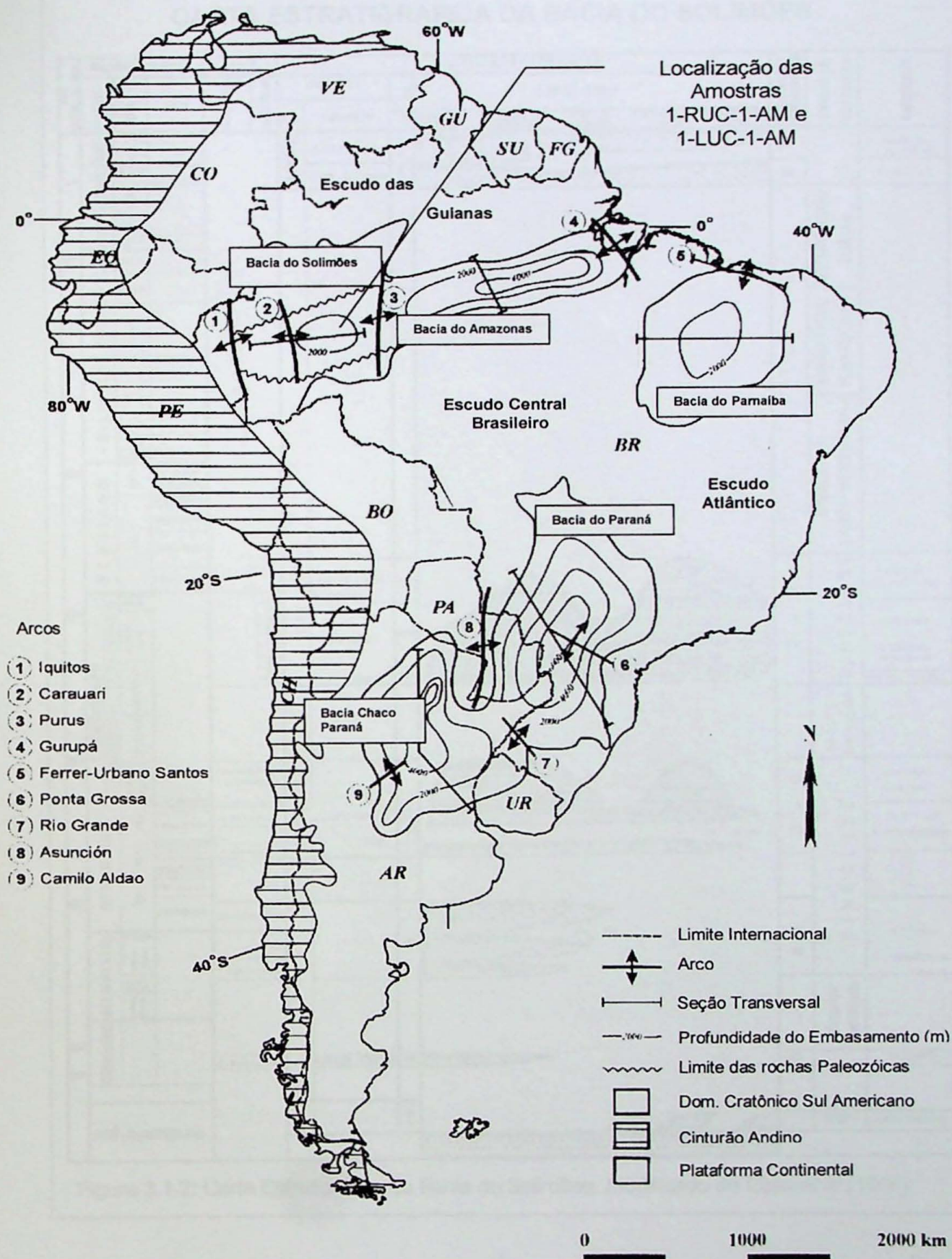


Figura 3.1.1: Mapa de localização da Bacia do Solimões e das respectivas amostras estudadas. Modificado de Zalán *et al* 2000.

CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO SOLIMÕES

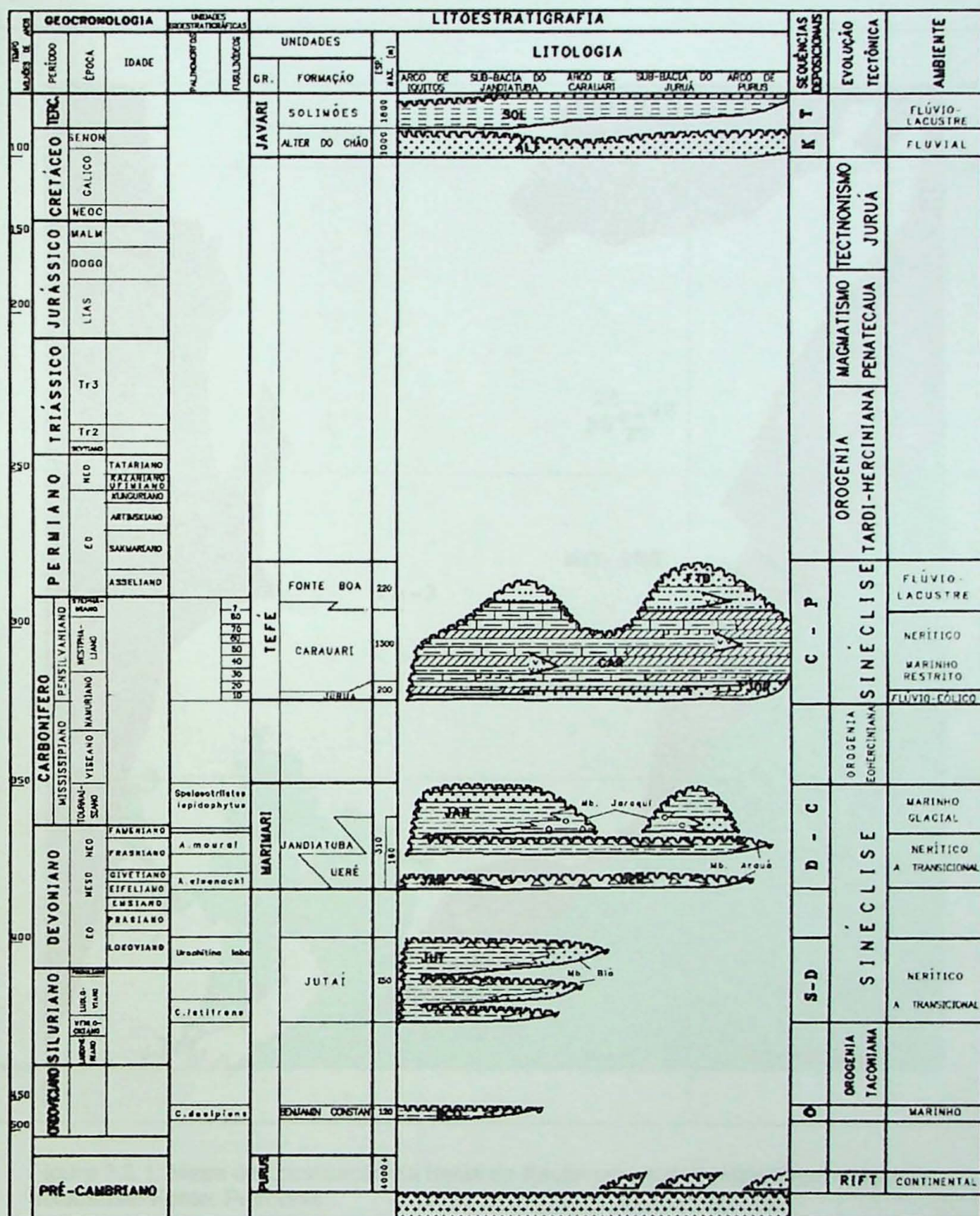


Figura 3.1.2: Carta Estratigráfica da Bacia do Solimões. Modificado de Eiras et al (1994)

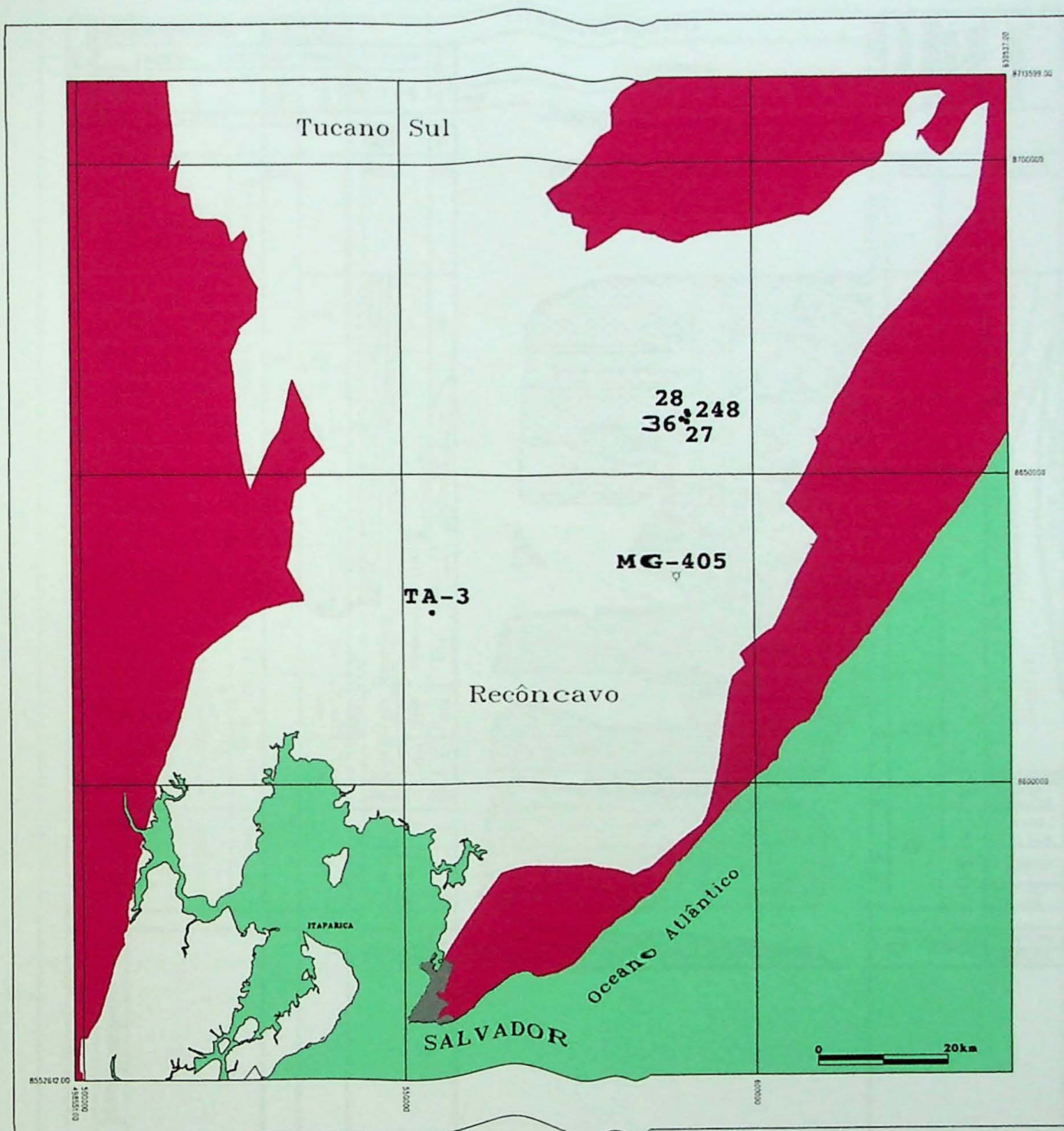


Figura 3.2.1: Mapa de Localização da Bacia do Recôncavo e das respectivas amostras estudadas. Fonte: Petrobrás.

CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO RECÔNCAVO

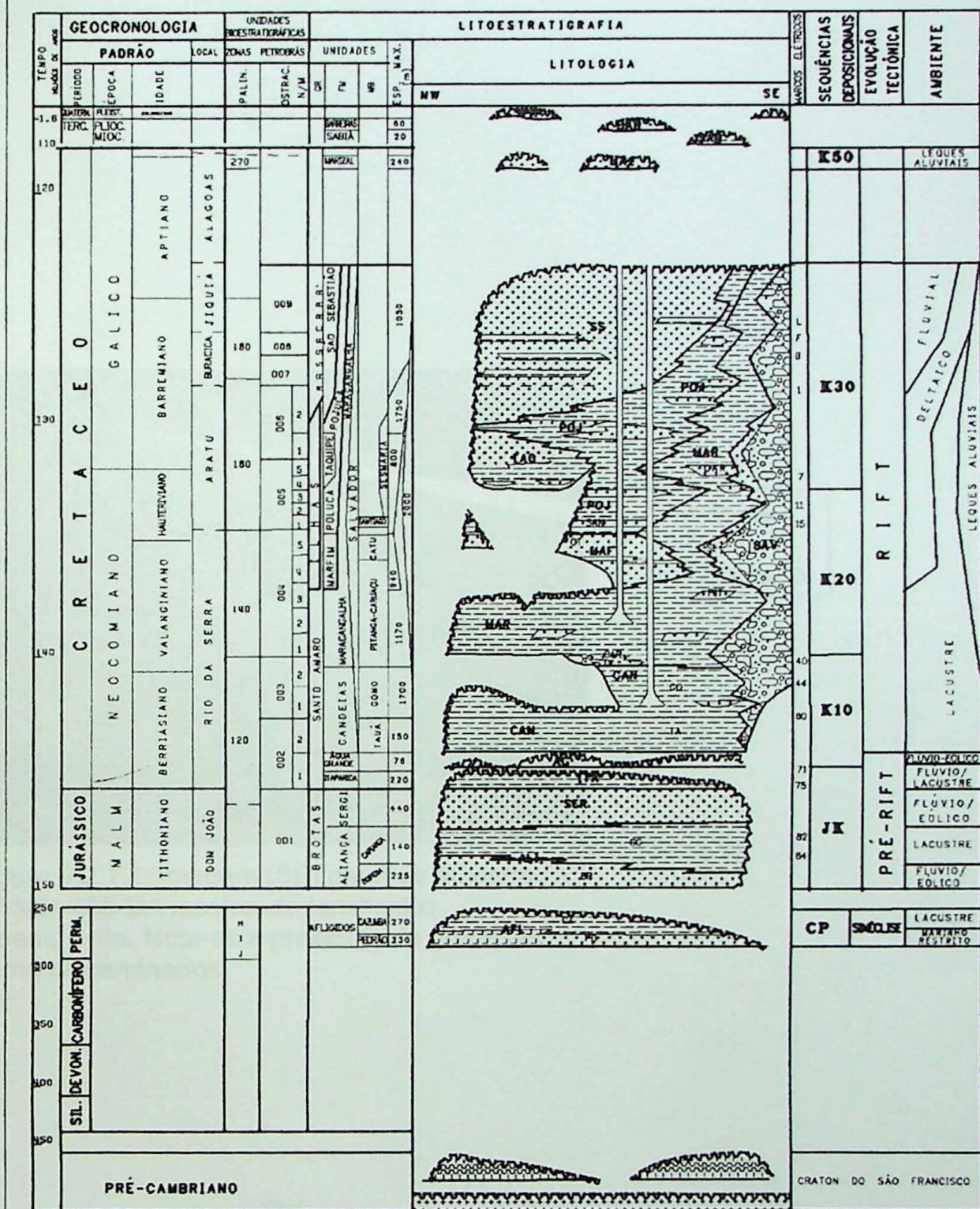


Figura 3.2.2: Carta Estratigráfica da Bacia do Recôncavo. Modificado de Caixeta *et al* (1994)

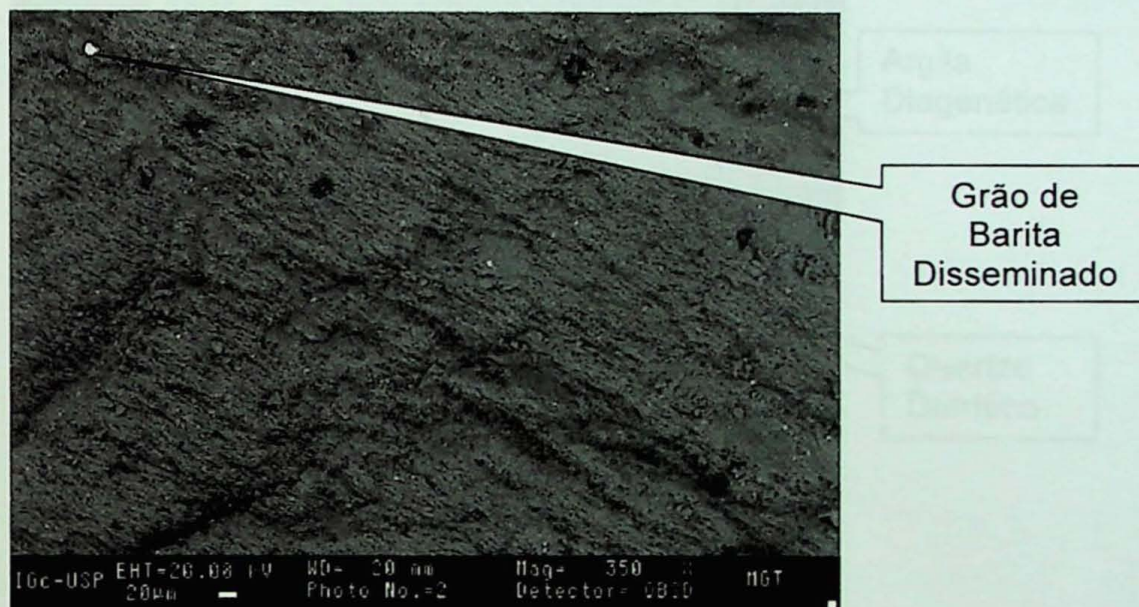


Figura 9.2.1.1: imagem (SE) geral da amostra P7-MG-405-BA mostrando laminação proeminente. Nota-se a presença de grãos de barita disseminados.

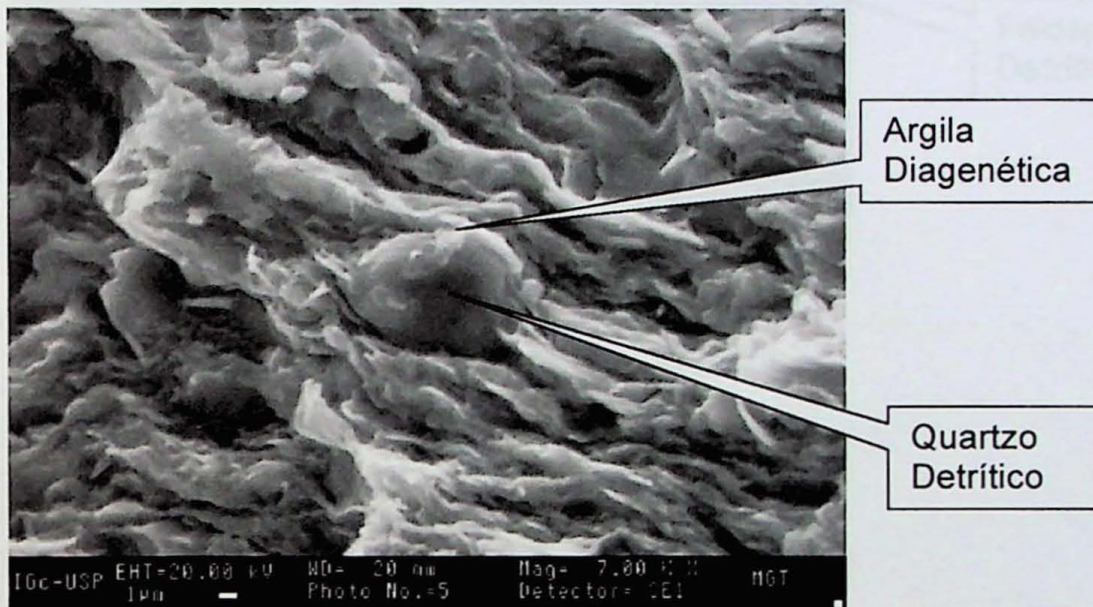


Figura 9.2.1.2: imagem (SE) em detalhe de grão de quartzo detrítico sendo envolvido por argila diagenética, na amostra P7-MG-405-BA.

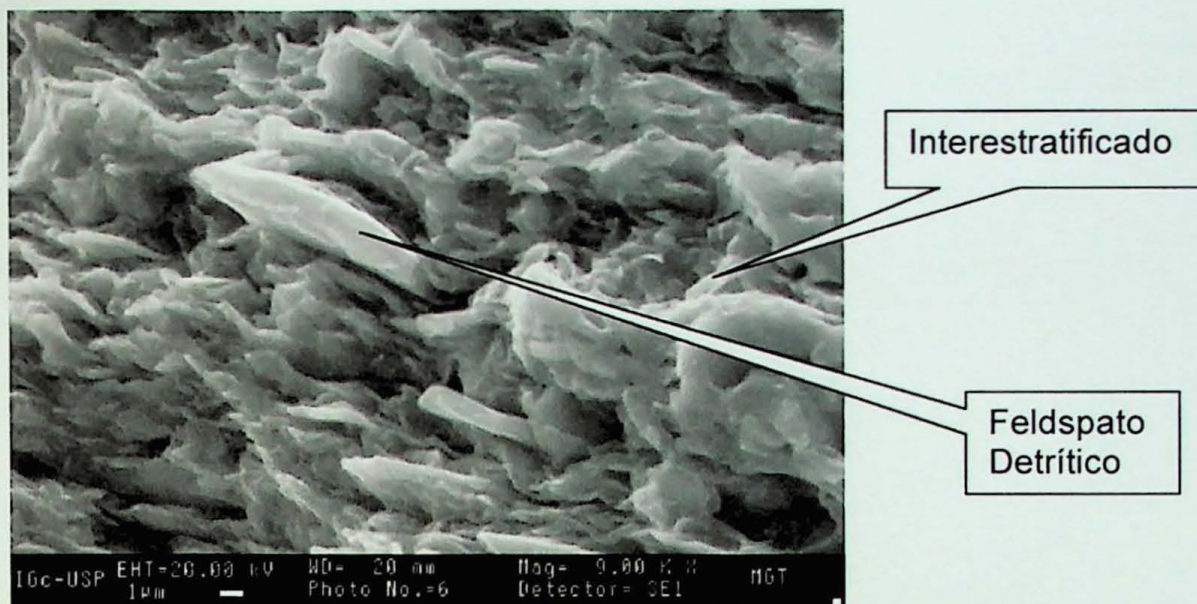
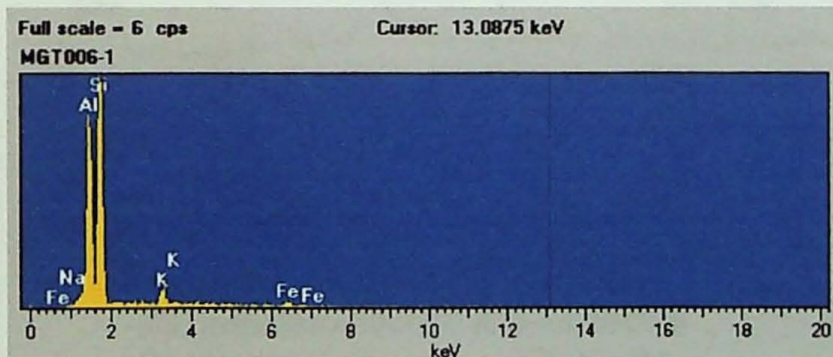


Figura 9.2.1.3: imagem (SE) de pequenos grãos de feldspato detrítico, com hábito pontiagudo na amostra P7-MG-405-BA. Nota-se interestratificados de formato ondulado. Abaixo segue análise por EDS, onde é apresentada a composição química qualitativa deste feldspato.



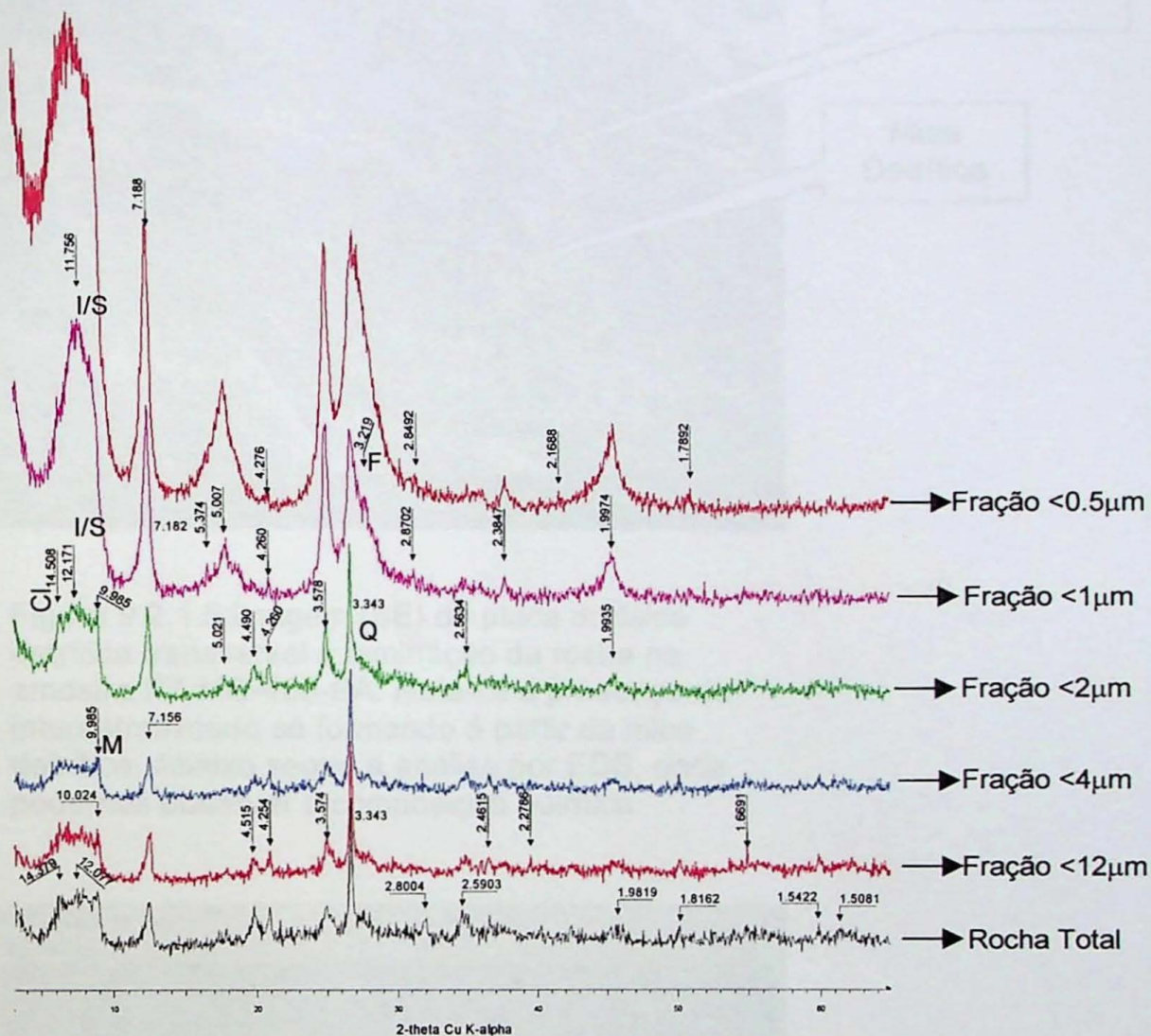


Figura 9.2.1.4: difratogramas de Raios X das diversas frações granulométricas analisadas da amostra P7-MG-405-BA, onde:

- I/S: interestratificado ilita-esmectita
 - Q: quartzo
 - Cl: clorita
 - M: mica
 - F: feldspato
- 3.343: indexação dos picos em ângstrom

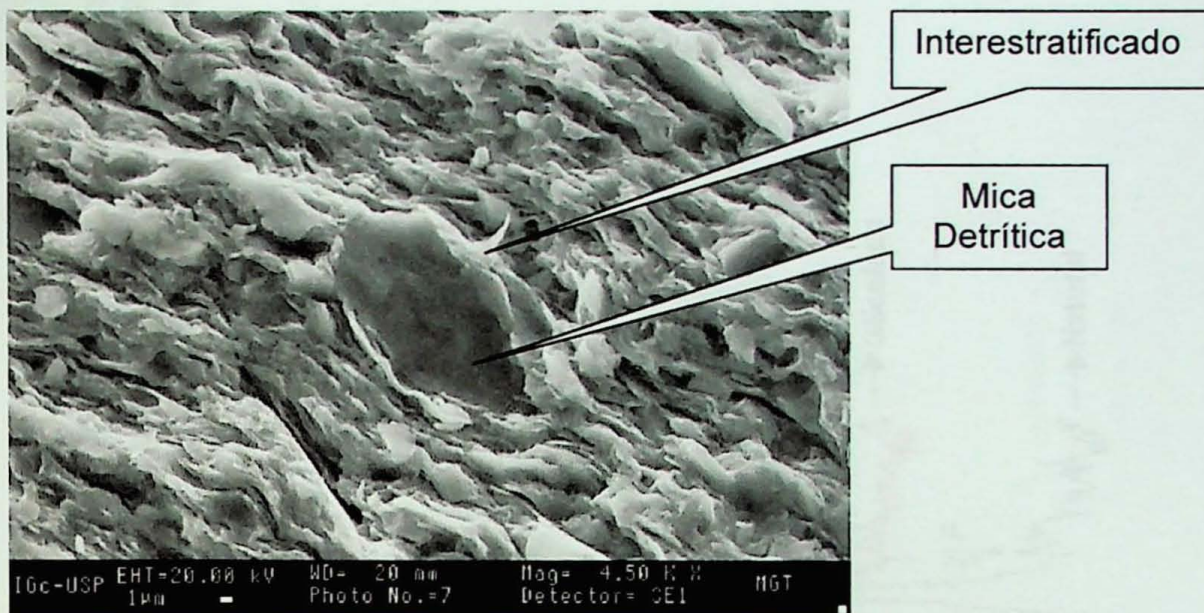


Figura 9.2.1.5:imagem (SE) de placa de Mica detrítica transversal à laminação da rocha na amostra P7-MG-405-BA. Nota-se a presença de interestratificado se formando á partir da mica detrítica. Abaixo segue a análise por EDS, onde podemos observar a composição química

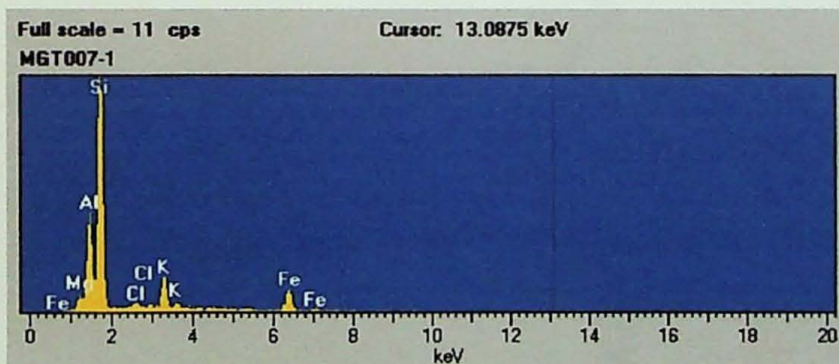


Figura 9.2.1.6: Difratogramas de raios X da amostra P7-MG-405-BA na fração 4 μ m ao natural, aquecida e glicolada, onde:
 -Cl:clorita -F:feldspato
 -I/S:interstratificado illita-esmectita
 -Q+M:quartzo mais mica

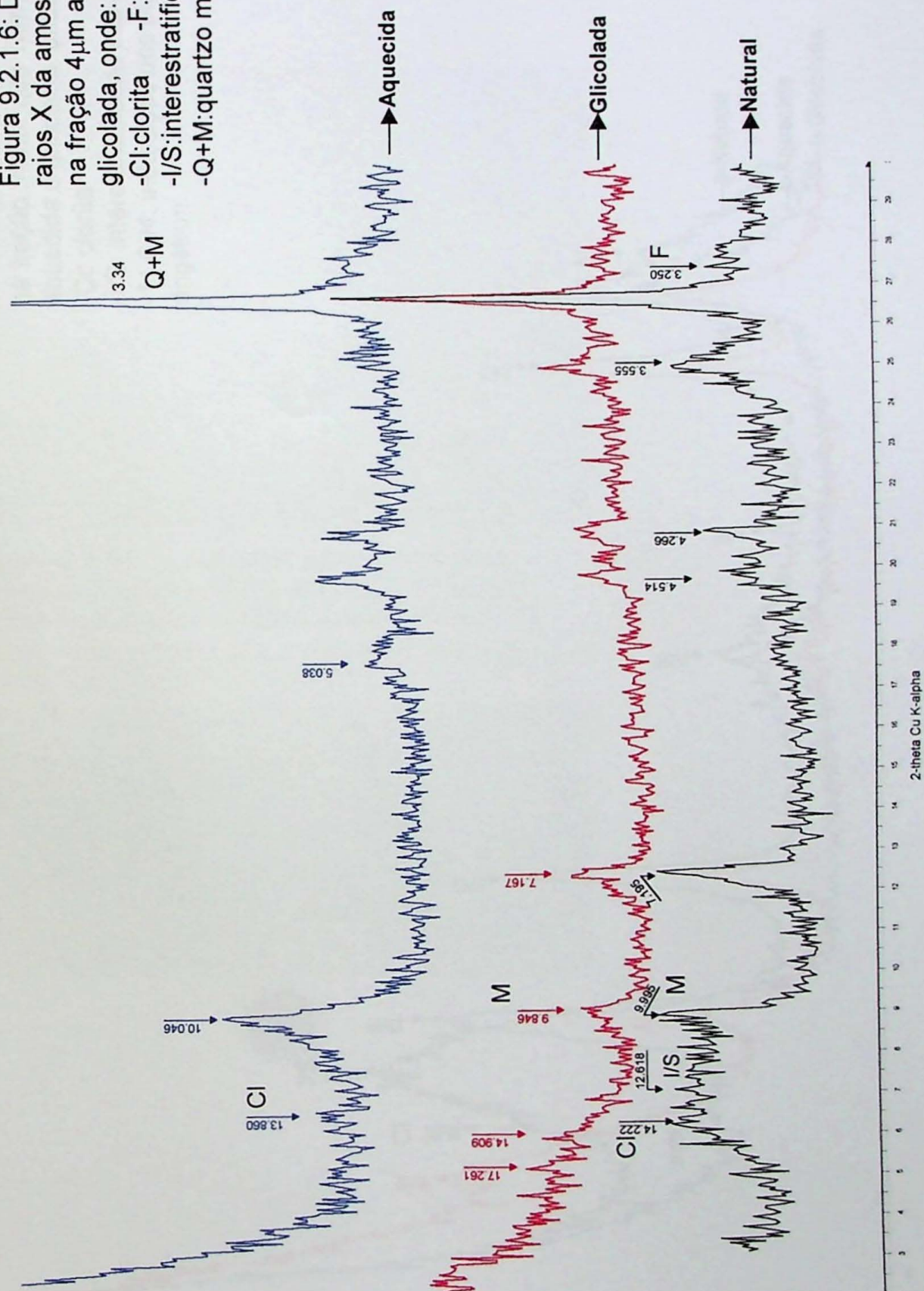
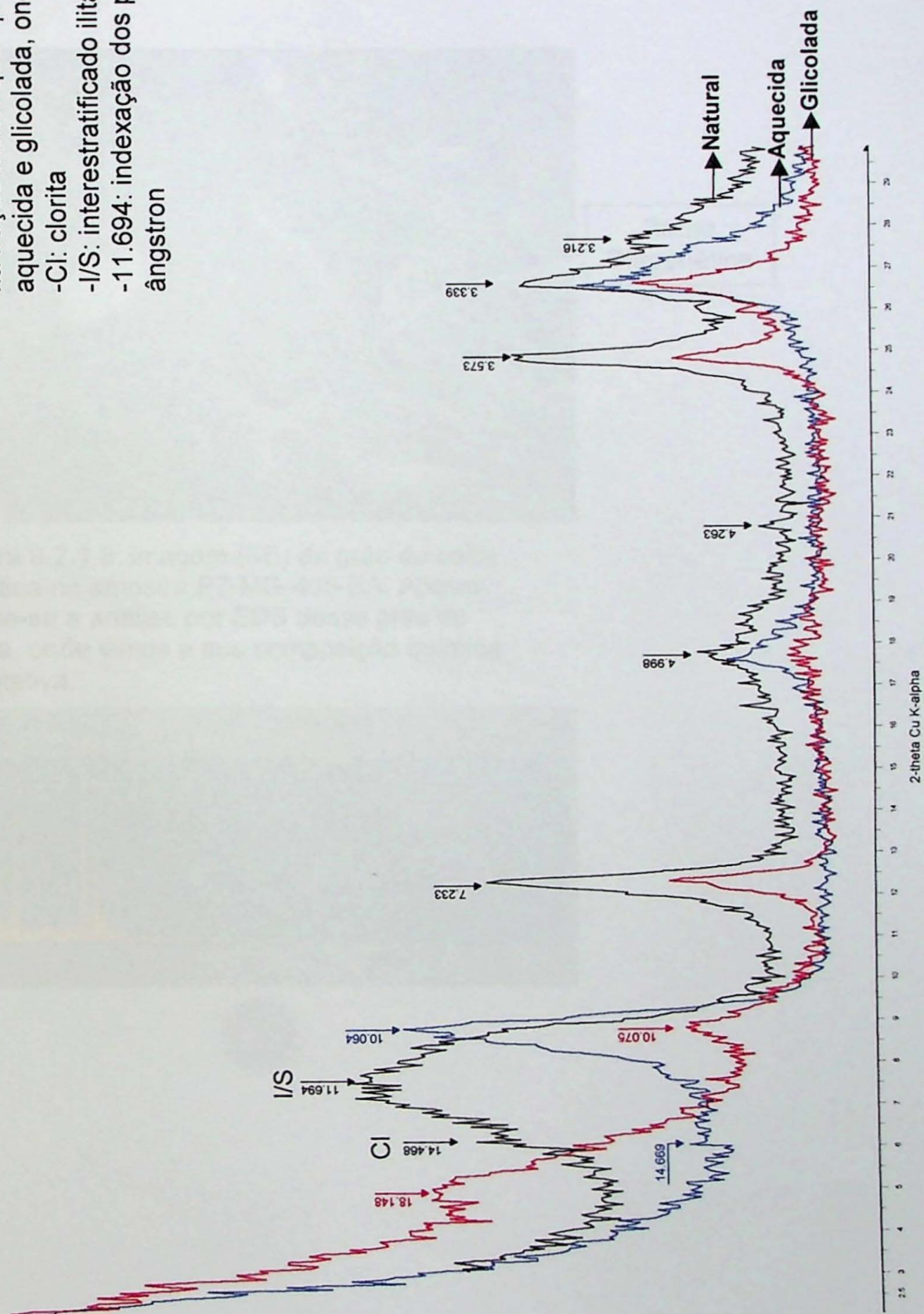


Figura 9.2.1.7: Difratomogramas de raios X da amostra P7-MG-405-BA na fração menor que 1 μm ao natural, aquecida e glicolada, onde:
 -Cl: clorita
 -I/S: interestratificado illita-esmectita
 -11.694: indexação dos picos em ângstrom



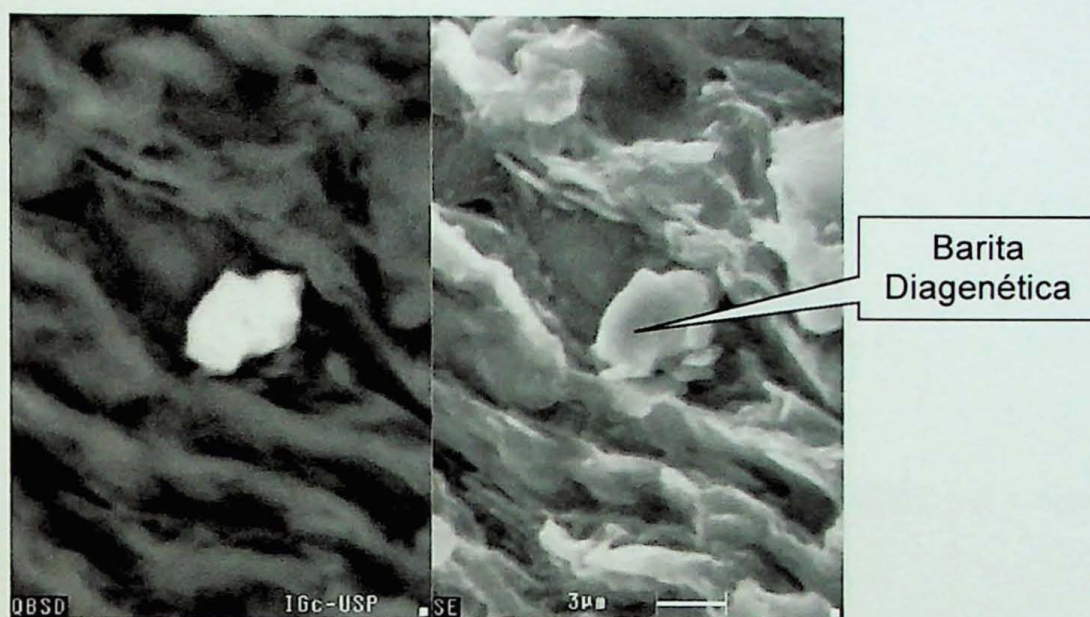
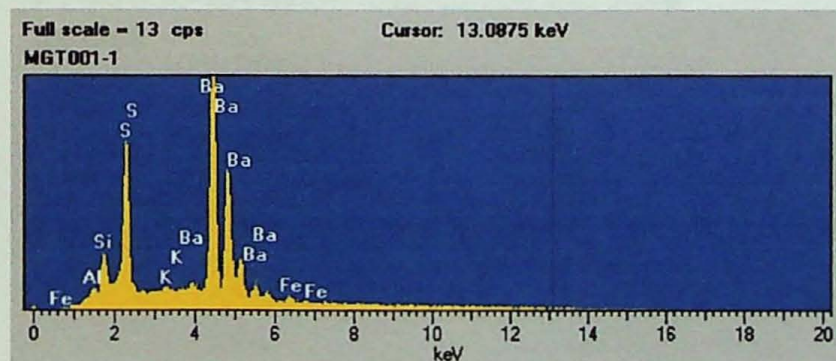


Figura 9.2.1.8: imagem (SE) de grão de baita detrítica na amostra P7-MG-405-BA. Abaixo segue-se a análise por EDS desse grão de barita, onde vimos a sua composição química qualitativa.



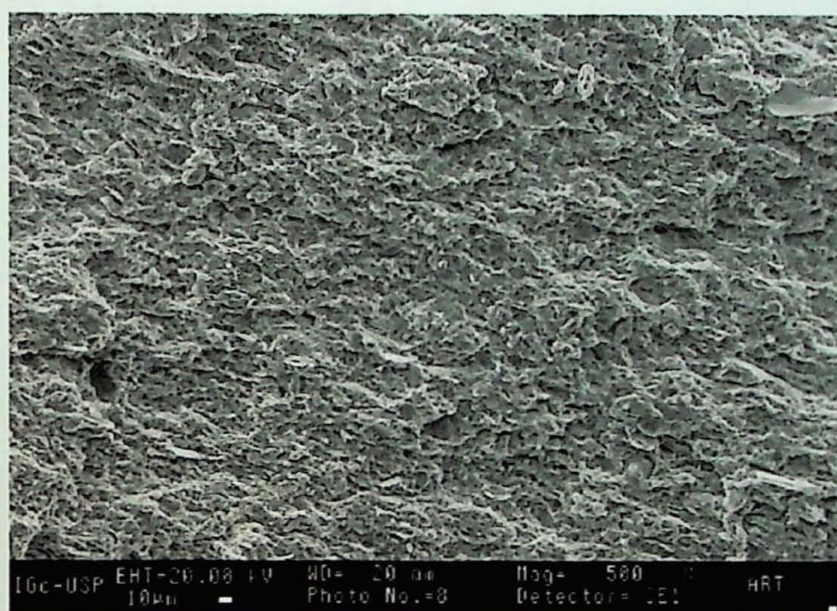


Figura 9.2.2.1.: imagem (SE) geral da amostra P7-AR-36-BA evidenciando sua estrutura maciça.

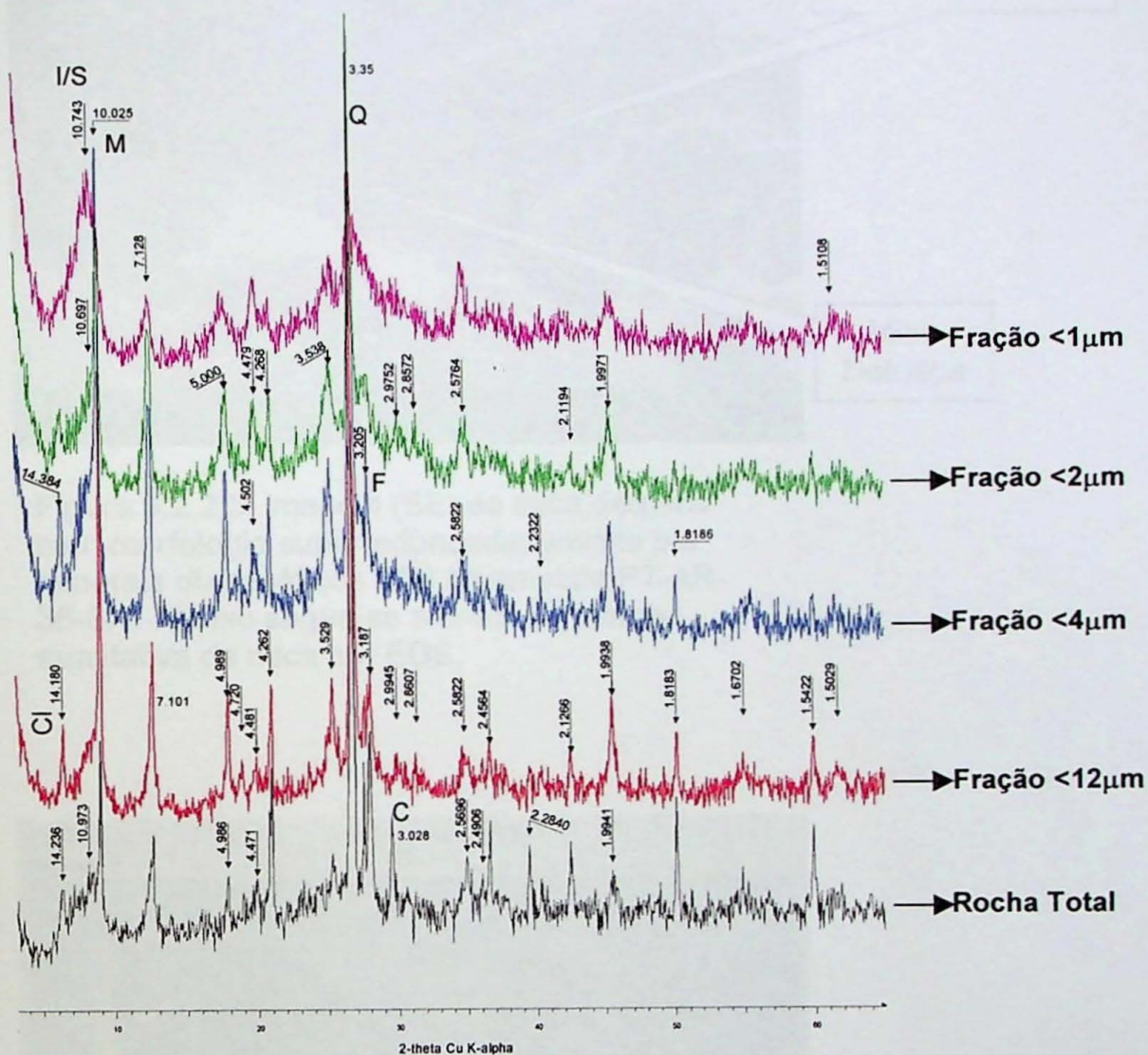


Figura 9.2.2.2: difratogramas de raios X das diversas frações granulométricas analisadas da amostra P7-AR-36-BA, onde:

- I/S: interestratificado illita-esmectita
- Q: quartzo
- M: mica
- C: calcita
- Cl: clorita
- F: feldspato
- 10.743: indexação dos picos em ângstron

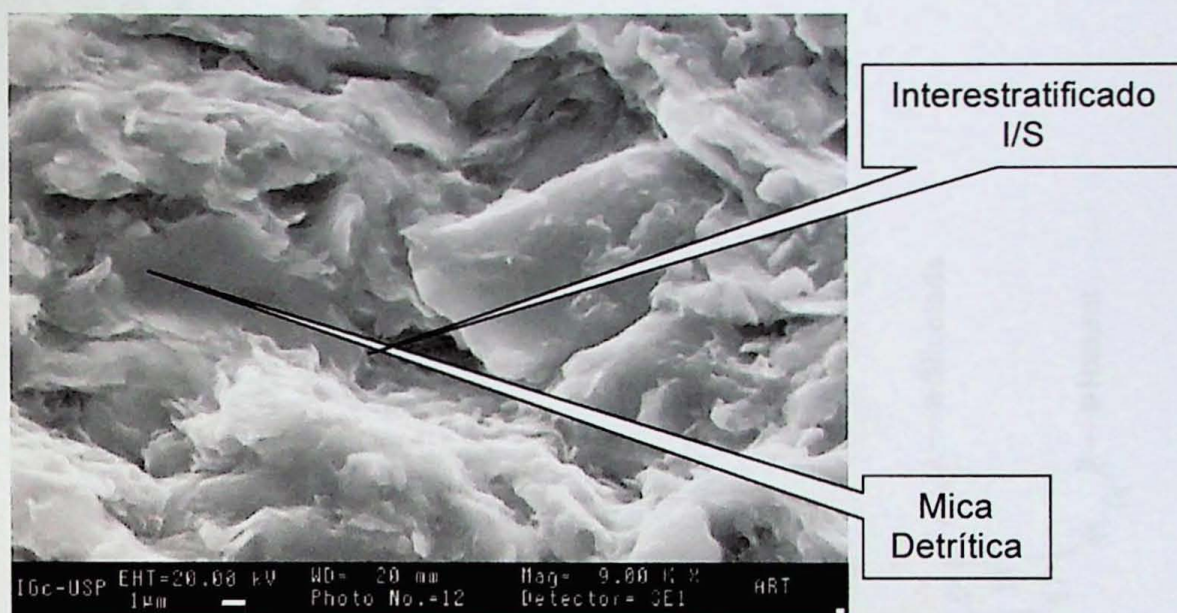


Figura 9.2.2.3: imagem (SE) de mica detrítica com morfologia subarredondada, envolto por minerais diagenéticos (I/S) na amostra P7-AR-36-BA. Abaixo segue-se a análise química qualitativa da mica por EDS.

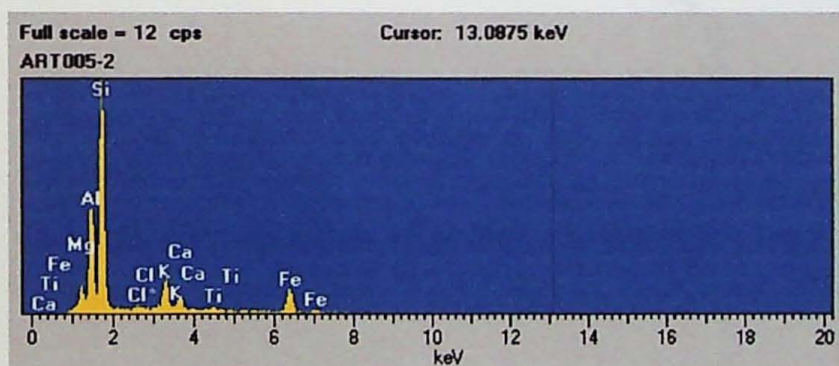


Figura 9.2.2.4: Difratogramas de raios X da amostra P7-AR-36-BA na fração 12 μ m ao natural, aquecida e glicolada, onde:
 -Cl: clorita -F: feldspato
 -I/Cl: interestratificado illita-clorita
 -Q+M: quartzo mais mica
 -M: mica
 -4.712: indexação dos picos em ângstrom

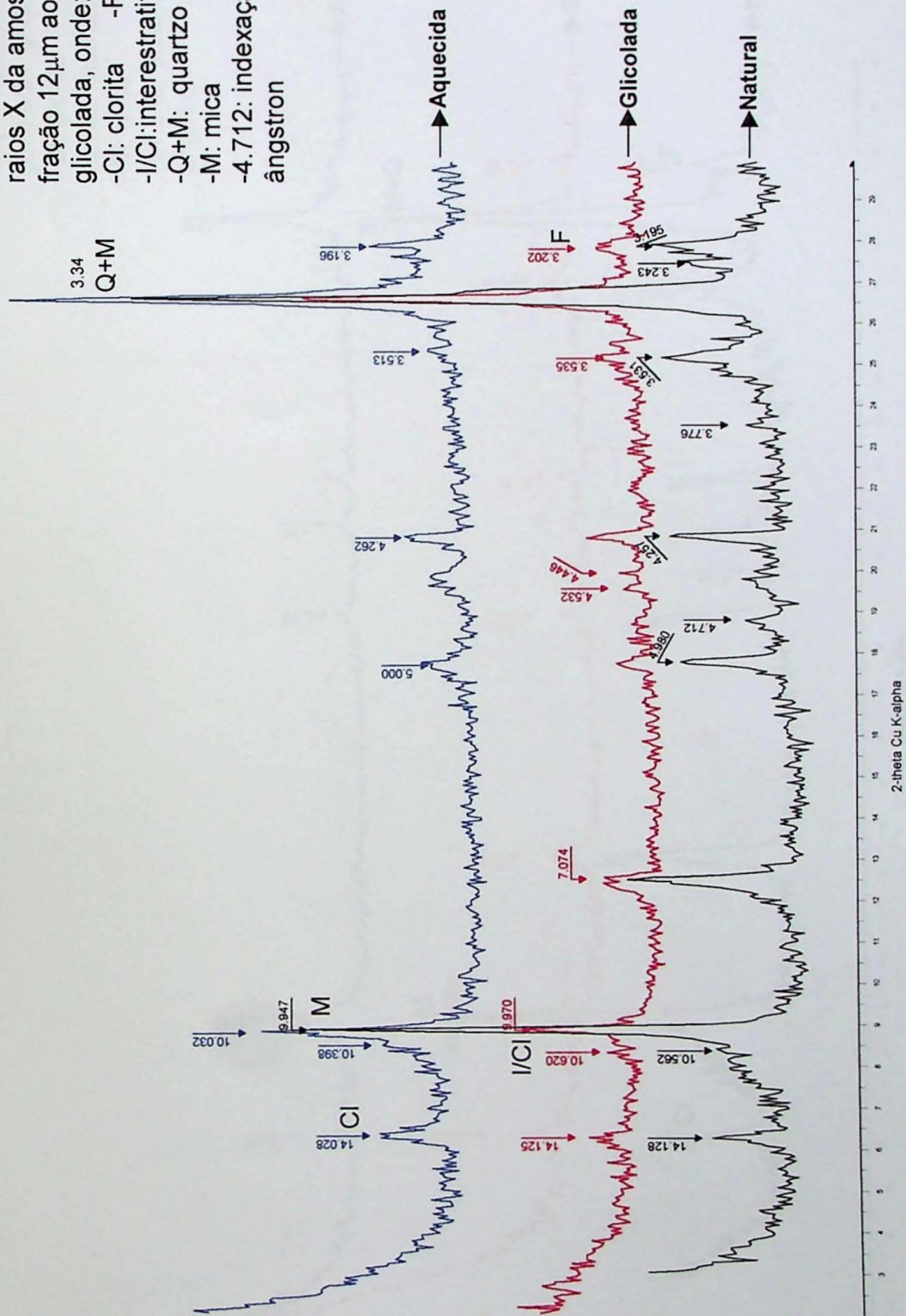


Figura 9.2.2.5: Difratomogramas de raios X da amostra P7-AR-36-BA na fração 4 μ m ao natural, aquecida e glicolada, onde:
 -Cl: clorita -F: feldspato
 -Q+M: quartzo mais mica
 -M: mica
 -14.240: indexação dos picos em ângstrom

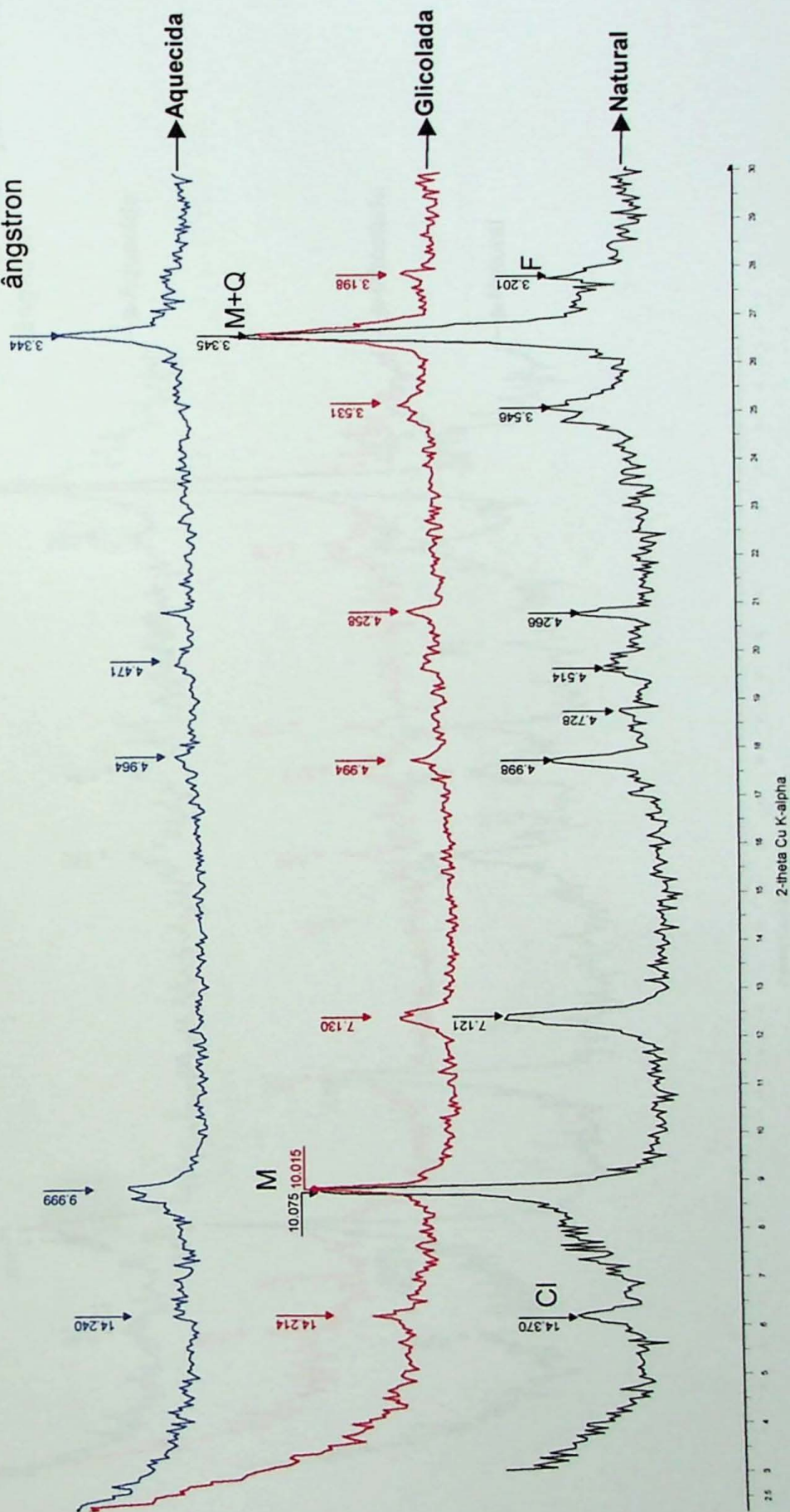


Figura 9.2.2.6: Difratomogramas de raios X da amostra P7-AR-36-BA na fração 2 μ m ao natural, aquecida e glicolada, onde:

- Cl: clorita -F: feldspato
- I/Cl: interstratificado illita-clorita
- Q+M: quartzo mais mica
- M: mica
- 7.150: indexação dos picos em ângstrom

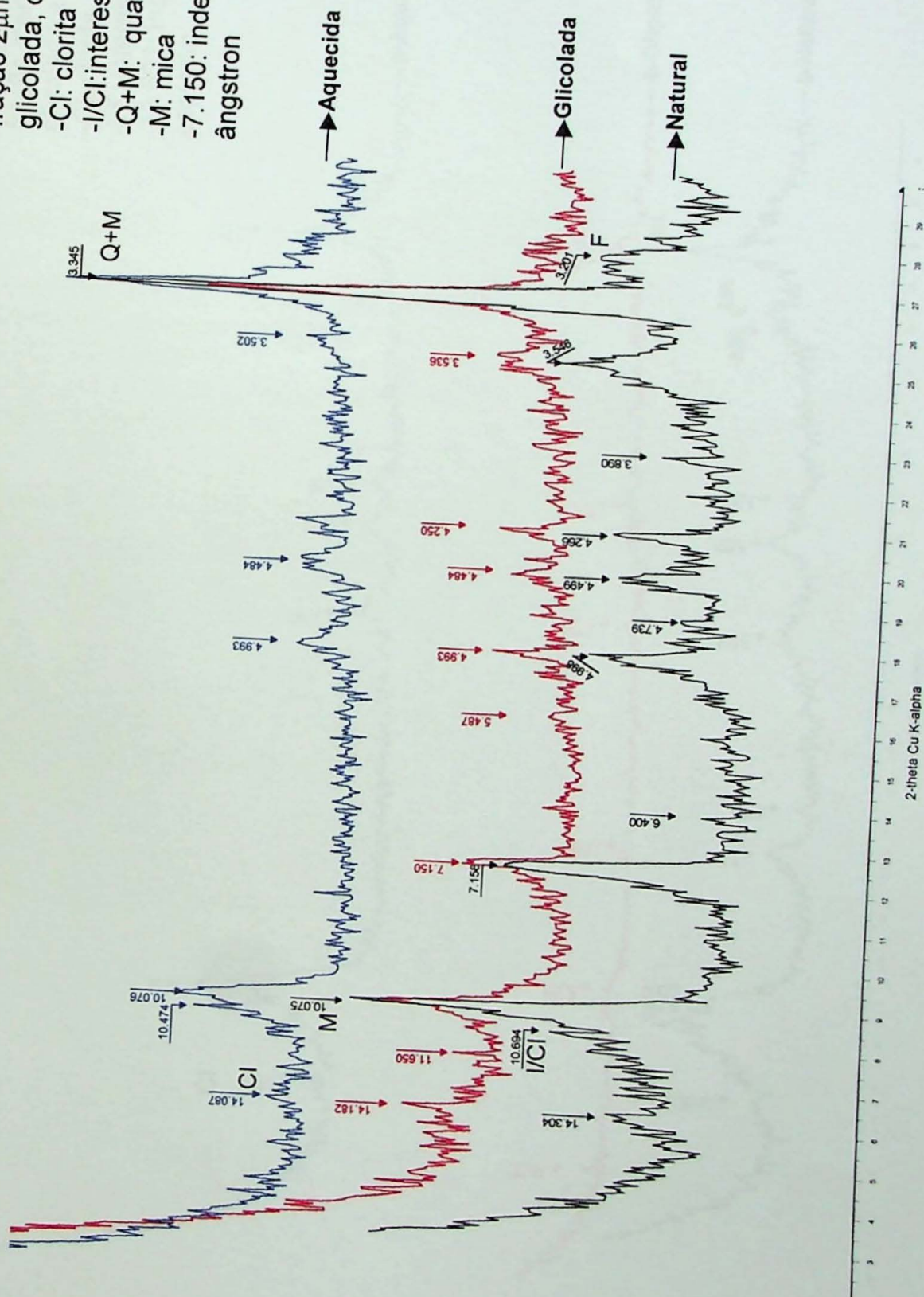
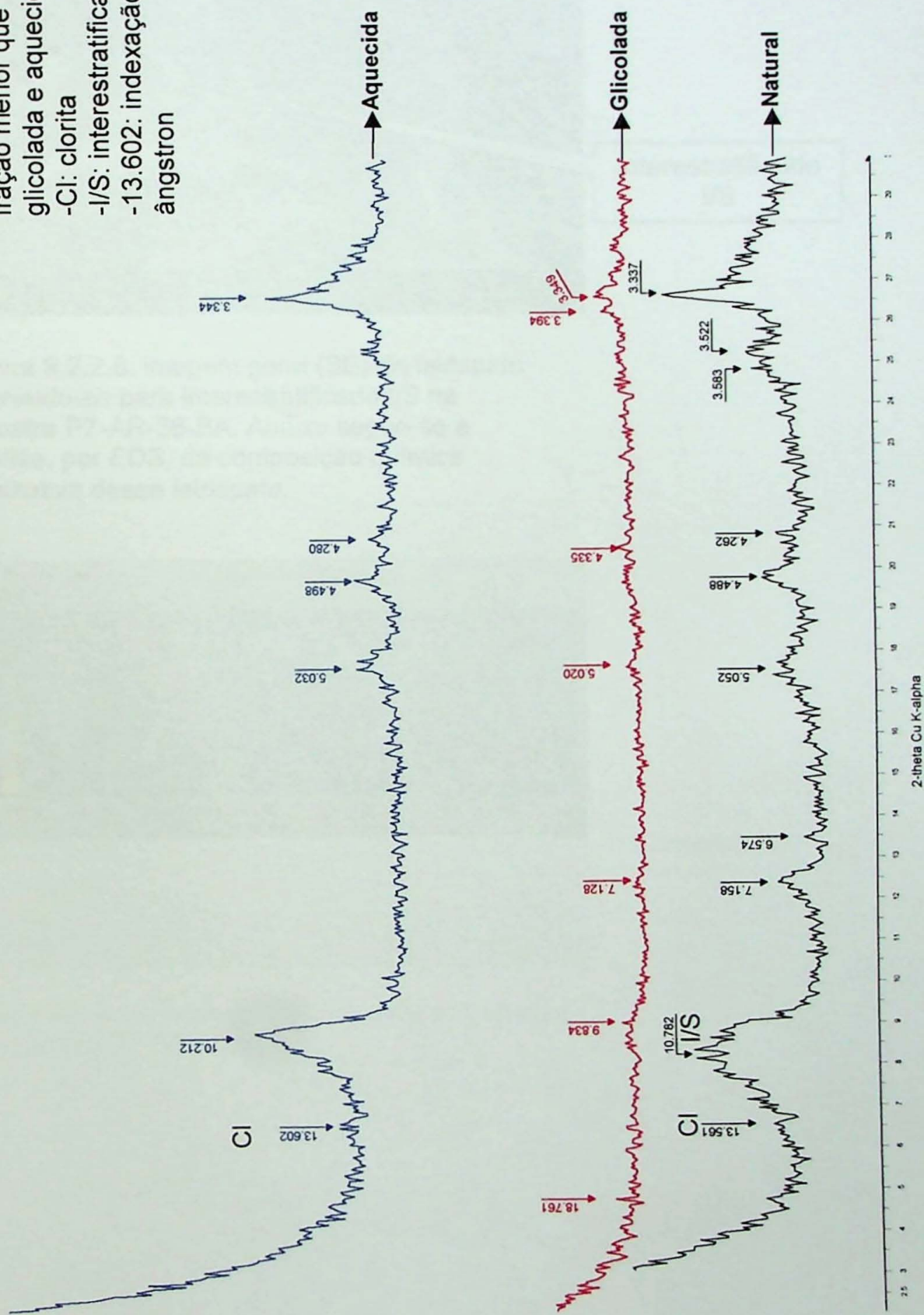


Figura 9.2.2.7: Difratomogramas de raios X da amostra P7-AR-36-BA na fração menor que $1\mu\text{m}$ ao natural, glicolada e aquecida, onde:
 -Cl: clorita
 -I/S: interestratificado ilita-esmectita
 -13.602: indexação dos picos em ângstrom



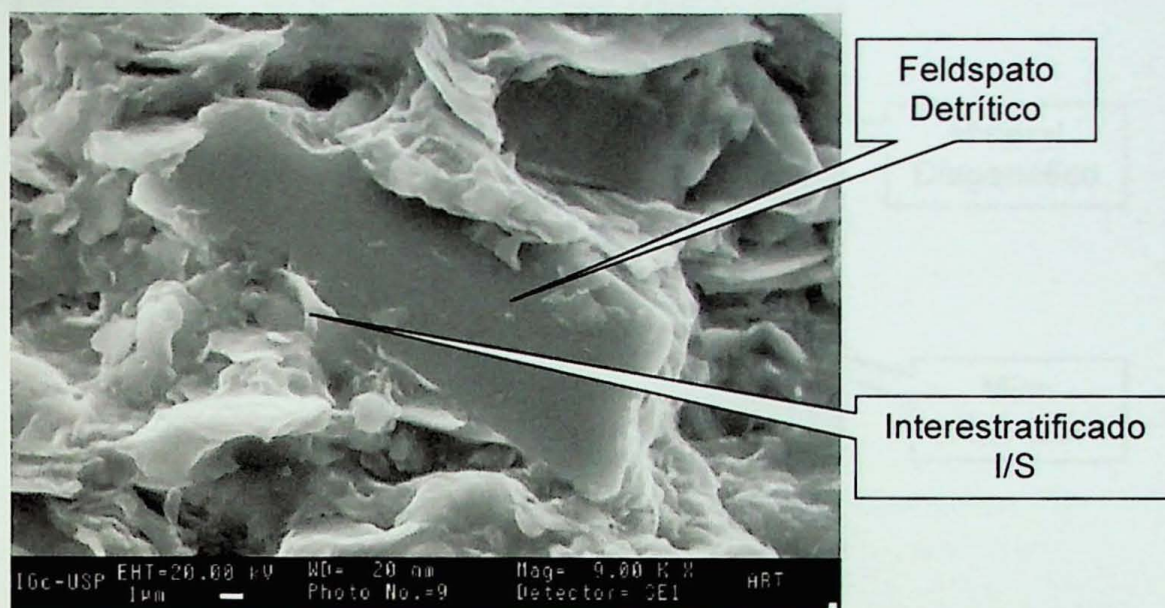


Figura 9.2.2.8: imagem geral (SE) de feldspato alterando-se para interestratificado I/S na amostra P7-AR-36-BA. Abaixo segue-se a análise, por EDS, da composição química qualitativa desse feldspato.

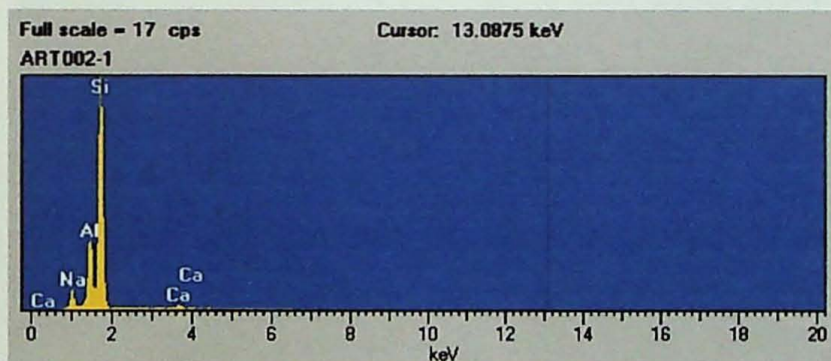




Figura 9.2.2.9.: imagem (SE) de argila detrítica circundada por minerais diagenéticos na amostra P7-AR-36-BA.

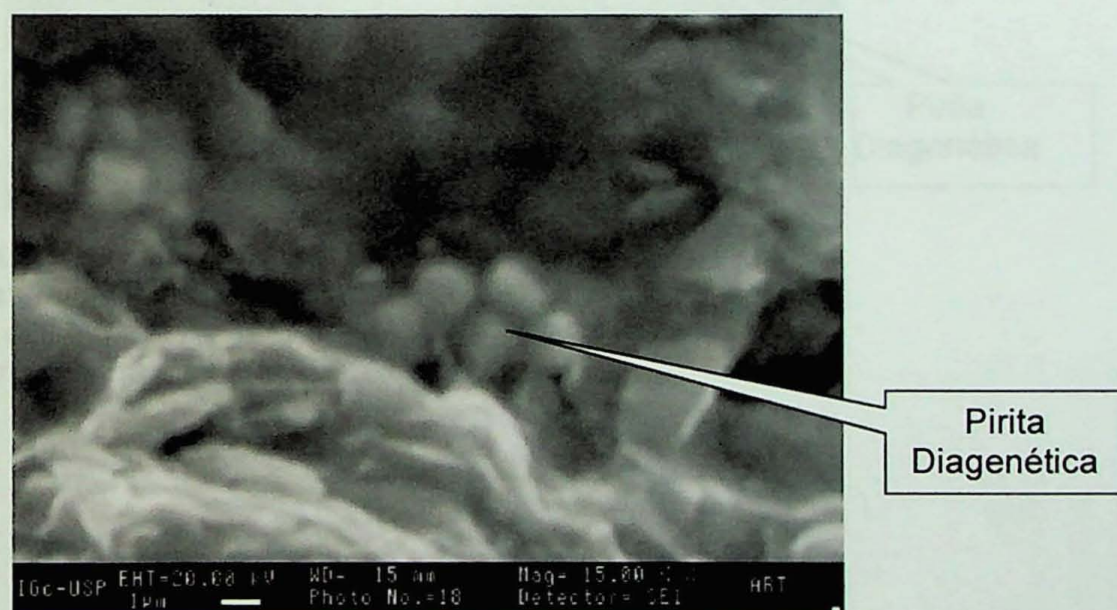


Figura 9.2.2.10: imagem (SE) de pirita diagenética na amostra P7-AR-36-BA.

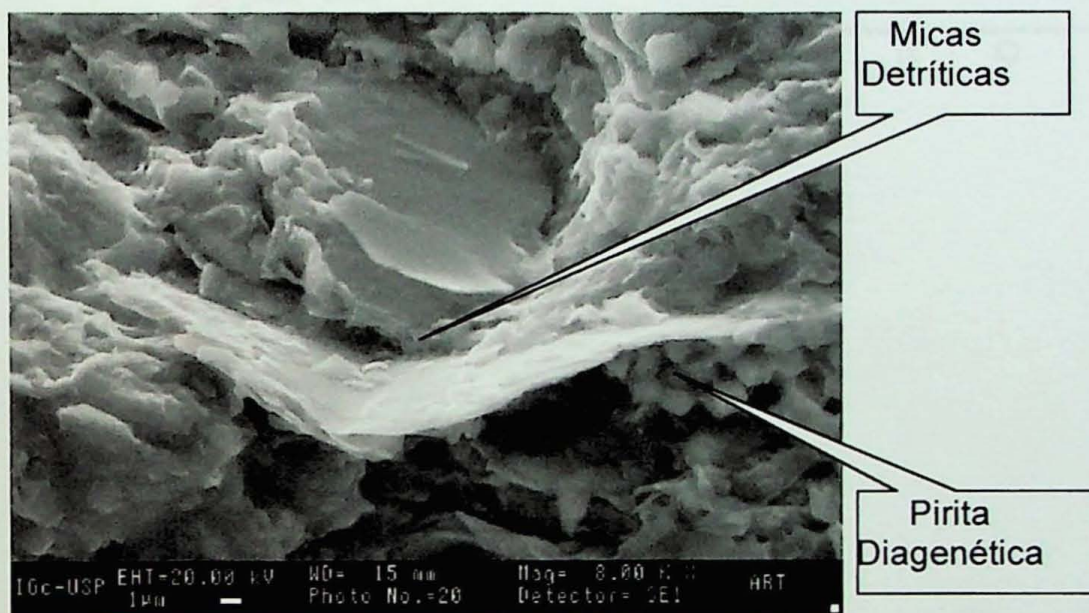


Figura 9.2.2.11: imagem (SE) em detalhe de duas micas detríticas, com pirita diagenética em abaixo delas, intercrescida num dos poros da rocha, na amostra P7-AR-36-BA.

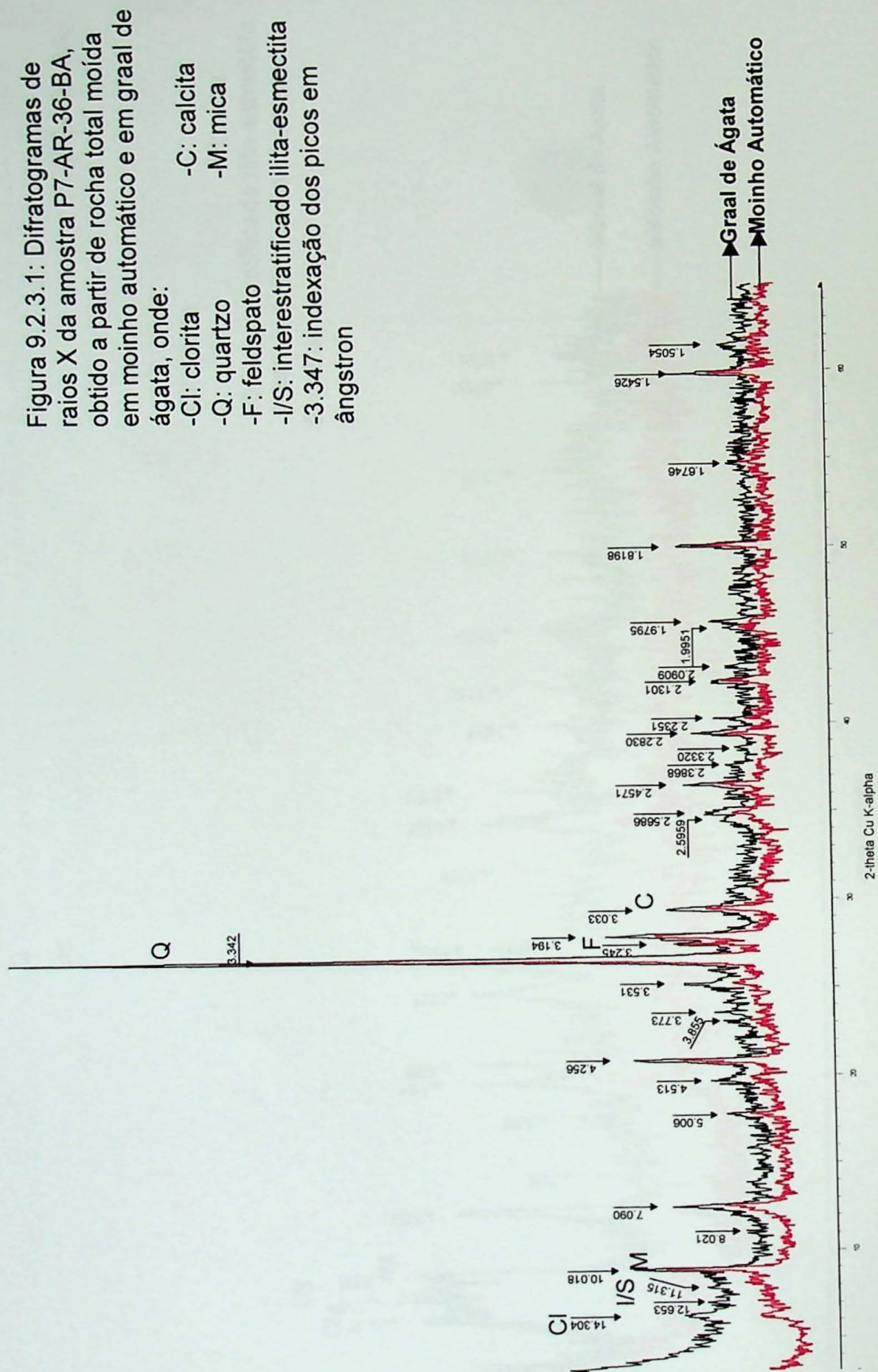


Figura 9.2.3.2: Difratogramas de raios X da amostra P7-MG-405-BA, obtido a partir de rocha total moída em moinho automático e em graal de ágata, onde:

-Cl: clorita

-Q: quartzo

-M: mica

-I/S: interestratificado ilita-esmectita

-3.347: indexação dos picos em
ângstrom

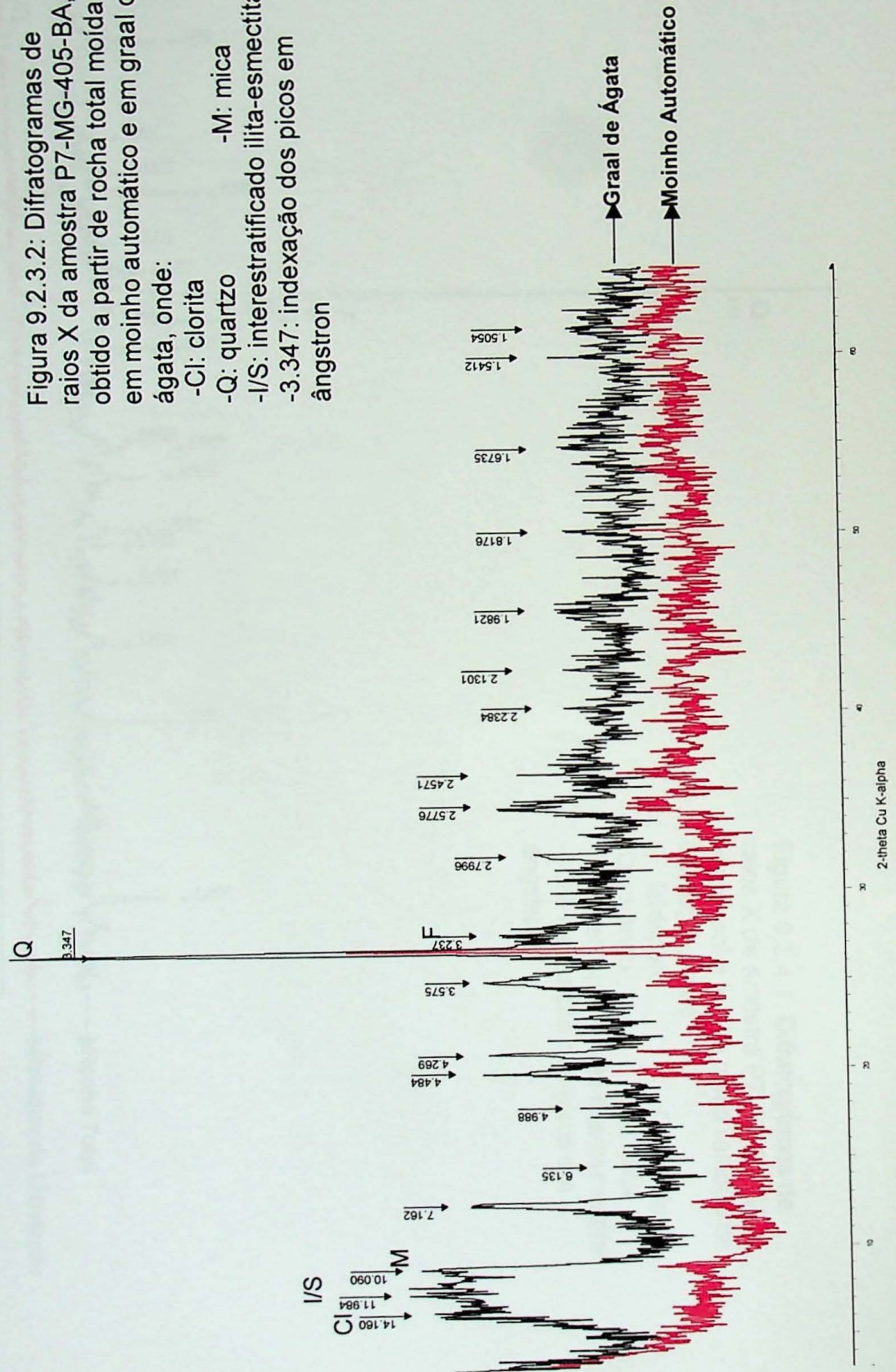


Figura 9.2.4.1: Difratomogramas de raios X da amostra P7-AR-36-BA como rocha total e como resíduo de lixiviação, onde:

- C: calcita
- F: feldspato
- Q: quartzo
- I/S: interstratificado illita-esmectita
- 3.35: indexação dos picos em ângstrom

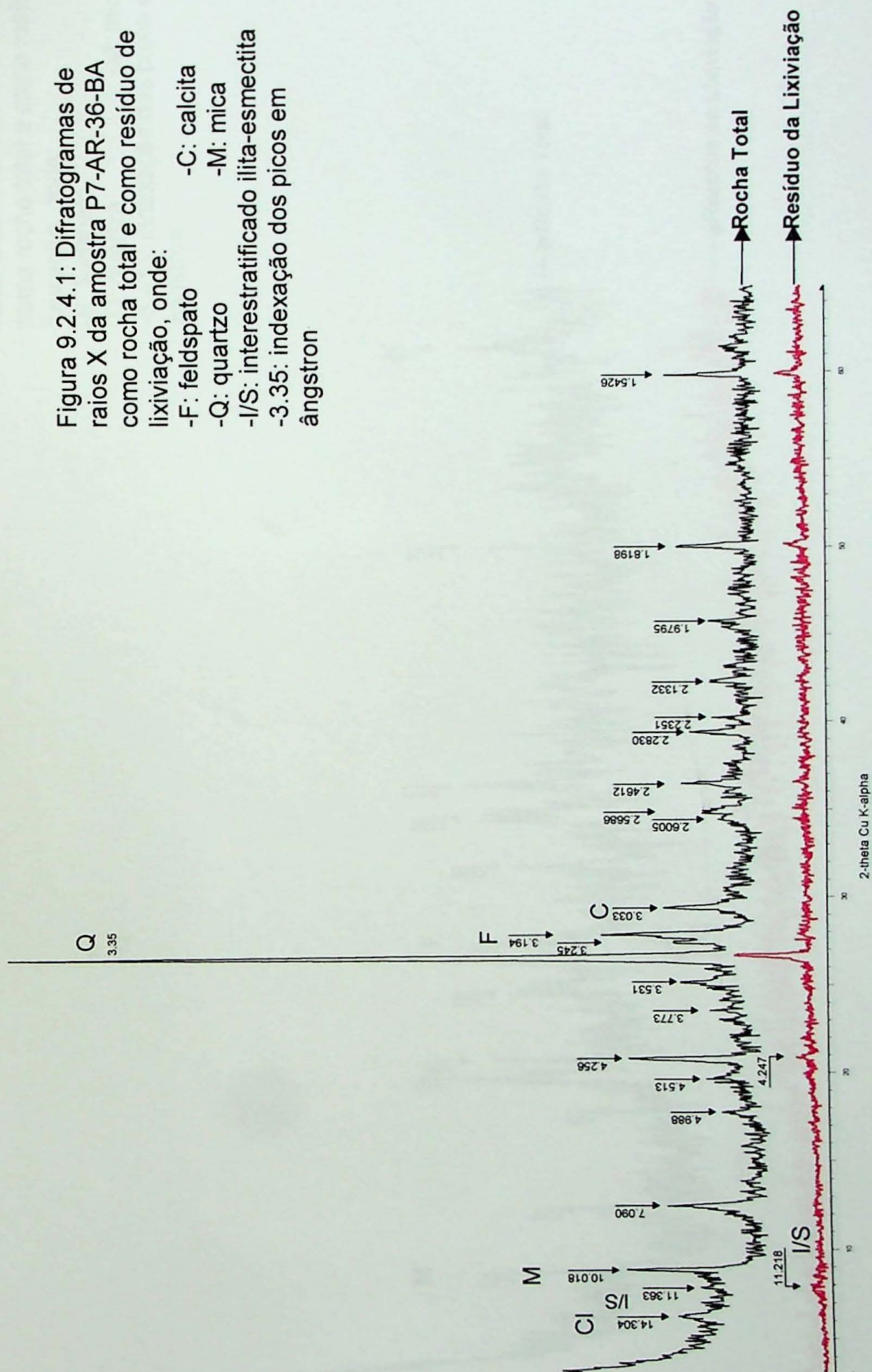


Figura 9.2.4.2: Difratogramas de raios X da amostra P7-MG-405-BA como rocha total e como resíduo de lixiviação, onde:
 -F: feldspato
 -Q: quartza
 -M: mica
 -6.413: indexação dos picos em ângstrom

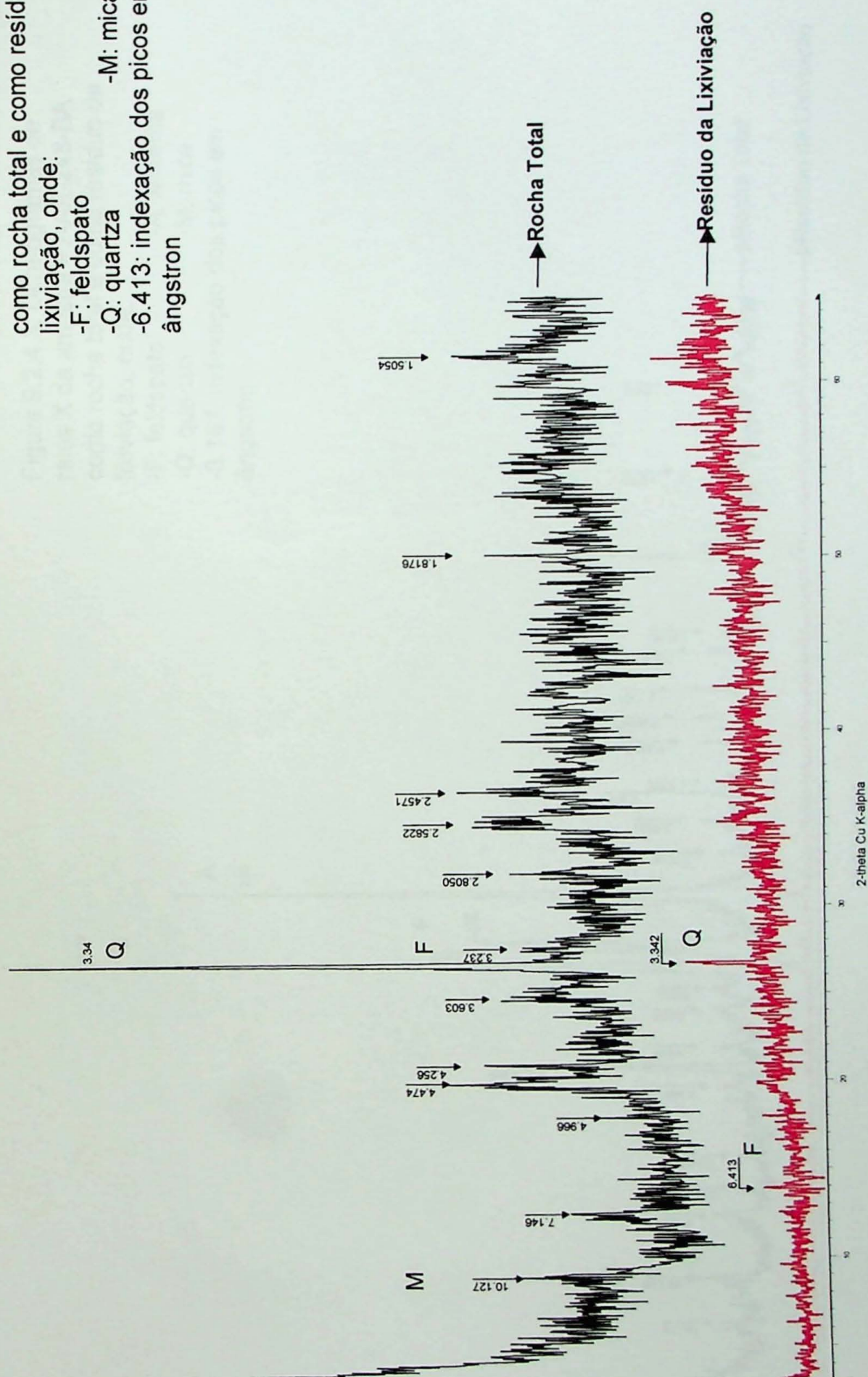
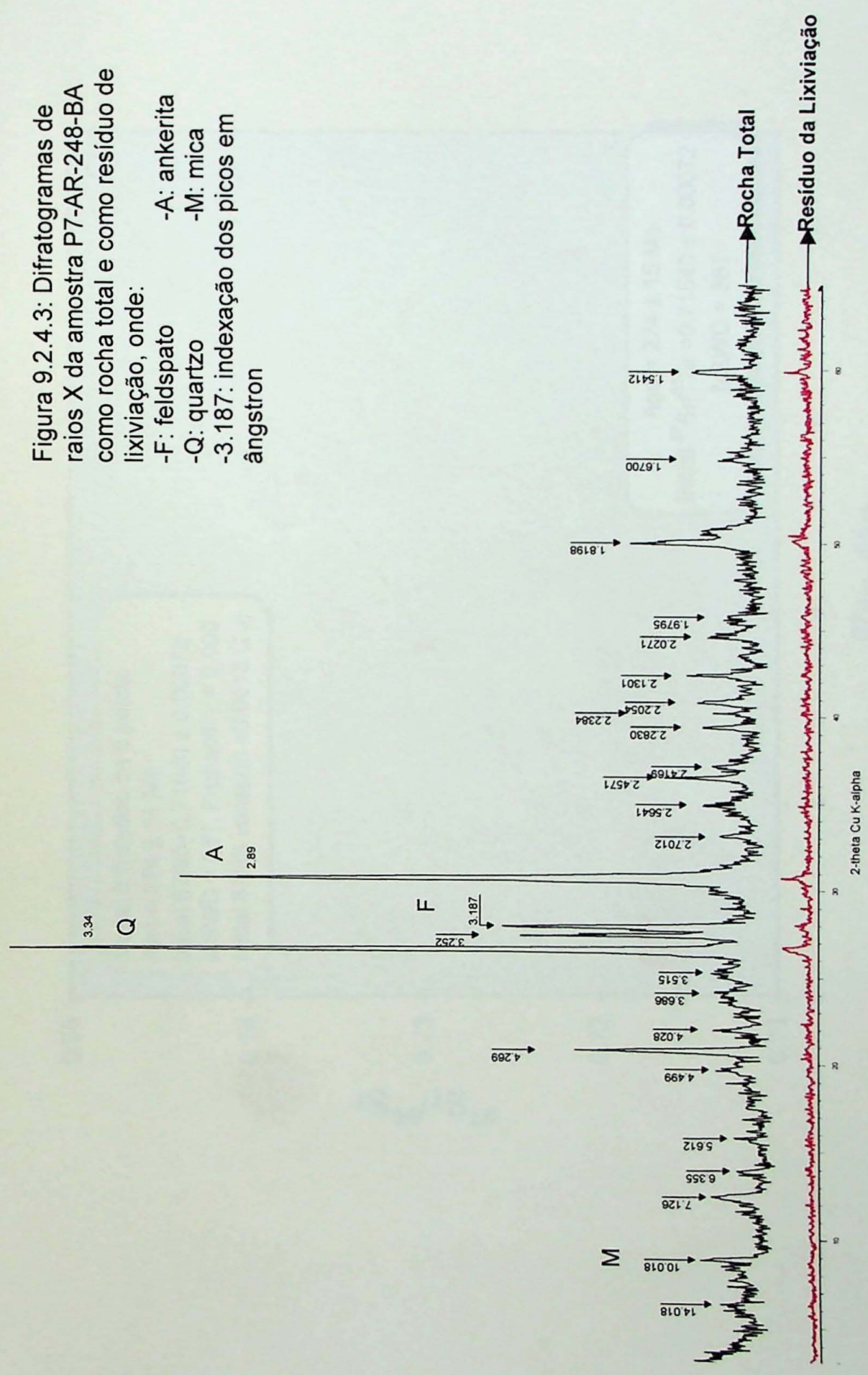


Figura 9.2.4.3: Difratomogramas de raios X da amostra P7-AR-248-BA como rocha total e como resíduo de lixiviação, onde:

- F: feldspato
- Q: quartzo
- A: ankerita
- M: mica
- 3.187: indexação dos picos em ângstrom



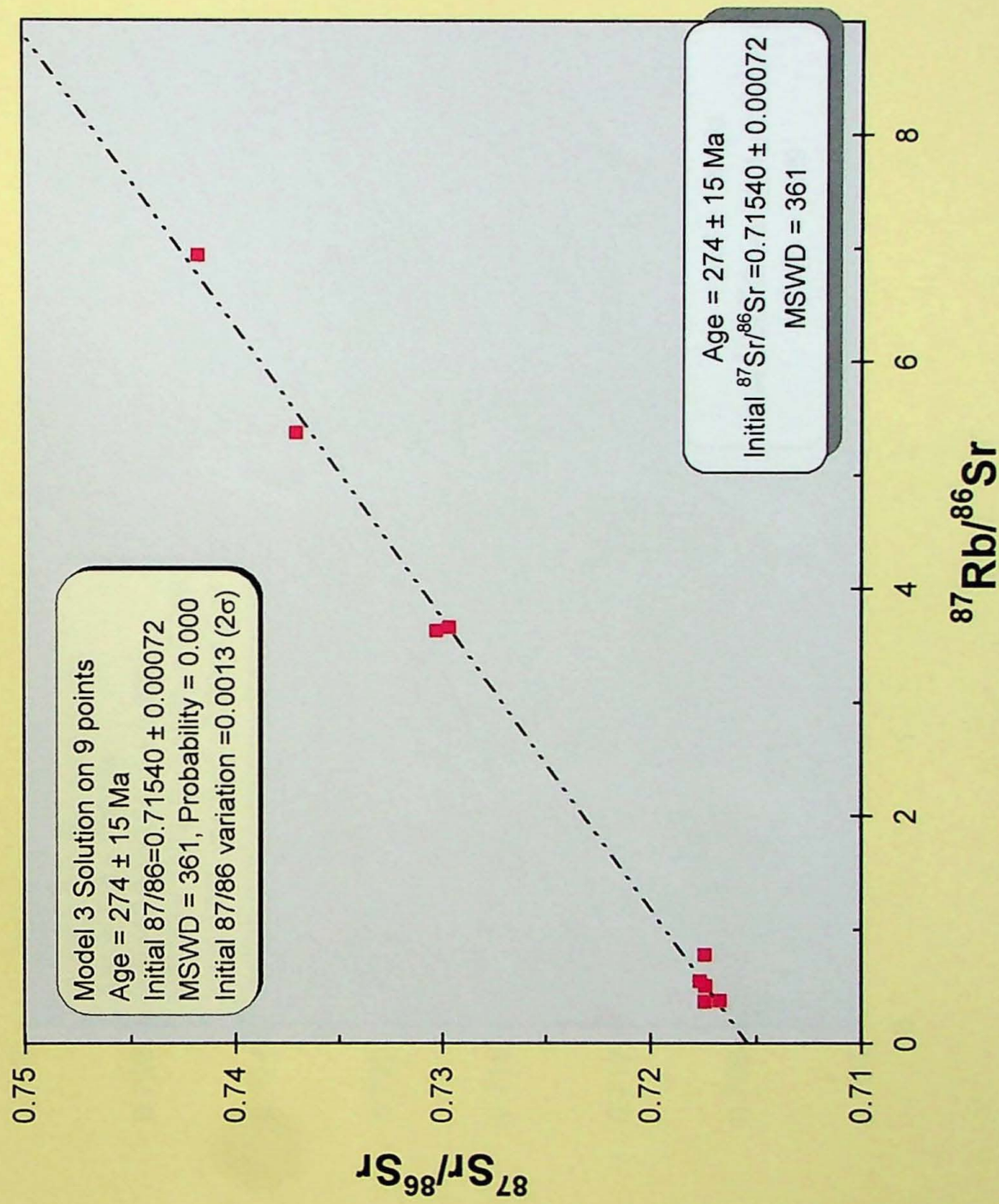


Figura 11.1.1: Isócrona das Amostras da Bacia do Solimões

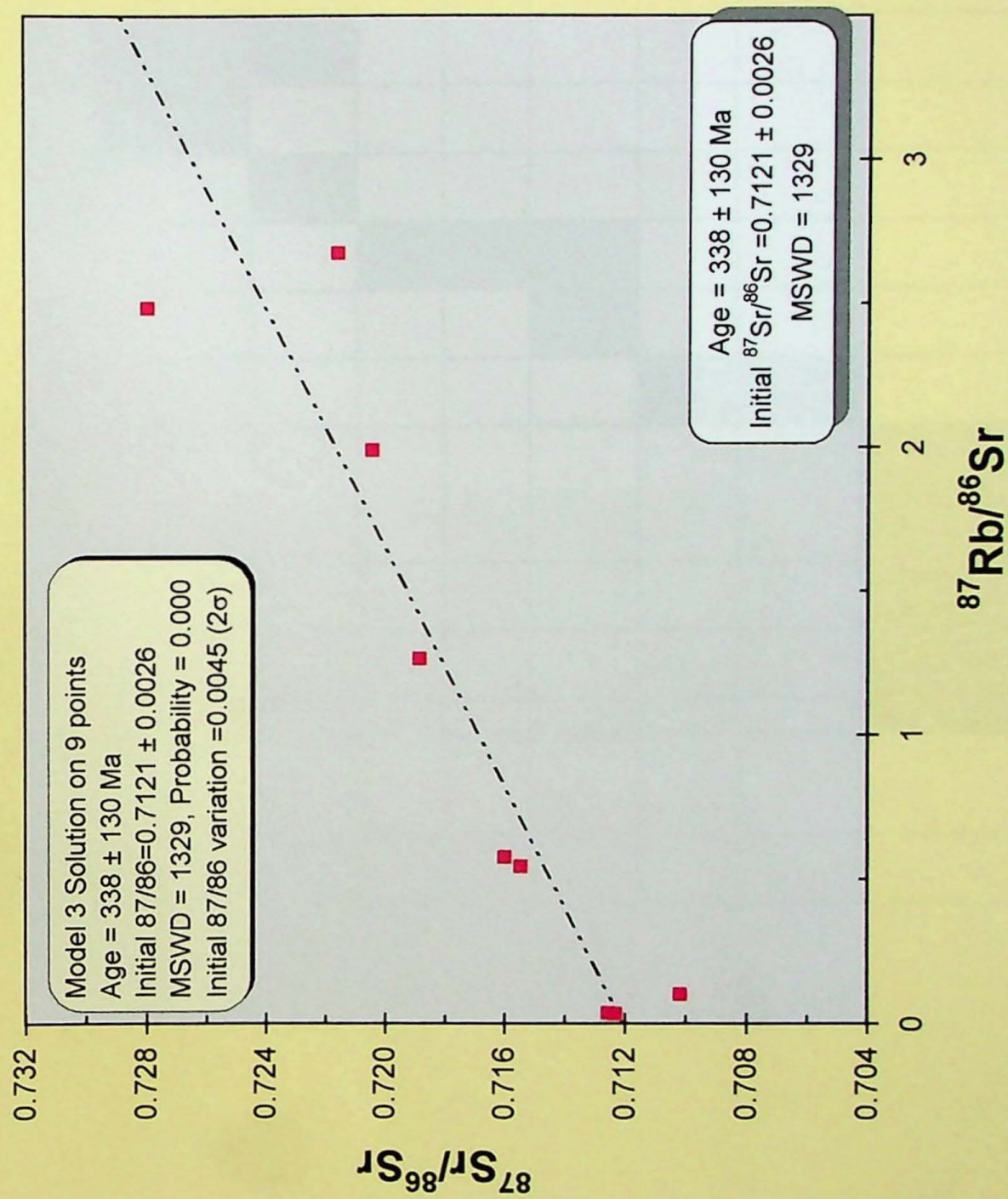


Figura 11.2.1: isócrona das Amostras da Bacia do Recôncavo

Cronograma das Atividades Desenvolvidas:

[illegible]

