

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Avaliação das rochas da Formação Campo Mourão para armazenamento geológico de
CO₂**

GABRIEL FIORINI REIS MACIEL E BASTOS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lucy Gomes Sant'Anna

MONOGRAFIA

(TF-23/19)

SÃO PAULO

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial a minha família, que sempre me apoiou em todas as decisões.

Ao meu avô João.

A minha avó Ozânia.

A minha avó Maria de Lourdes.

Ao meu avô Alaor, que não está aqui para acompanhar este momento, mas certamente está feliz por mim.

Ao meu irmão Leonado.

Aos meus pais, Roger e Lucieny por sempre terem me apoiado e suportado nos momentos em que mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus amigos, que me apoiaram no andamento do trabalho.

Ao geólogo Francisco Negri do IG/SMA, pela participação em etapa fundamental deste trabalho, com a disponibilização e auxílio com os testemunhos de sondagem.

A Erika Milanao, do Laboratório de Caracterização de Rochas de Sistemas Petrolíferos, pelo auxílio e preparação das amostras encaminhadas para os ensaios DRX.

Ao Dr. Marco Guedes, do Laboratório de Ensaios não Destrutivos, que operou o equipamento MSCL, fundamental para a realização deste trabalho.

Muita gratidão e respeito a minha orientadora Profa. Dra. Lucy Gomes Sant'Anna, por todo o cuidado, dedicação, disponibilidade e senso crítico ao longo de dois anos de orientação, por todas as coisas que aprendi e que ajudaram a me formar como pesquisador.

Ao apoio financeiro Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH 33.1) do Instituto de Energia e Ambiente da USP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas na Cláusula de P, D & I da Resolução ANP nº 50/2015 (PRH 33.1 - Referente ao EDITAL Nº1/2018/PRH-ANP; Convênio FINEP/FUSP/USP Ref. 0443/19).

“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria”
(SÃO TOMÁS DE AQUINO)

RESUMO

A tecnologia de captura e armazenamento de CO₂ (*Carbon Capture and Storage, CCS*) é apontada como uma das principais alternativas para mitigar emissões de gases do efeito estufa, de modo a desacelerar o aquecimento global. Neste contexto, buscam-se rochas que possam servir de reservatório para fluidos ricos em CO₂, em especial as rochas arenosas em bacias sedimentares. As características físico-químicas da rocha são essenciais para entender a interação do fluido rico em CO₂ com seus constituintes. Além disso, aspectos estruturais e geométricos do corpo arenoso, bem como a presença de rocha selante, também são importantes para prever e garantir a segurança do reservatório. A Bacia do Paraná possui um extenso empilhamento sedimentar que abriga rochas de diferentes tipos, com idades do do neo-ordoviciano ao neo-cretáceo, sendo subdividida em 6 supersequências. A Supersequência Gondwana I abriga as rochas do Grupo Itararé. O Grupo Itararé é interpretado como depositado em um ambiente glacio-marinho, sendo subdividido em 3 ciclos de afinamento para o topo, representado pelas Formações Taciba, Campo Mourão e Lagoa Azul. A Formação Campo Mourão possui corpos arenosos com espessuras consideráveis, representando canais do tipo *tunnel valley*, oriundos da fase de degelo das geleiras. A Fm. Campo Mourão contém a primeira acumulação de gás natural em produção da bacia, o Campo de Barra Bonita (PR), indicando que as rochas arenosas possuem potencial para ser um reservatório. Portanto, análises de difração de raios X, susceptibilidade magnética, gama natural e fluorescência de raios X de amostras de poço indicaram que existem diferentes tipos de arenitos na Fm. Campo Mourão. Os arenitos possuem diferenças quanto a estrutura e a mineralogia, variando entre arenitos mais homogêneos que podem ser bons reservatórios e arenitos mais heterogêneos com intercalações pelíticas e intraclastos.

ABSTRACT

The Carbon Capture and Storage (CCS) technology is regarded as one of the primary alternatives for mitigating greenhouse gas emissions to decelerate global warming. In this context, rocks that can serve as reservoirs for CO₂-rich fluids are sought, particularly sandy rocks in sedimentary basins. The physicochemical characteristics of the rock are essential for understanding the interaction of CO₂-rich fluid with its constituents. Additionally, structural and geometric aspects of the sandy body, as well as the presence of sealing rock, are also important for predicting and ensuring reservoir safety. The Paraná Basin has an extensive sedimentary stacking that harbors rocks of different types, ranging in age from Neo-Ordovician to Neo-Cretaceous, and is subdivided into 6 supersequences. The Gondwana I Supersequence hosts rocks from the Itararé Group. The Itararé Group is interpreted as deposited in a glacio-marine environment, subdivided into 3 thinning cycles towards the top, represented by the Taciba, Campo Mourão, and Lagoa Azul formations. The Campo Mourão Formation contains sandy bodies with considerable thickness, representing tunnel valley-type channels originating from the glacier melt phase. The Campo Mourão Formation contains the first producing natural gas accumulation in the basin, the Barra Bonita Field (PR), indicating that sandy rocks have the potential to be a reservoir. Therefore, X-ray diffraction analyses, magnetic susceptibility, natural gamma, and X-ray fluorescence of well samples indicated the presence of distinct types of sandstones in the Campo Mourão Formation. The sandstones exhibit variations in both structure and mineralogy, ranging from more homogeneous sandstones, which may serve as good reservoirs, to more heterogeneous sandstones with pelitic intercalations and intraclasts.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METAS E OBJETIVOS	2
2.1 Metas	2
2.2 Objetivos	2
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	4
3.1 A Bacia do Paraná.....	4
3.2 O Grupo Itararé	5
3.3 O Grupo Itararé no Estado de São Paulo	9
4. <i>CARBON CAPTURE AND STORAGE</i>	10
4.1 Aspectos gerais.....	10
4.2 Histórico	12
4.3 Critérios de seleção de reservatórios	13
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
5.1 Levantamento de fontes estacionárias	14
5.2 Dados de emissões.....	14
5.3 Levantamento de poços da ANP	14
5.4 Levantamento de poços do Instituto Geológico	15
5.5 O poço C-IG-93.....	15
5.6 MSCL (<i>Multi-Sensor Core Logger</i>)	16
5.7 DRX – Difração de Raios-X.....	18
6. RESULTADOS	21
6.1 Emissões de CO ₂	21
6.2 Dados obtidos em poços da ANP e C-IG-93.....	22
6.3 Fácies sedimentares	28
6.4 Resultado da análise por Difração de Raios-X	30
6.5 Resultados da análise por MSCL	32
6.5.1 Susceptibilidade Magnética	32
6.5.2 Gama Natural	34
6.5.3 Fluorescência de Raios X	36
7. DISCUSSÃO.....	40
8. CONCLUSÕES.....	43
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1.INTRODUÇÃO

Com o aumento iminente das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, as mudanças climáticas se tornam um problema de escala global. Neste cenário, buscam-se soluções para mitigar estas emissões e atingir as metas firmadas no Acordo de Paris (UNFCCC, 2016). Dentre estas soluções, encontra-se a tecnologia de Captura e Armazenamento de CO₂ (*Carbon Capture and Storage*), que se mostra eficiente, pois consegue estocar grandes volumes de CO₂, evitando que seja emitido para a atmosfera. Por isso é vista como uma das principais tecnologias que irão auxiliar na Transição Energética, com efeito principalmente no mercado de Créditos de Carbono, de tal modo a viabilizar atividades que emitam CO₂, em um cenário de economia de baixo carbono.

A tecnologia se aproveita principalmente de formações arenosas profundas, como reservatórios de óleo e gás depletados.

O Brasil possui bacias sedimentares com potencial para o armazenamento geológico de CO₂, como a Bacia do Paraná, que possui ampla extensão em território brasileiro, abrigando um número considerável de fontes estacionárias de CO₂ que poderiam se beneficiar do armazenamento geológico.

Na Bacia do Paraná, a Fm. Campo Mourão (Grupo Itararé) possui corpos que abrigam as principais ocorrências de gás natural da bacia, indicando que existem rochas reservatório. O Estado do Paraná possui valores de emissões consideráveis para o setor industrial e energia (SEEG, 2023), que poderiam se beneficiar da tecnologia CCS, tendo assim uma opção para lidar com o seu CO₂.

O presente trabalho é relevante porque atua no tema da mitigação das emissões de CO₂, que se mostra importante em um cenário de aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂), na atmosfera terrestre, em especial a partir da década de 1950 até os dias atuais, conforme comprovado cientificamente por diferentes indicadores (Allan et al., 2021). Em meio a este cenário, buscam-se tecnologias para reduzir a liberação de CO₂ na atmosfera.

A tecnologia CCS (*Carbon Capture and Storage*), foi apontada pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Changes*) como uma importante opção para mitigar e estabilizar as emissões de CO₂ na atmosfera. Diversos tipos de rocha têm sido alvo para a implantação da tecnologia, em especial os reservatórios arenosos (Cook e Benson, 2005). Sendo assim, as rochas arenosas da Formação Campo Mourão se apresentam como importantes alvos de estudo para a determinação de um possível reservatório de CO₂. Recentemente, o campo de Barra Bonita (Pitanga-PR) foi reativado, com um projeto de construção de uma planta de

liquefação, liderado pela GNLink de Tradener (Salgado, 2023). Mundialmente, muitos projetos já implantam a tecnologia CCS na sua cadeia de produção e, assim, este trabalho poderá ser interessante para empresas e projetos na área de energia e setor industrial nos Estados de São Paulo e Paraná. Além disso, dados da plataforma SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa), que monitora e compila informações de emissão de CO₂ para diferentes setores, apontaram um crescimento nas emissões relacionadas ao setor de energia nos anos de 2020 e 2021, um indicativo de que existem emissões consideráveis e fontes estacionárias que poderiam se aproveitar da tecnologia.

É ainda importante justificar a escolha da formação geológica no Grupo Itararé. A princípio, a Fm. Taciba poderia ser escolhida para o estudo de estocagem geológica de CO₂, já que estudos de França e Potter (1991) apontaram que o ambiente deposicional de alta energia favoreceu a formação de arenitos com pouca matriz argilosa. Porém os corpos arenosos dessa formação são pouco contínuos e com muitas intercalações pelíticas, dificultando a tecnologia de estocagem de CO₂, de acordo com os critérios apontados pelo comitê técnico da IEA (Bachu et al., 2009).

A escolha da Fm. Campo Mourão para essa pesquisa se deve ao fato da formação apresentar corpos arenosos com espessura e continuidades laterais adequadas para a tecnologia CCS. Além disso, estudos de França e Potter (1991) apontaram que arenitos da unidade, formados em ambientes fluviais e planícies de *outwash*, possuem porcentagens de porosidade adequadas para um reservatório. É sabido que a Fm. Campo Mourão abriga as principais ocorrências de gás natural da Bacia do Paraná em subsuperfície (França et al., 1996), sendo esta uma evidência direta de que existem potenciais reservatórios.

2.METAS E OBJETIVOS

2.1 Metas

O presente trabalho visa levantar e integrar dados pertinentes para estudos de viabilidade e implantação da tecnologia CCS, passando principalmente pela avaliação e caracterização de rochas sedimentares. A integração e interpretação de dados indicará o potencial da área de acordo com a presença de potenciais reservatórios e a quantidade de fontes estacionárias emissoras de CO₂.

2.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o levantamento de dados geológicos da Formação Campo Mourão, (Grupo Itararé, Bacia do Paraná), em especial no Estado de São Paulo, para avaliação das rochas da unidade como reservatório para a estocagem geológica de CO₂. Os critérios a serem levados em conta nessa avaliação foram elencados por Bachu et al. (2009) e serão:

- Espessura das camadas
- Existência de intercalações pelíticas e soleiras de diabásio nas camadas arenosas
- Profundidade de camadas arenosas
- Existência de rochas selantes

Estas informações associadas aos estudos de características físico-químicas das rochas apontarão informações essenciais para o indicativo da implantação da tecnologia CCS.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 A Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma sinéclise de idade paleozoica que possui uma extensa área no território brasileiro, com aproximadamente 1.100.000 km². A sua área compreende os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e parte dos Estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso (Figura 1). A bacia possui um extenso registro sedimentar que abrange do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo, representado por diversos tipos de rochas sedimentares como arenitos, folhelhos e calcários, além de rochas ígneas como basaltos e diabásios. A bacia foi subdividida por Milani et al. (1998) em 6 supersequências: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru. A unidade de estudo deste trabalho se trata da Formação Campo Mourão inserida no Grupo Itararé, que faz parte da Supersequência Gondwana I.

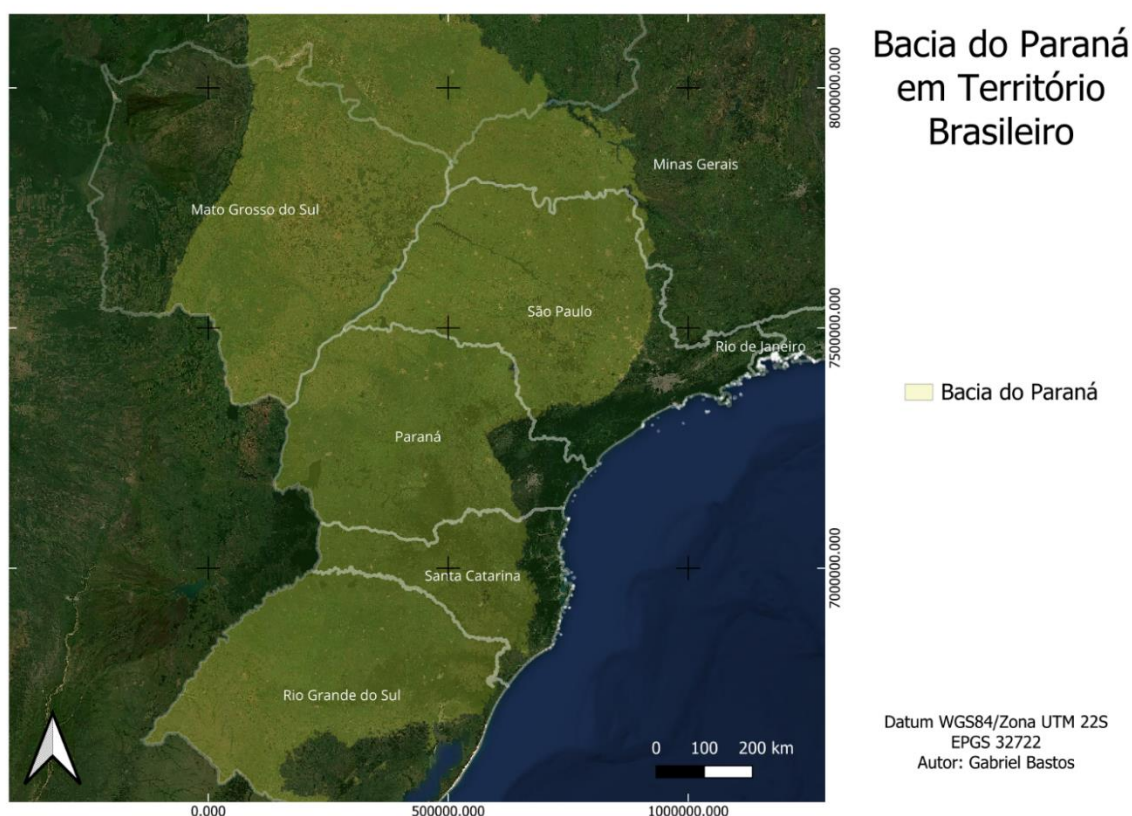


Figura 1 – Bacia do Paraná em território brasileiro. (Autor: Gabriel Bastos)

A Supersequência Gondwana I é marcada pelo contato abrupto entre os folhelhos da Fm. Ponta Grossa com as rochas glaciais do Grupo Itararé, possuindo o maior volume sedimentar da Bacia do Paraná, com uma espessura total máxima próxima a 2500 m (Milani, 1997). Os registros sedimentares refletem diferentes ambientes deposicionais ao longo do tempo, com início em contexto neocarbonífero marcado por influência glacial e progredindo até um ambiente árido interior continental na chegada do Mesozóico. A Supersequência Gondwana I

é subdividida em Grupo Itararé e Formação Aquidauana, Grupo Guatá e Grupo Passa Dois (Milani et al., 2007).

3.2 O Grupo Itararé

Ao longo do tempo, foram propostas diferentes subdivisões litoestratigráficas para o Grupo Itararé. O nome “Série Tubarão” foi proposto por White (1908), com o objetivo de designar todo o pacote sedimentar abaixo da Formação Irati no Estado de Santa Catarina, que mais tarde seria designado para o restante da bacia com o nome de Grupo Tubarão, e posteriormente, Supergrupo Tubarão. O Supergrupo Tubarão foi definido por Schneider et al. (1974), como os Grupos Guatá e Itararé.

O termo Itararé foi introduzido por Oliveira (1927), que utilizou o termo “Série Itararé” para designar os sedimentos com influência glacial na Bacia do Rio Itararé no estado de São Paulo. A Série Itararé foi alterada para Grupo Itararé por Gordon (1947), ainda que autores como Northfleet et al. (1969), Gama Jr et al. (1992) e Fúlfaro et al. (1984), utilizem termos como Formação Itararé (Schneider et al., 1974).

A classificação de Grupo foi mais utilizada pelo fato de a unidade possuir mais de 1300 m de espessura, podendo ser subdividida em unidades litoestratigráficas mapeáveis (França e Potter, 1988). Schneider et al. (1974) demonstraram a subdivisão em um mapeamento de subsuperfície na zona de afloramentos da parte sul da Bacia do Paraná. O mapeamento resultou na subdivisão de 3 unidades litoestratigráficas: Formação Campo do Tenente, predominantemente lamosa, Formação Mafra, predominantemente arenosa e Formação Rio do Sul predominantemente lamosa (Figura 2).

Até a segunda metade dos anos 1980, o Grupo Itararé era formalmente dividido apenas na faixa de afloramentos de Santa Catarina e sul do Paraná. Ainda assim, existia uma lacuna no conhecimento do arcabouço estratigráfico do Grupo Itararé em subsuperfície. França e Potter (1988) estudaram os perfis geofísicos dos poços perfurados pela Petrobrás e pelo Paulipetro e propuseram sua interpretação.

A estratigrafia do Grupo Itararé proposta por França e Potter (1988) é representada por três ciclos deposicionais, definidos através de análise de raios gama em testemunhos de sondagem, sendo dividida da base para o topo em Formação Lagoa Azul, Formação Campo Mourão e Formação Taciba (Figura 2).

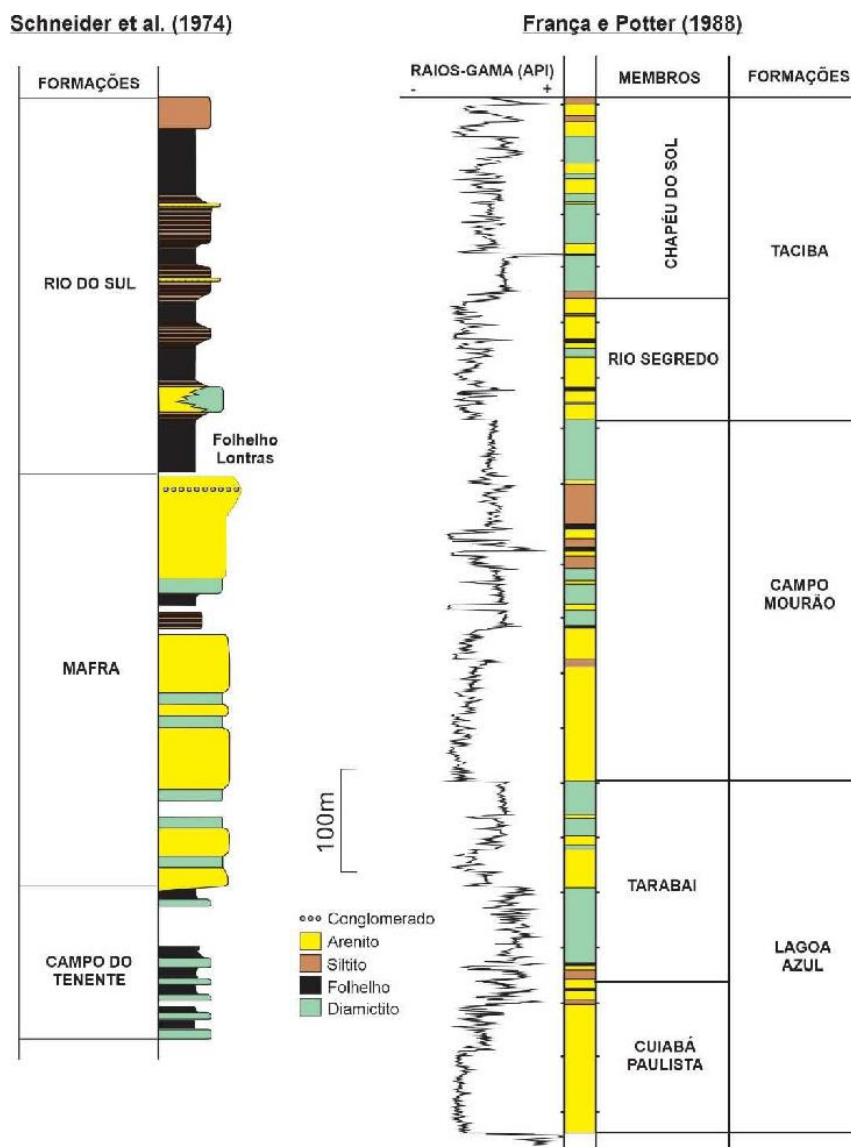


Figura 2 – Comparação das subdivisões litoestratigráficas do Grupo Itararé. A coluna da esquerda apresenta a subdivisão proposta por Schneider et al. (1974). A coluna da direita apresenta subdivisão proposta por França e Potter (1988), representada pelo poço Rio Ivaí (2-RI-1-PR). Fonte: Adaptado de Vesely et al. (2021)

A Formação Lagoa Azul apresenta dois conjuntos com granodecrescência ascendente bem definidos. A formação apresenta em sua base rochas areno-conglomeráticas, enquanto a parte superior é constituída por ritmitos e folhelhos ricos em clastos caídos de gelo flutuante, bem como diamictitos areno-lamosos resultantes de escorregamentos subaquáticos (Vesely et al., 2021).

A Formação Campo Mourão representa um intervalo heterogêneo e predominantemente arenoso, ocorrendo em todo o Estado do Paraná. As espessuras variam de 200 a 500 metros, sendo mais espessa na porção norte, de acordo com França e Potter (1988) (Figura 3).

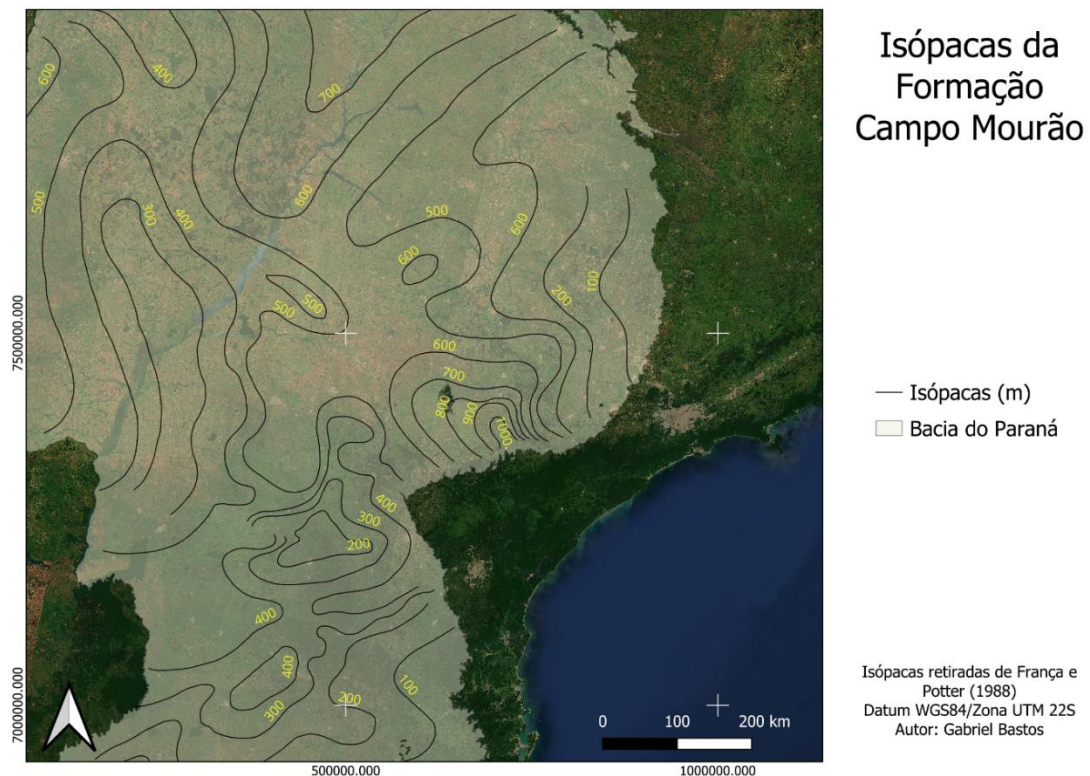


Figura 3 – Isópacas da Formação Campo Mourão de acordo com França e Potter (1988). Autor: (Gabriel Bastos)

A rocha predominante nesta unidade é o arenito, mas também compreende diamictitos, folhelhos, ritmitos e conglomerados, marcando três ciclos de afinamento granulométrico ascendente (Vesely e Assine, 2004). Dentre os corpos arenosos existem três unidades informais mapeáveis: os arenitos Lapa, Barreiro e Pedra Alta (Figura 4).

O arenito Lapa ocorre em discordância com a Fm. Campo do Tenente e forma um corpo linear com cerca de 90 m de espessura, 1500 m de largura e 59 km de comprimento, interpretado inicialmente como o preenchimento de um vale inciso fluvial (França et al., 1996) e fiorde (D'Avila, 1999). Vesely et al. (2021) interpretaram o paleovale como uma estrutura do tipo *tunnel-valley*, uma escavação formada embaixo de geleiras ocasionada pela ação erosiva de fluxos pressurizados de água originada do degelo sobre substrato permeável e pobremente inconsolidado. Desta forma, o preenchimento do vale compreende conglomerados e arenitos flúvio-glaciais e fluviais, depositados principalmente durante o recuo do gelo.

O arenito Barreiro possui parte inferior cascalhosa e um padrão de afinamento granulométrico para o topo, com base erosiva marcada por um contato irregular com incorporação de clastos argilosos do substrato. O horizonte estratigráfico do arenito Barreiro é semelhante ao do arenito Lapa, porém o arenito Barreiro forma platôs ao contrário do Lapa que forma corpos lineares (Vesely et al., 2021).

O arenito Pedra Alta definido por D'Avila (1999), Carvalho (2016), Carvalho e Vesely (2017), ocorre estratigraficamente acima do arenito Lapa e possui contato basal transicional sobre

diamictito, lamito e ritmito. Carvalho e Vesely (2017) interpretaram que o arenito Pedra Alta marca a progradação de sistema flúvio-deltaico, onde os sedimentos clásticos grossos com estratificação cruzada seriam de origem fluvial e as fácies mais finas e deformadas representariam depósitos de desembocadura e frente deltaica.

O topo da Fm. Campo Mourão é representado pelo Membro Lontras, que é uma unidade argilosa com folhelhos fossilíferos. Segundo Vesely et al. (2021), o Membro Lontras marca o ápice da transgressão marinha da Fm. Campo Mourão. Para Rocha Campos e Rosler (1978), o folhelho Lontras é o resultado de um evento de inundação glacieustática na extensão setentrional dos leitos marinhos, chegando até Estado de São Paulo.

Em grandes partes da Bacia do Paraná, desde a parte norte do Estado de Santa Catarina até as regiões setentrionais do Estado do Paraná, a inundação eustática pós-glacial é reconhecida pela ocorrência de folhelhos marinhos fossilíferos, como o folhelho Passinho, no final da sequência do Itararé, abaixo dos sedimentos pós-glaciais da Fm. Rio Bonito (Rocha Campos e Rosler, 1978). A posição estratigráfica do folhelho Passinho em relação ao folhelho Lontras na região central de Santa Catarina, sugere que estes foram formados pelo mesmo evento transgressivo (Dos Santos et al., 1996).

No geral, a Fm. Campo Mourão é predominantemente arenosa e apresenta registros de ambientes deposicionais que variam de fluviais a marinhos profundos, incluindo associações deltaicas e costeiras, com ocorrências de depósitos de fluxo gravitacionais subaquáticos. Ainda que haja ocorrência de clastos em folhelhos e em diamictitos ao longo da sucessão, a influência glacial é pequena e tende a diminuir da base para o topo, com a maioria de seus diamictitos sendo oriundos de escorregamentos e fluxo de detritos (Vesely et al., 2021). Apesar de ter uma influência glacial pequena, ainda pode ser observada uma ciclicidade que pode estar relacionada aos avanços e recuos de uma margem glacial mais distante do sítio deposicional, que eventualmente fornecia detritos por meio de *icebergs* e água de degelo (Carvalho e Vesely, 2017).

No topo do Grupo Itararé, está a Formação Taciba, que se distribui por todo o Estado do Paraná, com espessura média de 250 metros. A Fm. Taciba possui arenitos em sua base, representando o Membro Rio Segredo, seguidos por diamictitos, representando o Membro Chapéu do Sol e rochas lamítico-arenosas representando o Membro Rio do Sul. Segundo Vesely et al., (2021), o Membro Rio Segredo é mapeável apenas no norte do Paraná enquanto o Membro Chapéu do Sol ocorre em todo o Estado, ao passo que o Membro Rio do Sul foi mapeado apenas no sul. O contato entre os Membros Chapéu do Sol e Rio do Sul é interdigitado, refletindo uma contemporaneidade entre os membros, como interpretado por França e Potter (1988).

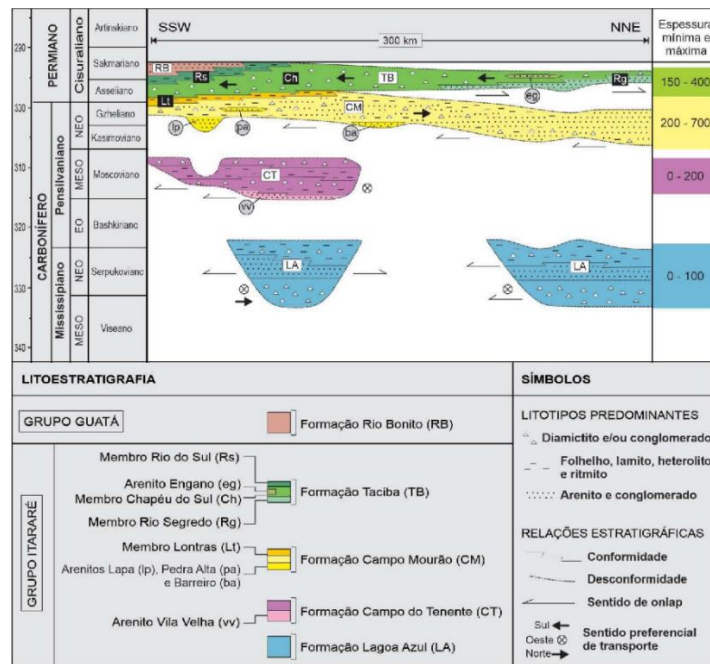


Figura 4 – Diagrama lito-cronoestratigráfico do Grupo Itararé na faixa de afloramentos do estado do Paraná.

Fonte: Vesely et al., 2021

3.3 O Grupo Itararé no Estado de São Paulo

No Estado de São Paulo, foram propostas subdivisões diferentes para o Grupo Itararé, por apresentar fácies distais, próximas a atual borda da bacia. Stevaux et al. (1987) dividiram o Grupo Itararé em duas unidades, Fm. Itu e Fm. Capivari. A Formação Itu corresponde a porção basal, compreendendo rochas arenosas e tilitos, com outras litologias subordinadas, estando em contato com o embasamento Pré-Cambriano. A Fm. Capivari recobre a Fm. Itu através de uma superfície de afogamento de acordo com Petri e Pires (1992), interpretada como ambiente marinho. A unidade compreende rochas arenosas e pelíticas, com conglomerados, brechas e diamictitos, sob a forma de fluxo de detritos.

No âmbito do Programa Geologia do Brasil conduzido pelo Serviço Geológico do Brasil, foi elaborada a carta geológica Itararé na escala 1:100.000 que apresenta o Grupo Itararé subdividido em formações Campo Mourão e Lagoa Azul na região ao redor da cidade de Itararé (Rodrigues e Caltabeloti, 2012).

Essa atualização do mapa geológico na porção sul do Estado de São Paulo concorda com a proposta de Castro (2004) que fez equivalência das Formações Lagoa Azul e Itu e atribuiu o pacote pelítico (varvito e folhelhos marinhos) da região da cidade de Capivari (SP) ao Membro Lontras, situado no topo da Formação Campo Mourão. De acordo com Castro (2004), é o Folhelho Lontras, um importante marco cronoestratigráfico na bacia, que permite correlacionar as Formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba com as unidades da margem leste da bacia.

4. CARBON CAPTURE AND STORAGE

4.1 Aspectos gerais

O *Carbon Capture and Storage*, também denominado “CCS”, consiste na tecnologia de captura e armazenamento de CO₂ em formações rochosas em profundidade. A tecnologia CCS foi apontada pelo IPCC como uma importante opção para mitigar e estabilizar as emissões de CO₂ na atmosfera. A tecnologia consiste em capturar o gás carbônico diretamente de fontes estacionárias, onde o CO₂ ficará retido em um fluido com características específicas de acordo com a rocha em que será injetado.

A tecnologia se aproveita de diferentes mecanismos diretamente relacionados com a rocha reservatório em que o fluido será injetado. Os reservatórios mais comuns são aqueles que apresentam porosidade e permeabilidade em rochas arenosas, em corpos com continuidade lateral e profundidades mínimas de 1000 m (Bachu et al., 2009). Deste modo o fluido com CO₂ ficará preso nos poros da rocha. A rocha reservatório irá definir a composição do fluido em que o CO₂ será dissolvido para garantir as reações físico-químicas necessárias para que a molécula fique retida. Neste caso, torna-se necessário que as rochas estejam em altas profundidades para garantir tanto a segurança contra vazamentos e contaminações de aquíferos, quanto o aumento da pressão, para que o CO₂ fique num estado de fluido supercrítico. O estado de fluido supercrítico faz com que a molécula de CO₂ fique com um volume molecular muito pequeno, o que permite o armazenamento de grandes quantidades da molécula no espaço (Figura 5).

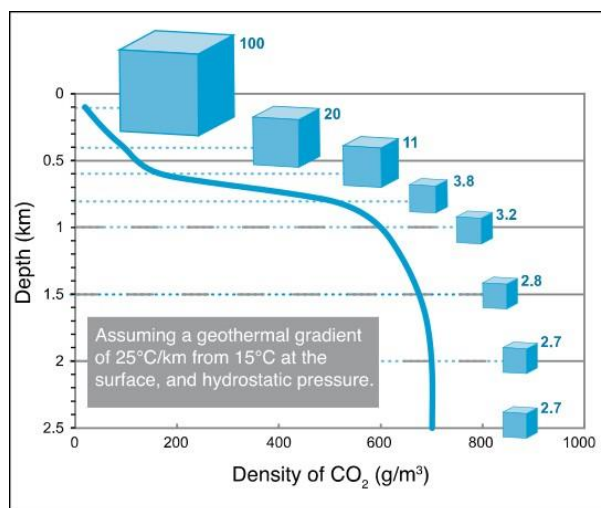


Figura 5 – Comportamento da densidade da molécula de CO₂ com o aumento do gradiente de pressão. Fonte: Anderson et al., 2005

Com base neste mecanismo, tornam-se alvo os reservatórios depletados de óleo e gás em bacias sedimentares, onde já se conhece o sistema petrolífero constituído de uma rocha reservatório e uma rocha selante, essencial para que o fluido não escape do sistema.

O estudo das rochas selantes também é importante para definir o reservatório e garantir o trapeamento estrutural do sistema. Muitas vezes as rochas selantes são representadas por rochas sedimentares finas, como folhelhos.

Os folhelhos são constituídos de argilominerais que possuem estruturas organizadas em planos similares a folhas. O espaço nessas estruturas varia para diferentes argilominerais, podendo ou não adsorver a molécula de CO_2 em sua superfície.

Além das rochas sedimentares, existem também mecanismos de armazenamento em rochas vulcânicas, como o basalto. Neste caso, o método consiste em realizar o fraturamento hidráulico da rocha ou aproveitar as vesículas existentes nos derrames para a injeção de um fluido com CO_2 dissolvido, induzindo a reação com a mineralogia da rocha para a cristalização de minerais carbonáticos, chamado trapeamento mineral.

A segurança do reservatório é controlada tanto por critérios macroscópicos, na escala geológica, como falhas, continuidade de rochas selantes, quanto por critérios microscópicos, como os mecanismos de trapeamento do CO_2 (Figura 6). Mecanismos de trapeamento estruturais são mais comuns nos projetos de CCS, principalmente no caso de reservatórios depletados, onde já se conhece as estruturas com certa confiabilidade. Ainda assim, está sujeito a eventos imprevisíveis que possam ocasionar vazamentos ou migração deste fluido para outras formações. Neste caso, o trapeamento mineral se mostra mais seguro, visto que o CO_2 ficará preso na forma de mineralizações de carbonato, garantindo maior segurança.

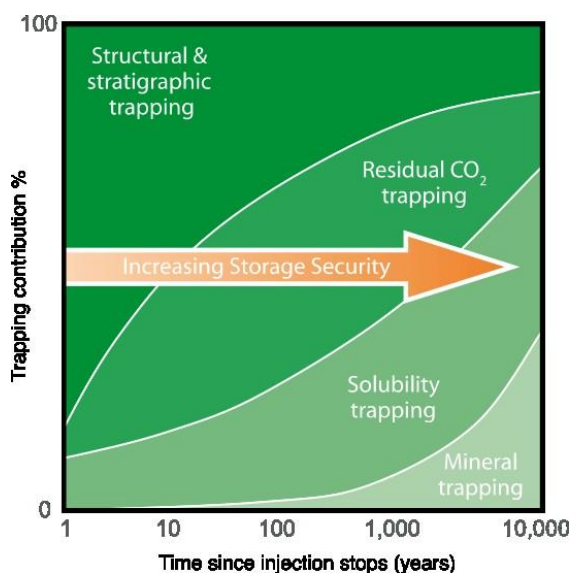


Figura 6 – Avaliação da segurança do reservatório pelos mecanismos de trapeamento do CO_2 .

Fonte: Anderson et al., 2005

4.2 Histórico

Os primeiros projetos de CCS se deram ao final da década de 90 na Noruega. As primeiras injeções aconteceram no campo de gás *offshore* de Sleipner, no Mar do Norte. Neste projeto, o CO₂ utilizado no processo de extração do gás natural, era reinjetado em um aquífero salino em arenitos da Formação Utsira, com profundidades entre 800 e 1000 metros (Figura 7). Neste contexto, o CO₂ ficaria armazenado nos poros da rocha arenosa que por abrigar um aquífero salino, poderia ocorrer a precipitação de carbonatos. No processo, aproximadamente 1 Mt de CO₂ eram injetadas anualmente. A injeção começou no ano de 1996 e no ano de 2005 aproximadamente 7 Mt de CO₂ haviam sido injetadas no reservatório. Para este reservatório foi calculado um potencial de armazenamento de 20 Mt de CO₂ (Anderson et al., 2005).

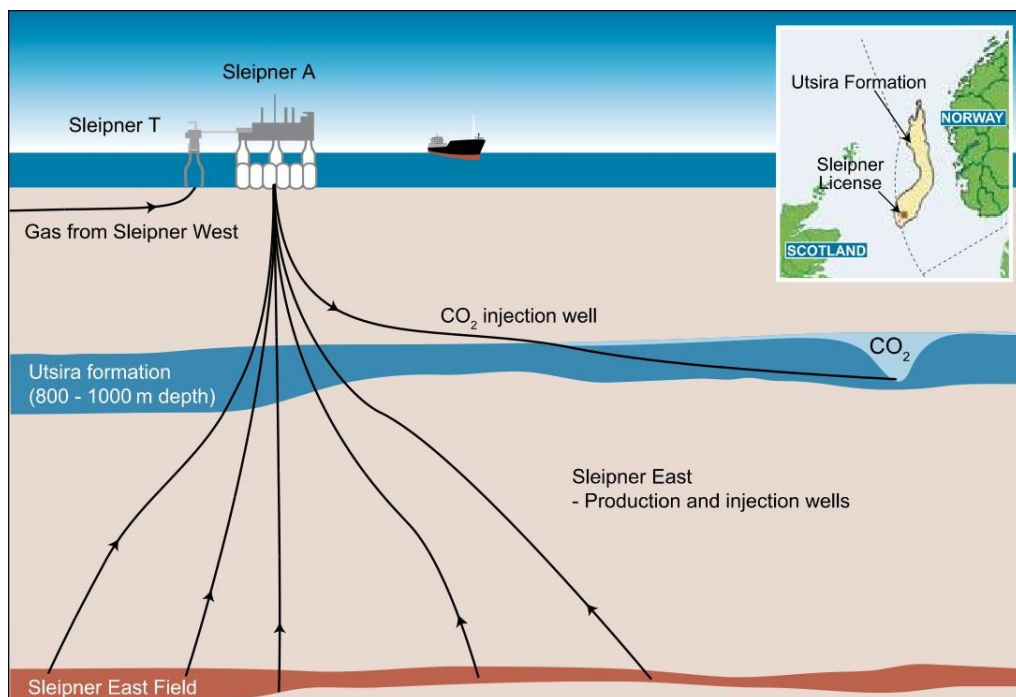


Figura 7 – Diagrama esquemático do projeto Sleipner. Fonte: Anderson et al., 2005

Um exemplo de importante projeto de CCS na área *onshore* é o projeto In Salah, localizado na região central saariana da Argélia, é o primeiro projeto de armazenamento de CO₂ em larga escala do mundo em uma reserva de gás natural (Riddiford et al., 2003). O Campo de Krechba produzia gás natural contendo 10 % de CO₂ em sua composição, que após a extração e processamento, o CO₂ era separado e reinjetado em reservatórios arenosos em profundidades de 1800m, com uma taxa de injeção de 1.2 Mt de CO₂ anualmente. As injeções começaram em abril de 2004 e foi estimado que ao final do projeto, seriam injetadas 17 Mt de CO₂ (Anderson et al., 2005)

O Campo de Krechba consiste em uma estrutura anticlinal com uma camada de 20 m de espessura de arenito, seguida de um argilito de 950 m de espessura, servindo como rocha

selante (Figura 8). Acima do sistema petrolífero, está uma camada de arenitos e argilitos onde se encontra o aquífero regional, com espessura de 900 m. Sendo assim, o CO₂ é reinjetado abaixo da zona de contato entre gás e água, a uma distância de 900 m da base do aquífero regional, garantindo certa segurança contra contaminações. Eventualmente, é esperado que o CO₂ migre para a estrutura anticlinal quando a reserva de gás for depletada.

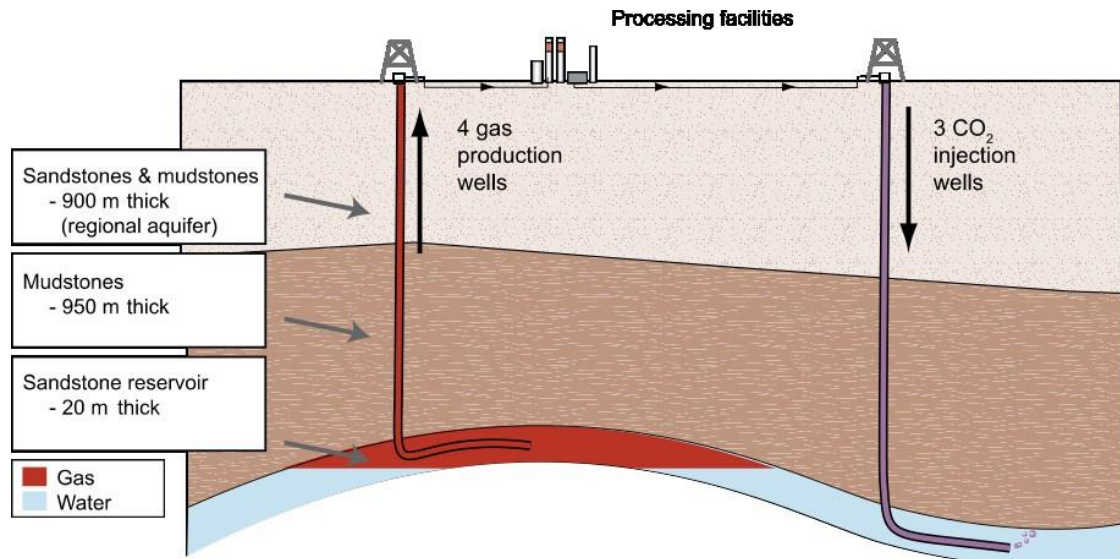


Figura 8 – Diagrama esquemático do projeto In Salah. Fonte: Anderson et al., 2005

4.3 Critérios de seleção de reservatórios

Bachu et al. (2009), definiram importantes critérios para a seleção de reservatórios para CCS, visando a estabilidade e segurança do sistema. Os critérios desejáveis são:

- Porosidade superior a 10%
- Permeabilidade superiores a 20 mD
- Profundidades entre 1000 e 2500 metros
- Reservatório com espessura superior a 20 metros.
- Continuidade lateral
- Presença de rocha selante
- Baixa sismicidade
- Baixo fraturamento

Além de fatores geológicos, a viabilidade do projeto também leva em conta a presença de fontes estacionárias e a distância que estas estão do poço de injeção. Ketzer et al. (2015) indicou um raio de 200 km entre fonte estacionária e poço de injeção para que o projeto

possua alguma viabilidade econômica para a região sul e sudeste do Brasil, levando em conta a presença de gasodutos e a qualidade das rodovias.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Levantamento de fontes estacionárias

O levantamento de fontes estacionárias foi feito utilizando o *software* Google Earth e base de dados disponíveis em plataformas como a NOVACANA DATA, que reúne informações ligadas ao setor sucroenergético. Foram coletadas informações como:

- Denominação
- Coordenadas
- Setor/Tipo de atividade

5.2 Dados de emissões

Os dados de emissões de CO₂ foram adquiridos por meio da plataforma SEEG Brasil. A plataforma SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa) é uma iniciativa do Observatório do Clima, criada em 2013 e compreende a produção de estimativas anuais das emissões dos gases do efeito estufa no Brasil, documentos analíticos sobre a evolução das emissões e um portal na internet para a disponibilização dos dados no sistema. Estes dados e estimativas são gerados de acordo com as diretrizes do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), utilizando como base metodológica os Inventário Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa, elaborado pelo MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) e em dados obtidos junto a relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisas, entidades setoriais e organizações não governamentais.

5.3 Levantamento de poços da ANP

O levantamento dos dados de poços que sondaram a Fm. Campo Mourão foi feito utilizando dados e perfis dos poços disponibilizados pela plataforma REATE da CPRM. O Programa de Revitalização da Atividade de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Áreas Terrestres (REATE), foi anunciado pelo MME em 27 de janeiro de 2017 com objetivos estratégicos de: revitalizar as atividades E&P em áreas terrestres no território nacional, estimular o desenvolvimento local e regional, e aumentar a competitividade da indústria petrolífera *onshore* (CPRM Reate, 2023). No total, foram levantados 53 poços nos Estados do Paraná e de São Paulo. As informações levantadas compreendem:

- Prefixo e Designação
- Coordenadas
- Espessura total; espessura de soleiras; espessura da Fm. Campo Mourão
- Designação da unidade
- Descrição litológica
- Profundidade do topo da Fm. Campo Mourão

No cálculo das espessuras foi levado em consideração a presença de soleiras na estratigrafia, que não pertencem a Fm. Campo Mourão. Sendo assim o seguinte cálculo foi feito:

$$\text{espessura da Fm. Campo Mourão} = \text{espessura total} - \text{espessura de soleiras}$$

Alguns poços no Estado de São Paulo não possuem subdivisão lito estratigráfica do Grupo Itararé, por se tratar de fácies mais distais da bacia. Neste caso, são denominados como Grupo Itararé indiviso. Estes também foram acrescentados por apresentar pacotes arenosos com espessuras consideráveis que são interessantes para o estudo, porém não foram incluídos no cálculo de espessura da Fm. Campo Mourão.

A localização dos poços foi plotada em mapa utilizando *softwares* de manipulação de dados geoespaciais como QGIS e ArcGIS.

5.4 Levantamento de poços do Instituto Geológico

O levantamento dos poços do Instituto Geológico de São Paulo foi feito utilizando dados referente aos estudos de Petri et al. (1996), que estudaram poços sondados no Estado de São Paulo com interesse na hidrogeologia do aquífero Tubarão. No total, foram levantados 31 poços, compreendendo informações como:

- Designação
- Coordenadas
- Profundidade
- Espessura de rochas arenosas
- Capacidade específica

O cálculo de espessura para estes poços não considera a continuidade das camadas e sim a somatória das espessuras de rochas arenosas.

A localização dos poços foi plotada em mapa utilizando *softwares* de manipulação de dados geoespaciais como QGIS e ArcGIS.

5.5 O poço C-IG-93

O poço C-IG-93 foi selecionado para as análises das rochas arenosas. O poço foi sondado em junho de 1993 com alvo no Grupo Tubarão (Petri, 1964) e Formação Itararé, situado no município de Capivari-SP, com profundidade total de 300 metros.

Foram selecionadas 12 amostras de rochas arenosas, preferencialmente homogêneas, ao longo da estratigrafia do poço para a realização das análises e descrições faciológicas. As amostras e suas respectivas profundidades estão apresentadas na Tabela 1.

Amostras Coletadas C-IG-93	
Código	Profundidade no poço (m)
AM-01	93
AM-02	111
AM-03	124,2
AM-04	132
AM-05	147,6
AM-06	157,1
AM-07	169,7
AM-08	187
AM-09	238,9
AM-10	255
AM-11	289,6
AM-12	298

Tabela 1 – Amostras coletadas do poço C-IG-93.

As análises laboratoriais foram executadas no Laboratório de Caracterização de Rochas de Sistemas Petrolíferos, pertencente à Divisão de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia do Instituto de Energia e Ambiente de Universidade de São Paulo (IEE-USP)

5.6 MSCL (*Multi-Sensor Core Logger*)

Foi utilizado o equipamento *Geotek MSCL 7.9*. O equipamento se encontra instalado no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da Divisão de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia do Instituto de Energia e Ambiente da USP. O mecanismo consiste na passagem de uma meia-calha com testemunho de rocha por uma esteira, que é escaneada por diversos sensores que captam:

- Imagens de alta definição
- Gama Atenuado
- Espectro de cores
- Elementos maiores e menores por meio de Fluorescência de Raios X
- Susceptibilidade magnética
- Resistividade elétrica
- Espectro de Gama Natural

Os testemunhos foram serrados longitudinalmente, de modo a expor a face da rocha para os sensores. Para as amostras tratadas neste trabalho (Figura 9), foram feitas leituras em um intervalo de 5 mm, desconsiderando as leituras feitas a uma distância de 2 cm das extremidades da amostra, a fim de evitar influências do separador de amostras. Foram escaneadas 3 calhas, totalizando 12 amostras, avaliando dados de e concentração de

Elementos químicos através de fluorescência de raios X (ppm), Susceptibilidade Magnética ($\text{SI} \times 10^{-5}$) e Gama Natural (cps).

O método de fluorescência de raios X consiste na irradiação de uma amostra com raios X emitidos por uma fonte. Os elementos químicos presentes na amostra irão emitir uma radiação a partir da fluorescência de raios X. Esta radiação possui discretizada que corresponde a um espectro de valores característico para cada elemento químico. Pela medição da energia emitida pela amostra, é possível determinar e quantificar cada elemento químico presente.

Os raios X são ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda definidos de 0,01 a 10 nanômetros. O comprimento de onda dos raios X é inversamente proporcional a sua energia, expresso pela relação $E \cdot \lambda = h \cdot c$ onde E é a energia em keV, λ é o comprimento de onda e $h \cdot c$ é o produto da constante de Planck com a velocidade da luz.

Para alcançar os átomos dentro da amostra, os raios X precisam atravessar camadas externas do núcleo do átomo, que absorvem parte da radiação. A magnitude da absorção depende da energia da radiação, da distância entre átomos e da densidade da amostra. A absorção aumenta de acordo com o aumento do percurso da radiação, o aumento da densidade e número atômico dos elementos químicos e com a diminuição da energia de radiação. A absorção pode ser tão alta que elementos que estejam mais profundos na amostra podem não ser atingidos pela radiação penetrante, ou a radiação característica irradiada pode não deixar a amostra. Neste caso apenas elementos químicos próximos à superfície serão medidos (Brouwer, 2006).

A susceptibilidade magnética mede a capacidade que um material tem de se magnetizar na presença de um campo magnético. Na presença de um campo magnético, os dipolos atômicos se dividem em diferentes orientações de acordo com o nível energético. A resposta do estímulo é expressa pelo vetor Magnetização do material. A magnetização pode ser quantificada e subdividida de acordo com a intensidade da resposta ao estímulo. Os materiais se subdividem quanto a magnetização em:

- Diamagnéticos: Se opõem fracamente à presença do estímulo.
- Paramagnéticos: Respondem levemente a favor do estímulo.
- Ferromagnéticos: Respondem fortemente ao campo magnético.
- Antiferromagnéticos: Não correspondem à influência do campo magnético.

Nos materiais diamagnéticos e paramagnéticos a magnetização será proporcional a intensidade do campo magnético aplicado. Quando se remove o campo, a magnetização do material também é removida, de modo distinto dos materiais ferromagnéticos, que tendem a formar ímãs após serem magnetizados.

A análise por raios Gama mede a quantidade de raios Gama emitidos naturalmente por isótopos radiogênicos de potássio, urânio e tório (Brannon Jr e Osoba, 1956). Estes elementos (em especial o potássio) são comuns em argilominerais. Em sequências sedimentares clásticas terrígenas, a curva de raio gama pode indicar a presença de folhelhos ou zonas mais argilosas. Em arenitos, é esperado que se tenha baixas contagens de raio gama. Segundo Walker (1992), para essa análise existem 3 possíveis problemas de interpretação, sendo eles:

1. A resposta da contagem pode ser afetada por argilas radioativas diagenéticas nos poros da rocha arenosa.
2. Folhelhos ricos em illita (alto conteúdo de potássio) são mais radioativos do que folhelhos ricos em montmorilonita ou clorita.
3. Arenitos arcoseanos (alto conteúdo de feldspato de potássio) são mais radioativos do que arenitos com ausência de feldspato.

Neste caso, deve se calibrar a análise para camadas que já possuam características conhecidas, e utilizar esta camada como datum para correlações.



Figura 9 – Calha com amostras preparadas para MSCL.

5.7 DRX – Difração de Raios-X

As amostras selecionadas para a análise por difração de raios X foram secas em estufa. Após o processo de secagem, foram selecionadas porções representativas de cada amostra, levando em conta os critérios estruturais de cada amostra. Para amostras homogêneas, foi coletada uma alíquota única. Para amostras com laminações e variações granulométricas

foram coletadas duas alíquotas. Os critérios e códigos das amostras estão apresentados na Tabela 2. Foram selecionadas 17 alíquotas para a análise de difração de raios X (Figura 10). As amostras foram destinadas a etapa de moagem com auxílio de almofariz de ágata, para obtenção de pó homogêneo.

Amostra	DRX	Critério
AM-01	1279	Aliquota única
AM-02	1280	Aliquota única
AM-03	1281A	Porção arenosa
AM-03	1281B	Porção pelítica
AM-04	1282	Aliquota única
AM-06	1283	Aliquota única
AM-07	1284	Aliquota única
AM-05	1285A	Porção arenosa
AM-05	1285B	Porção pelítica
AM-08	1286A	Porção arenosa fina
AM-08	1286B	Porção arenosa média
AM-09	1287A	Porção arenosa
AM-09	1287B	Porção pelítica
AM-10	1288A	Porção arenosa
AM-10	1288B	Porção pelítica
AM-11	1289	Aliquota única
AM-12	1290	Aliquota única

Tabela 2 – Critérios para seleção de amostras



Figura 10 – Amostras separadas para moagem.

Após a preparação das amostras, estas foram destinadas à análise por difração de raios X (DRX), visando caracterizar a composição mineralógica das amostras.

Esta técnica é utilizada na identificação de estruturas cristalinas, com aplicação bastante difundida na caracterização mineralógica de solos, sedimentos e rochas, através da exposição do material em pó a um feixe de monocromático de Raios X, que difrata a partir de sua interação com planos atômicos formadores da estrutura cristalina. O ângulo de difração irá

variar de acordo com o espaçamento (d) entre planos atômicos adjacentes, sendo determinado pela lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin \theta$). O comprimento de onda do feixe incidente (λ) é de 1,54 Å (Angstroms), e θ corresponde ao ângulo entre o feixe difratado e o plano cristalográfico (Dinnebier e Billinge, 2008 e Waseda et al., 2011). Trata-se de um processo em que sólidos produzem padrões de reflexão de Raios X. Assim, como cada mineral possui uma estrutura cristalina própria, caracterizada por planos atômicos com distintos espaçamentos, haverá um conjunto de reflexões difratadas em ângulos específicos. Desta forma, é possível a aplicação da Lei de Bragg e identificar valores de espaçamento entre planos, levando a caracterização do mineral. A comparação permite identificar e quantificar as fases minerais da amostra analisada (Lima, 2021).

Foi utilizado o difratômetro *Bruker D8 Advance*, equipado com o detetor LYNXEYE XE e sistema theta-theta, adquirido pelo IEE-USP no âmbito da Rede GASBRAS. O equipamento se encontra instalado no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da Divisão de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia do Instituto de Energia e Ambiente da USP. Os difratogramas foram obtidos com radiação CuK alpha, 40kV, 23mA, *air-scatter* automático, passo de 0,02 grau 2θ , tempo de aquisição de 3,1 segundo e utilizando fendas primárias de 0,5 mm e secundárias de 1,0 mm.

A identificação dos minerais e o tratamento gráfico dos difratogramas foram efetuados com o software *DiffraEva* versão 4.2.2 (Bruker ASX GmbH) e com auxílio de fichas de identificação do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). As distâncias interplanares (d) utilizadas para a identificação dos minerais estão apresentadas na Tabela 3.

Mineral	Distância d em Å			
Quartzo	3.34	4.25	1.81	1.54
Feldspato Alcalino	3.24	6.35	-	-
Plagioclasio	3.18	3.15	6.49	-
Calcita	3.03	-	-	-
Esmectita	15	-	-	-
Clorita	14.2	3.54	-	-
Mica	10	4.98	-	-
Hidrotalcita	7.56	-	-	-

Tabela 3 – Distâncias interplanares utilizadas para a identificação dos minerais.

6. RESULTADOS

6.1 Emissões de CO₂

O levantamento de fontes emissoras de CO₂ indicou uma grande quantidade de fontes no setor produtor de etanol, principalmente no Estado de São Paulo, com um número considerável de usinas. No Estado do Paraná, as usinas de etanol são maioria, contando com a participação de usinas termelétricas que possuem participação significativa nas emissões. Na área externa à Bacia do Paraná, há o setor industrial cimenteiro que atua na faixa do embasamento pré-cambriano, utilizando suas rochas carbonáticas na cadeia de produção do cimento (Figura 11). Vale ressaltar a presença de uma fonte emissora de grande porte, o complexo termelétrico de Jorge Lacerda no estado de Santa Catarina, responsável por maior parte das emissões da região.

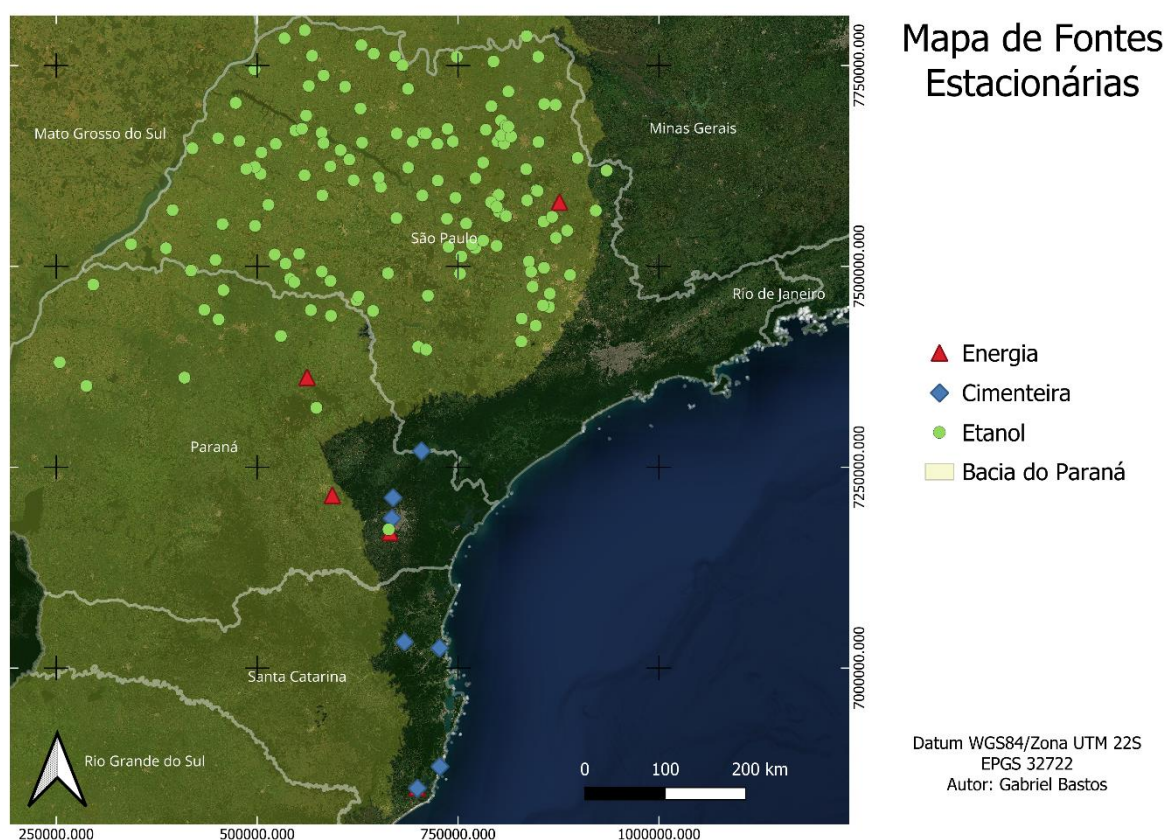


Figura 11 – Mapa de Fontes Estacionárias. (Autor: Gabriel Bastos)

Dados de emissões da plataforma SEEG Brasil, no geral, apontam uma tendência de crescimento nas emissões de CO₂ nos setores industriais e energéticos para os Estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Ainda que em escalas diferentes de emissões, o setor energético possui maior participação. É possível observar que o pico destas emissões se deu no ano de 2014. Em um recorte dos últimos 10 anos, os dados possuem comportamentos distintos para diferentes Estados (Figura 12).

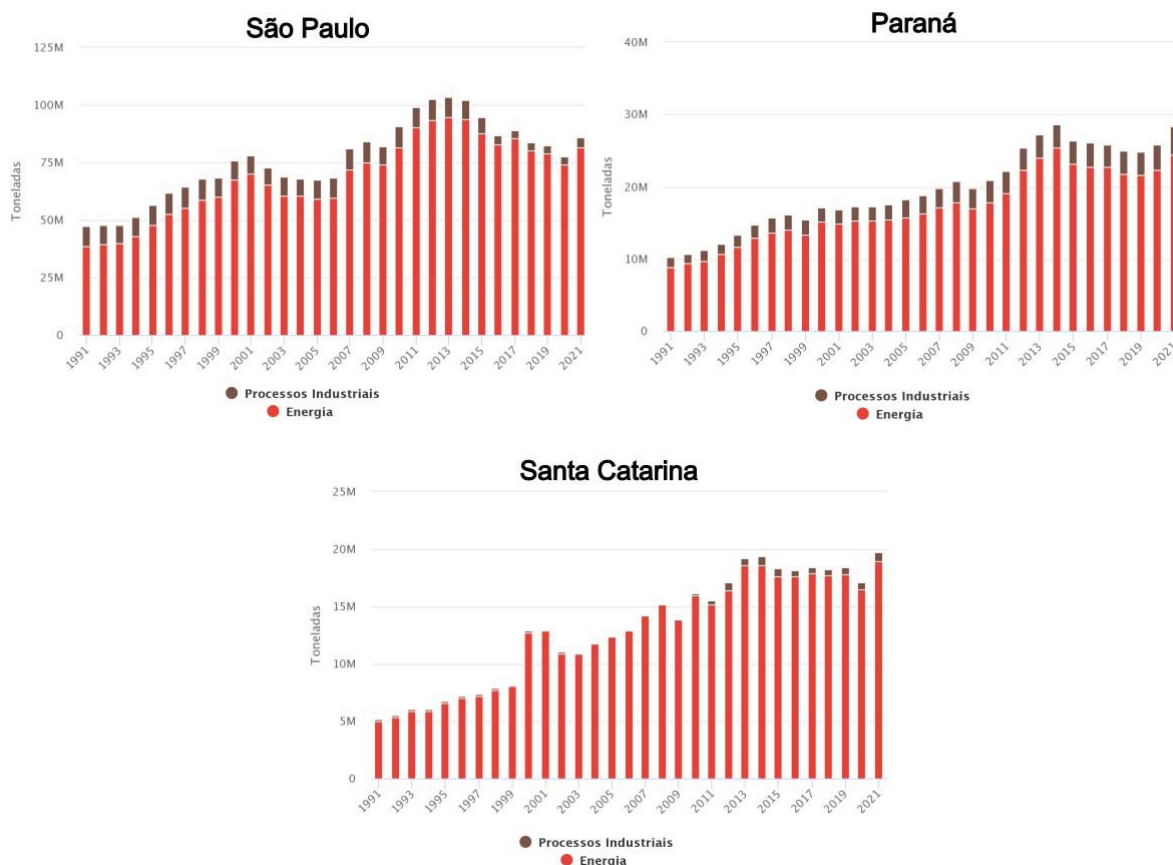


Figura 12 – Emissões de CO₂ em Mt pelos Estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina. (Fonte: SEEG Brasil)

Após 2014, o Estado de São Paulo possui uma tendência de diminuição nas emissões do setor energético até o ano de 2020, quando há uma subida de patamar no gráfico. No Paraná, as emissões se estabilizam, mas tendem a crescer após 2020, tanto no setor energético, quanto no setor industrial. Em Santa Catarina, as emissões se estabilizam no setor energético, enquanto o setor industrial começa a crescer.

Corroborando com o mapa, o Estado de São Paulo detém maior quantidade de emissões, diretamente ligadas as fontes estacionárias, principalmente no setor de energia. Assim como a quantidade de fontes, os valores de emissões diminuem para sul, demonstrando essa relação direta.

6.2 Dados obtidos em poços da ANP e C-IG-93

A Bacia do Paraná possui uma quantidade considerável de poços que sondam o Grupo Itararé, em especial a Formação Campo Mourão (Figura 13). Os poços da ANP foram perfurados para a exploração de hidrocarbonetos, contemplando a maioria das unidades da bacia.

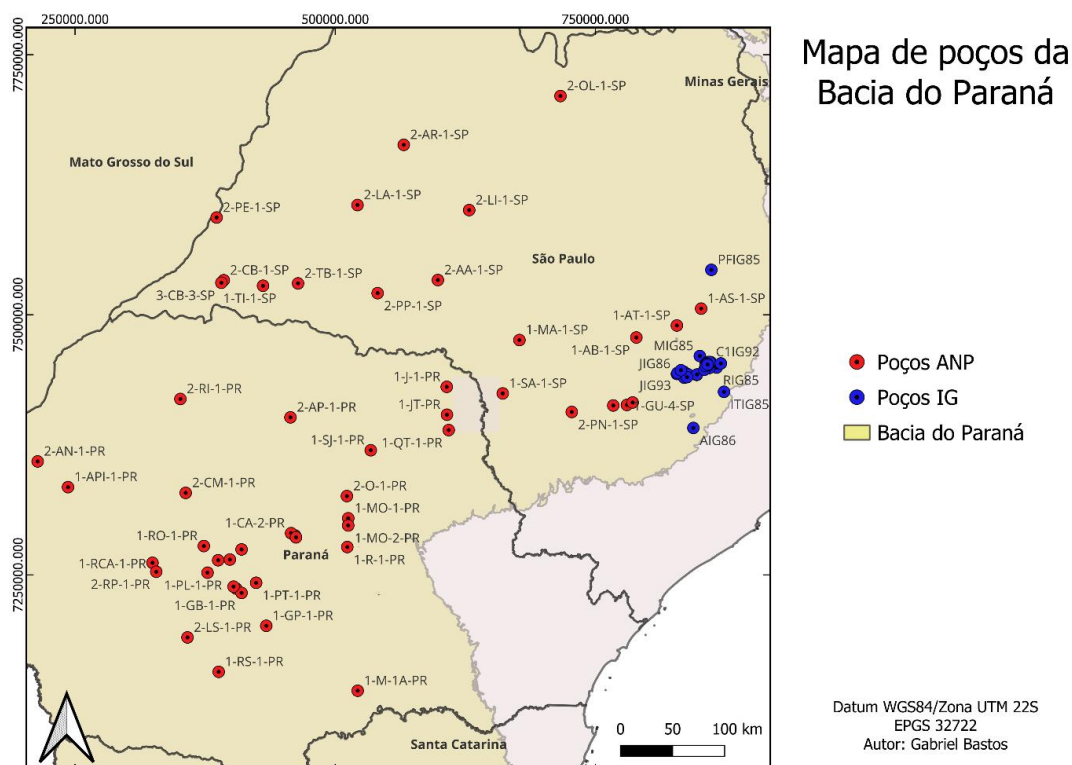


Figura 13 – Mapa de Poços da Bacia do Paraná que sondam o Grupo Itararé. (Autor: Gabriel Bastos)

Pelo levantamento dos poços da ANP, foi observado que a Formação Campo Mourão possui espessuras variadas ao longo da bacia, sendo mais espessa no Estado de São Paulo. No Paraná as espessuras variam de 137 a 716 metros, com uma média de 445 metros. No Estado de São Paulo, onde estão as fácies mais distais do Grupo Itararé, não há uma divisão clara das formações em alguns poços, sendo todo o conjunto denominado como Grupo Itararé Indiviso no mapa geológico do Estado de São Paulo (Perrotta et al., 2006). No desenvolvimento dessa pesquisa, avaliou-se que no Estado de São Paulo as espessuras da Fm. Campo Mourão variam de 452 a 995 metros, com média de 630 metros (Figura 14).

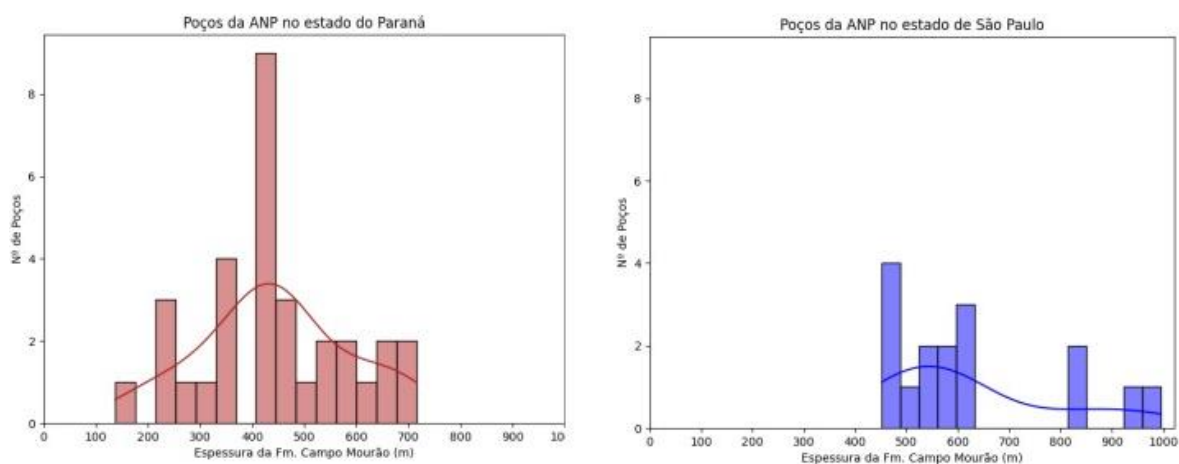


Figura 14 – Distribuição de espessura da Fm. Campo Mourão nos poços da ANP nos Estados do Paraná e São Paulo.

Pode-se discutir os *outliers* nos valores de espessura. No Paraná, o valor mínimo de 137 metros é referente ao poço 1-ELPS-9-PR. Este poço não sonda a Formação Campo Mourão por inteiro, justificando sua menor espessura.

Em São Paulo, os poços com espessura máxima da Formação Campo Mourão são 1-CP-1-SP com 995 m e 2-PN-1-SP com 943 m. Esses valores fogem da distribuição mostrada nos histogramas. No caso do poço 1-CP-1-SP, na divisão estratigráfica, o Mb. Campo do Tenente foi anexado como parte a Fm. Campo Mourão, o que poderia influenciar na interpretação e consequentemente na espessura da unidade. Para poços do Estado do Paraná, existe esta divisão entre Fm. Campo Mourão e Fm. Campo do Tenente. A mesma interferência acontece no poço 2-LI-1-SP, com 817 m, onde o Mb. Rio Segredo é anexado a Fm. Campo Mourão.

Nos poços do Paraná, as profundidades da Formação Campo Mourão variam de 105 a 4233 metros, com média de 2187 metros. Em São Paulo as profundidades variam de 170 a 3692 metros, com média de 1812 metros (Figura 15). A diferença de profundidade média pode ser explicada principalmente pelo fato de que no Estado de São Paulo, a formação está mais próxima da atual borda da bacia, enquanto no Paraná está na porção central da atual bacia.

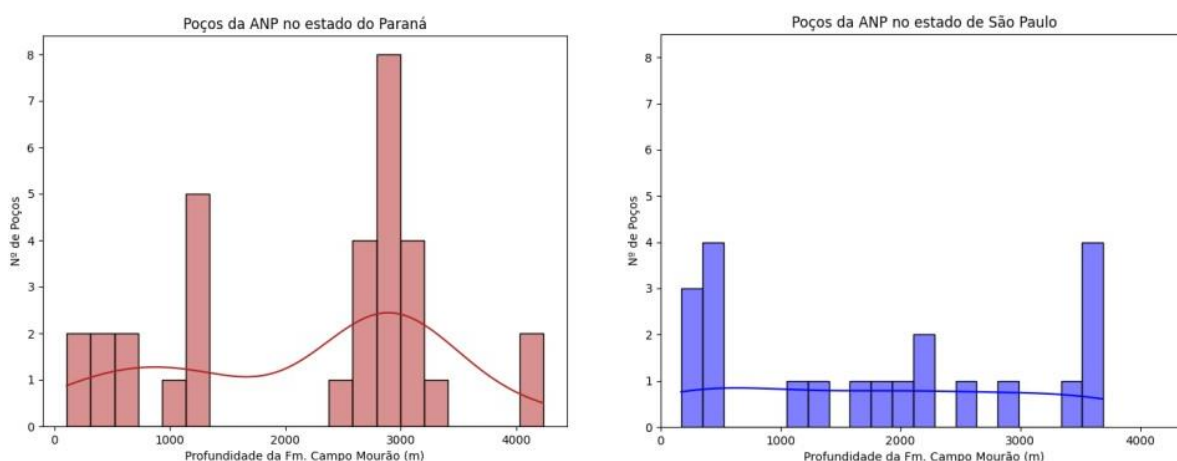


Figura 15 – Distribuição de profundidades da Fm. Campo Mourão nos poços da ANP nos Estados do Paraná e São Paulo.

Nos poços do Paraná, predominam arenitos com afinamento para o topo na Formação Campo Mourão. Pacotes de diamictito são comuns e marcam o topo da formação. Soleiras de diabásio são frequentes e possuem espessura variada. No Estado de São Paulo, o comportamento do Grupo Itararé é mais heterogêneo, ainda predominando arenitos com pelitos subordinados.

Os poços IG foram perfurados pelo Instituto Geológico do Estado de São Paulo, a fim de realizar análises hidrogeológicas do Grupo Itararé nas bordas da atual bacia (Figura 16).

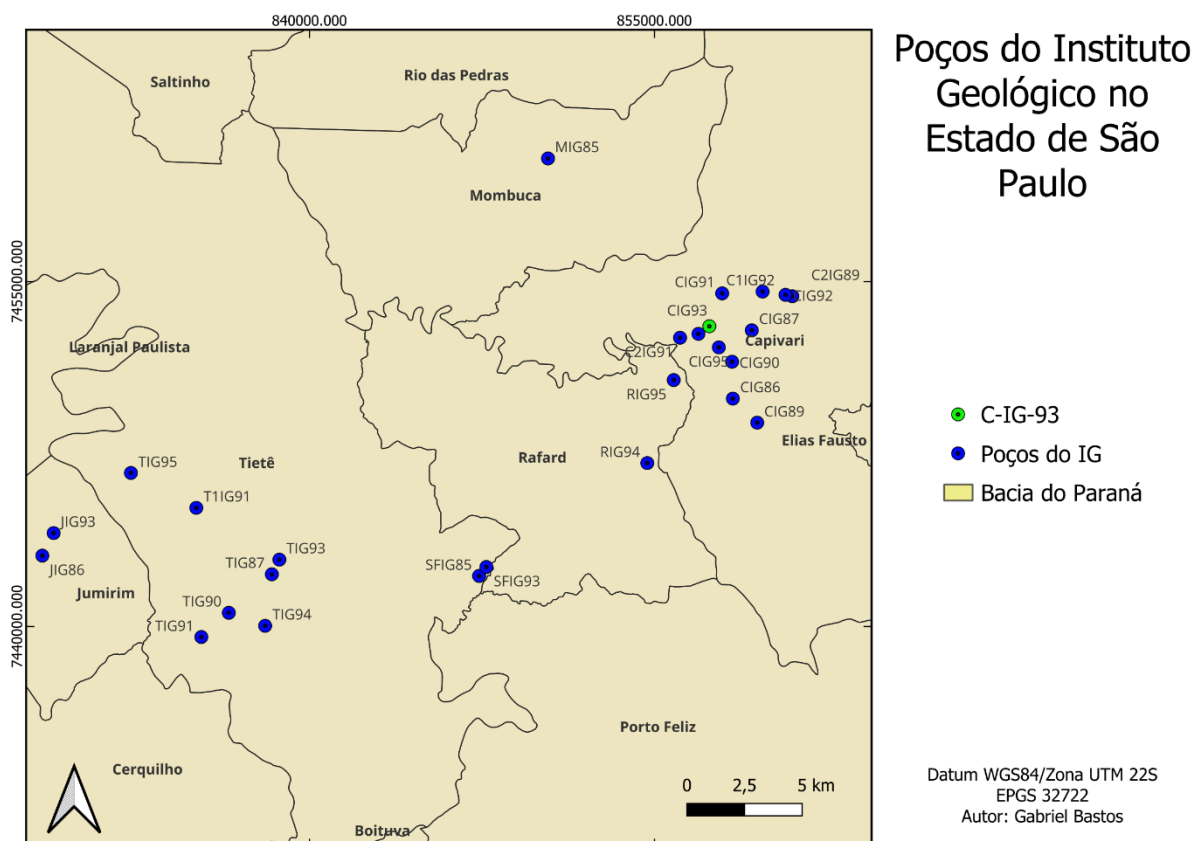


Figura 16 – Poços do Instituto Geológico no Estado de São Paulo

O poço C-IG-93 foi sondado em junho de 1993. Situado no município de Capivari-SP, o poço possui profundidade total de 300 metros (Figura 17). A sua estratigrafia foi estudada pelo Prof. Setembrino Petri, sendo constituída de 243 metros de psamitos, 22 metros de psefitos e 18 metros de pelitos (Petri et al., 1996). O poço foi sondado em diâmetros variados, tornando possível a recuperação integral de variadas litologias e estruturas sedimentares. Os arenitos são desde muito finos até grossos, com diferentes padrões de variação granulométrica, transicionais e abruptas, verticais, inclinadas e horizontais.

As doze amostras coletadas estão sinalizadas no perfil estratigráfico (Figura 17) e na Figura 18, com os respectivos códigos e pontos de amostragem para análise por DRX e MSCL.

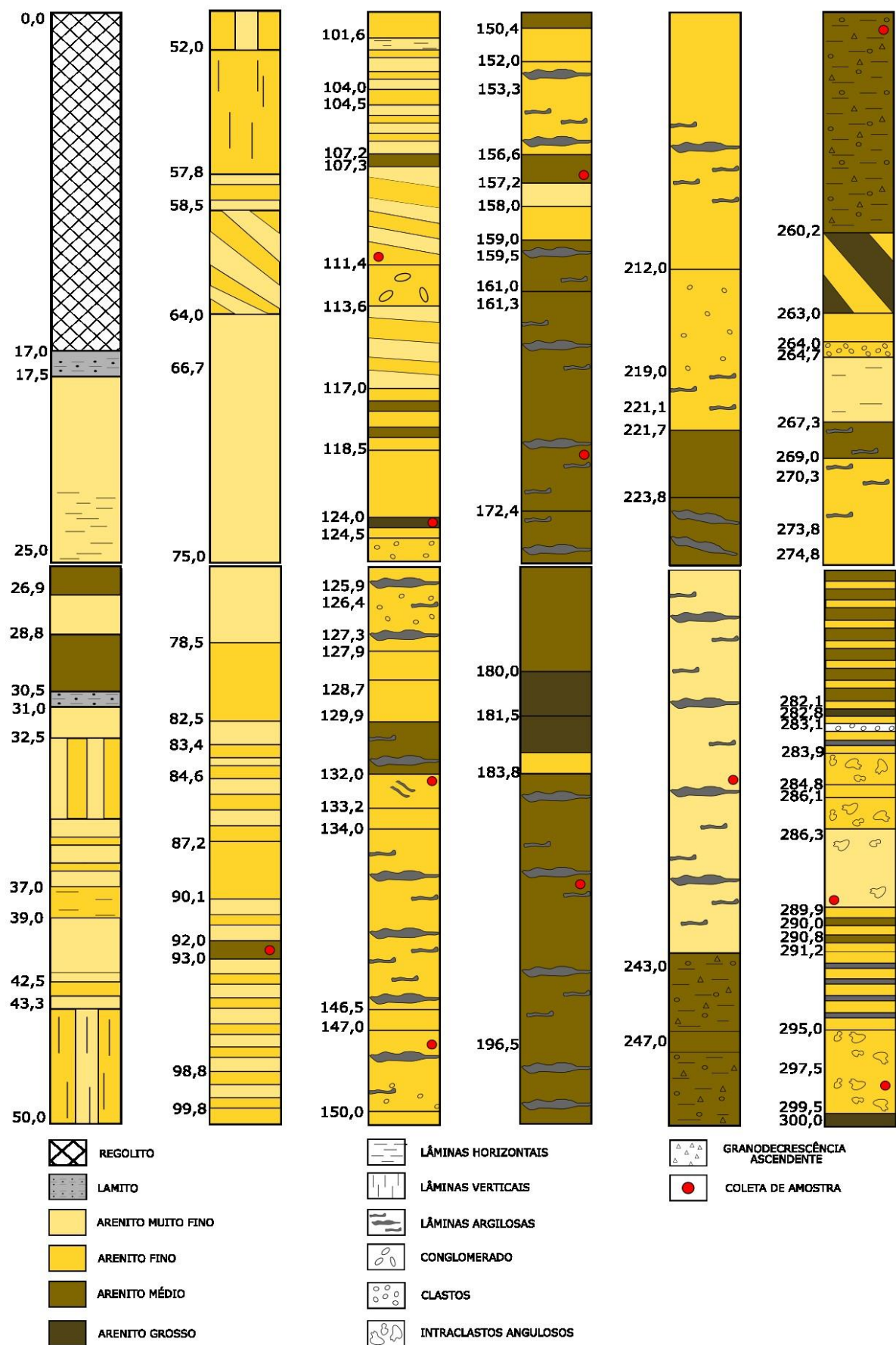


Figura 17 – Perfil estratigráfico do poço C-IG-93 (modificado de Petri et al., 1996), com indicação das amostras coletadas para análise por MSCL.

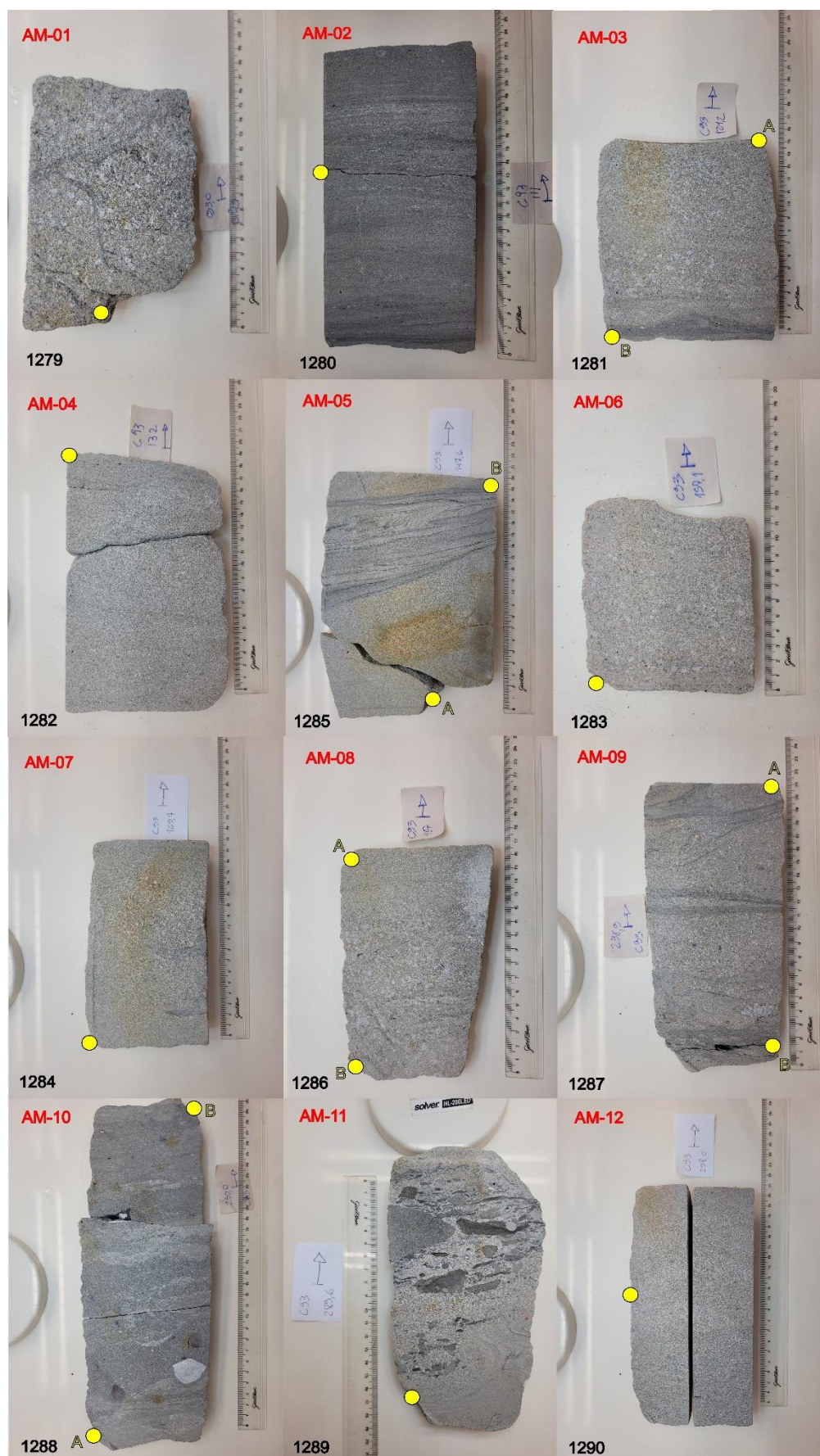


Figura 18 – Amostras do poço C-IG-93 selecionadas para análise por MSCL. Os pontos amarelos indicam os locais de coleta para DRX

6.3 Fácies sedimentares

As amostras coletadas foram descritas macroscopicamente quanto às suas litologias, estruturas sedimentares e cores predominantes, conforme abaixo:

AM-01: Arenito médio a grosso, heterogêneo, com laminações argilosas sem orientação preferencial, cinza claro (Figura 19, A)

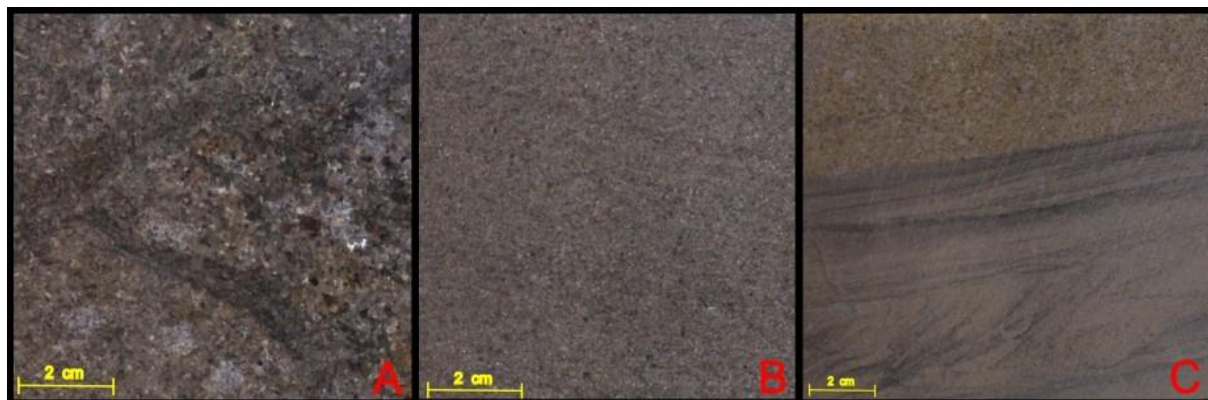


Figura 19 – Imagem captada pelo MSCL das amostras AM-01 (A), AM-04 (B) e AM-05 (C).

AM-02: Arenito muito fino, com intercalações horizontais de arenito fino, variando entre porções cinza claros e cinza escuros.

AM-03: Arenito médio com intercalações de arenito fino, variando de cores entre cinza claro e cinza escuro, com porções oxidadas em amarelo.

AM-04: Arenito fino a médio, com laminações sub-horizontais, cinza claro (Figura 19, B).

AM-05: Arenito fino a médio, com laminações argilosas onduladas e porções pontuais piritizadas, cinza claro (Figura 19, C).

AM-06: Arenito médio, com laminações sub-horizontais, cinza claro.

AM-07: Arenito médio, com laminações argilosas sem orientação preferencial, cinza claro com porções oxidadas.

AM-08: Arenito médio, com laminações argilosas sem orientação preferencial e contato regular com arenito fino a médio homogêneo no topo, cinza claro (Figura 20, A).

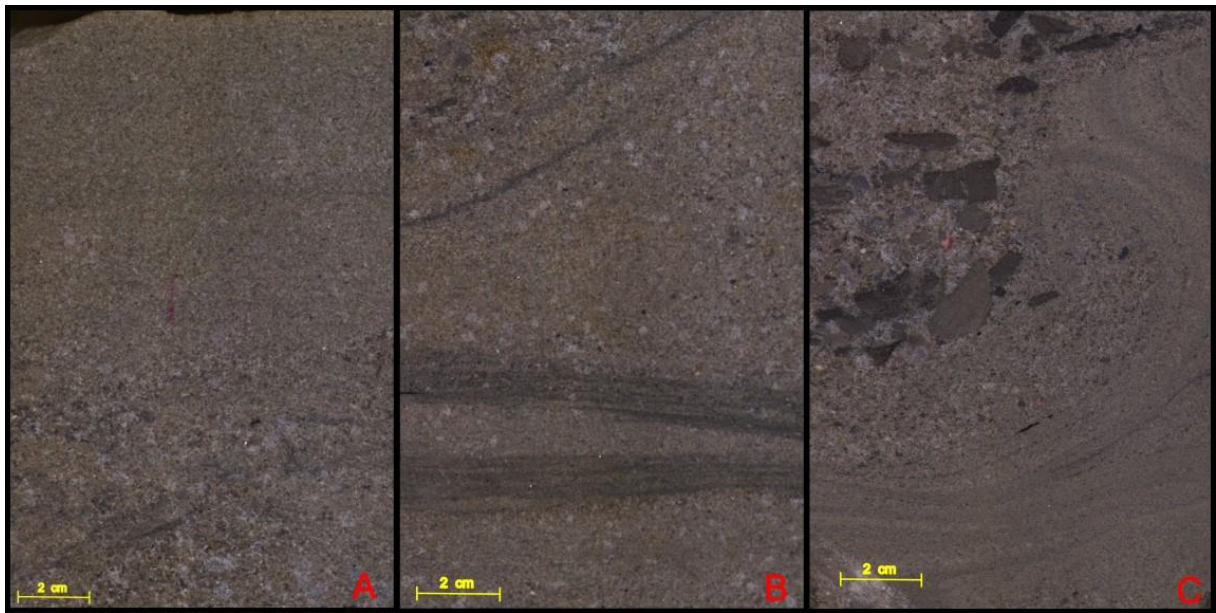


Figura 20– Imagem captada pelo MSCL das amostras AM-08 (A), AM-09 (B) e AM-11 (C).

AM-09: Arenito fino, com lâminas argilosas horizontais e onduladas cinza escuras, intercalações irregulares de arenito médio, cinza claro (Figura 20, B).

AM-10: Intercalações de arenito fino com arenito médio cinza escuro, com intraclasto argiloso e clastos centimétricos, pontualmente oxidados. Estrutura do tipo “clasto caído” (Figura 21).



Figura 21 – Estrutura do tipo “clasto caído” da amostra AM-10.

AM-11: Arenito médio heterogêneo, com intraclastos argilosos e clastos centimétricos no topo, em contato irregular com arenito fino a médio com convoluta, cinza claro (Figura 20, C).

AM-12: Arenito fino a médio, maciço, homogêneo, cinza claro

6.4 Resultado da análise por Difração de Raios-X

Os minerais identificados nos difratogramas de raios X são os representados na Tabela 4. Os minerais foram identificados usando as distâncias interplanares indicadas na Tabela 3.

Amostra	DRX	Quartzo	Plagioclasio	Feldspato alcalino	Calcita	Esmectita	Clorita	Mica	Hidrotalcita
AM-01	1279								
AM-02	1280								
AM-03	1281A								
AM-03	1281B								
AM-04	1282								
AM-06	1283								
AM-07	1284								
AM-05	1285A								
AM-05	1285B								
AM-08	1286A								
AM-08	1286B								
AM-09	1287A								
AM-09	1287B								
AM-10	1288A								
AM-10	1288B								
AM-11	1289								
AM-12	1290								

Principal reflexão com alta intensidade	
Principal reflexão com baixa intensidade	
Principal reflexão ausente	

Tabela 4 – Minerais identificados via difração de raios X.

Os minerais identificados nas amostras exibem diferenças entre aquelas essencialmente arenosas e aquelas que possuem laminações pelíticas.

De forma geral, os arenitos possuem composição mineralógica semelhante, constituída por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino. O plagioclásio pode ser albita ou oligoclásio de acordo com a identificação do *software* utilizado, bem como o feldspato alcalino foi interpretado como o microclinio. A mica foi identificada em todas as amostras e foi identificada pelo *software* como muscovita. A calcita foi identificada na maioria dos arenitos, com exceção de amostras com influência de laminações argilosas, como as amostras AM-03 (1281B) e AM-09 (1287B) (Figura 22). A esmectita, assim como a clorita, está restrita a amostras com laminações pelíticas, estando ausente ou com baixa intensidade nas porções arenosas do restante das amostras. A hidrotalcita está ausente na maior parte das amostras, com exceção das amostras AM-03 (1281B) e AM-05 (1285B), em porções essencialmente pelíticas.

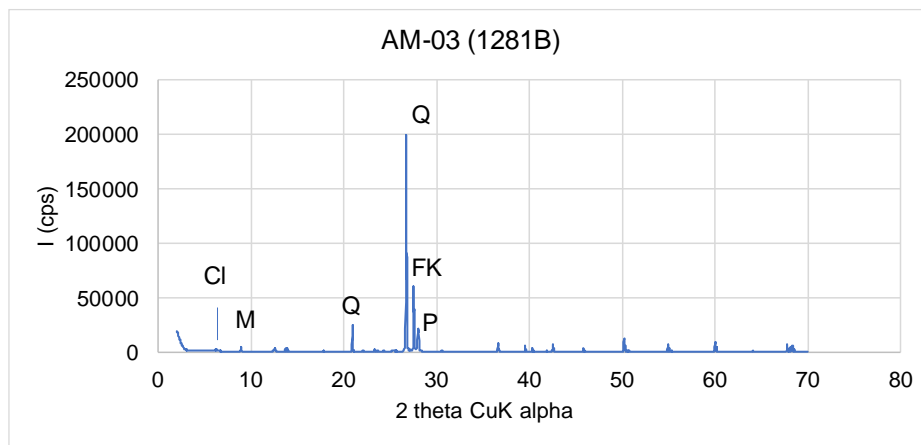


Figura 22 – Difratomogramas de raios X da amostra AM-09. (Cl – Clorita, M – Mica, Q – Quartzo, FK – Feldspato alcalino, P – Plagioclásio)

Para a amostra AM-08, as diferenças entre as duas alíquotas arenosas analisadas foi justamente a presença de calcita. A alíquota coletada no arenito fino não apresentou calcita (Figura 23, 1286A), enquanto a coletada no arenito médio indicou a presença do carbonato (Figura 23, 1286B), diferenciando dois tipos de arenitos em uma mesma amostra.

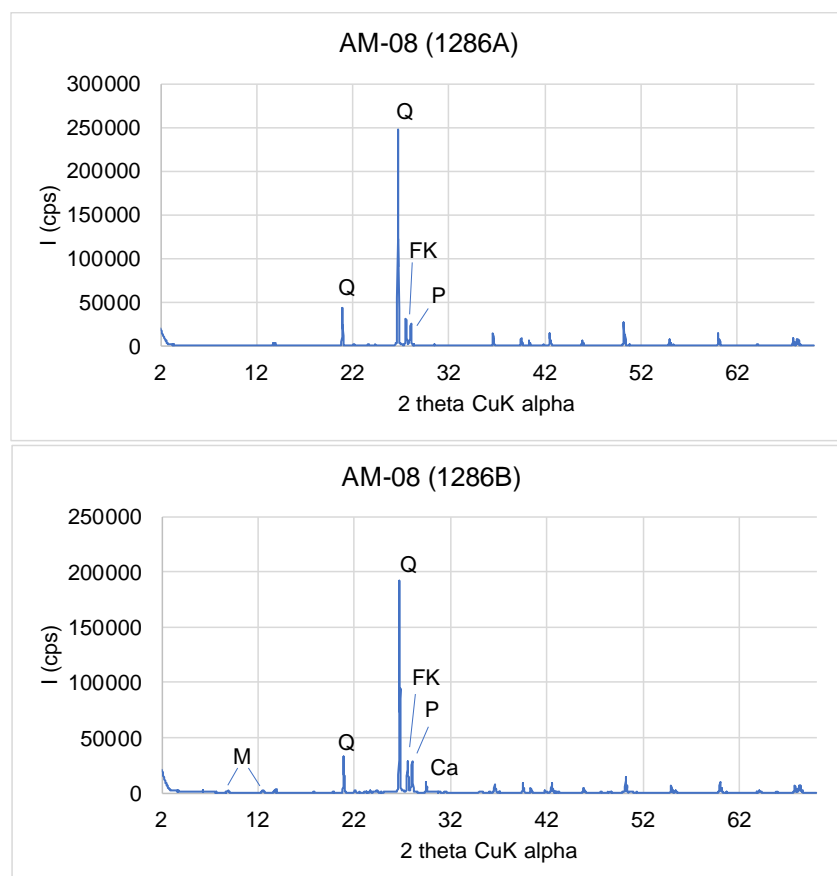


Figura 23 – Difratomogramas de raios X da amostra AM-08. (M – Mica, Q – Quartzo, FK – Feldspato alcalino, P – Plagioclásio, Ca - Calcita)

Ainda que as amostras AM-04, AM-06 e AM-07 estejam em profundidades diferentes, estas possuem mineralogias semelhantes, com baixas intensidades das reflexões principais da calcita e mica, e ausência de esmectita e clorita (Figura 24). O mesmo ocorre com a amostra AM-12, ainda que esta apresente baixas intensidade da reflexão principal da clorita.

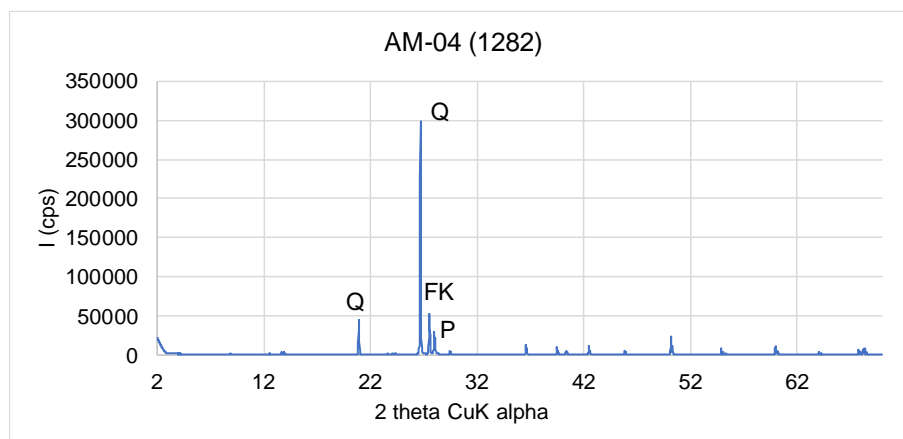


Figura 24 – Difratomogramas de raio X da amostra AM-04. (Q – Quartzo, FK – Feldspato alcalino, P – Plagioclásio)

6.5 Resultados da análise por MSCL

As amostras foram analisadas em relação a Susceptibilidade Magnética, Gama Natural e Fluorescência de Elementos. Foram selecionados os resultados que melhor representaram os fatores analisados.

6.5.1 Susceptibilidade Magnética

Pela natureza sedimentar das amostras, os valores de susceptibilidade magnética indicaram principalmente variações composicionais na mineralogia da rocha, principalmente em porções com predomínio de laminações e intraclastos pelíticos, como nas amostras AM-09 e AM-11. (Gráfico 1 e 2).

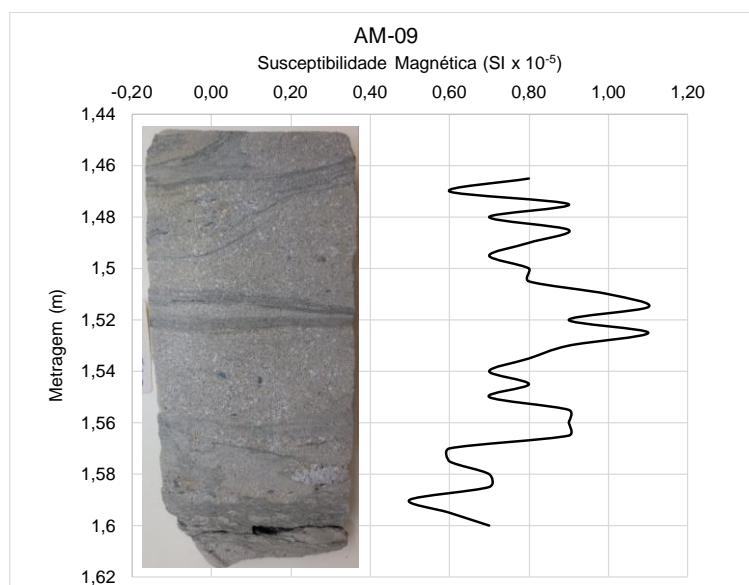


Gráfico 1 – Curva de Susceptibilidade Magnética para AM-09.

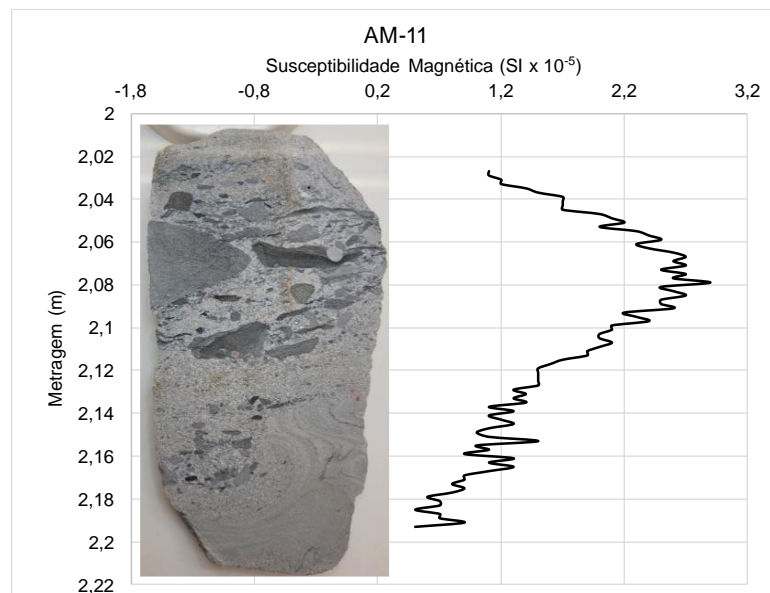


Gráfico 2 - Curva de Susceptibilidade Magnética para AM-11

Na AM-09 pode-se perceber a interferência que as laminações argilosas na porção central da amostra, causam na curva de susceptibilidade magnética. Já na amostra AM-11, a curva acompanha a presença de intraclastos argilosos e marca a variação da litologia da amostra próxima a base.

Além de porções pelíticas, a curva de susceptibilidade magnética registrou amostras com conteúdo ferruginoso, como a AM-05 (Gráfico 3). A curva se mostrou fortemente influenciada pela concentração de pirita, muito provavelmente pela presença de Ferro, que corrobora com as análises do elemento

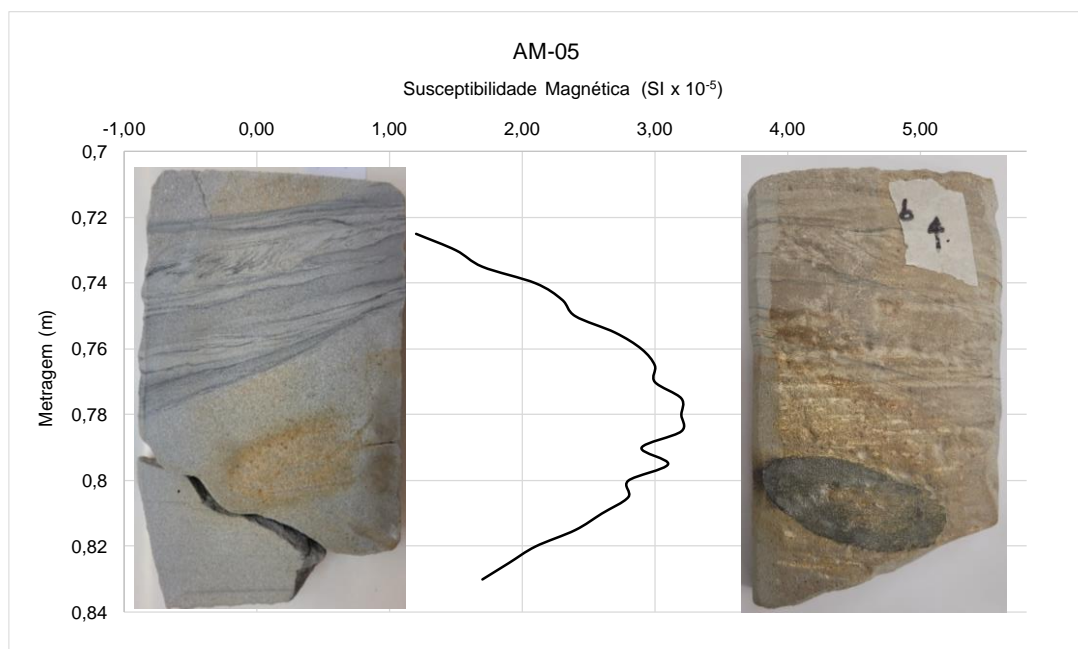


Gráfico 3 – Curva de susceptibilidade magnética da AM-05

Para amostras homogêneas, ou seja, sem a presença de laminações ou intraclastos argilosos e concentrações ferruginosas, a susceptibilidade magnética não mostrou variações significativas. Um exemplo é a amostra AM-12 (Gráfico 4), para a qual o sinal da susceptibilidade magnética oscila pouco, registrando um material mais homogêneo e quartzoso, sem presença de laminações argilosas.

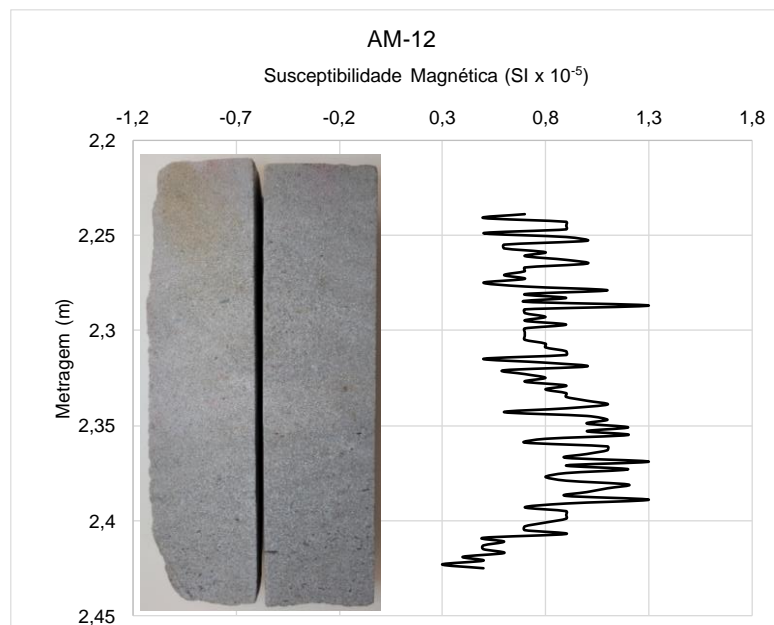


Gráfico 4 – Curva de susceptibilidade magnética da AM-12.

6.5.2 Gama Natural

De forma análoga à susceptibilidade magnética, mas com fundamentos diferentes, as contagens de raios gama emitidos naturalmente pelas amostras refletiram, no geral, as concentrações pelíticas, devido, principalmente à presença de argilominerais (Gráfico 5).

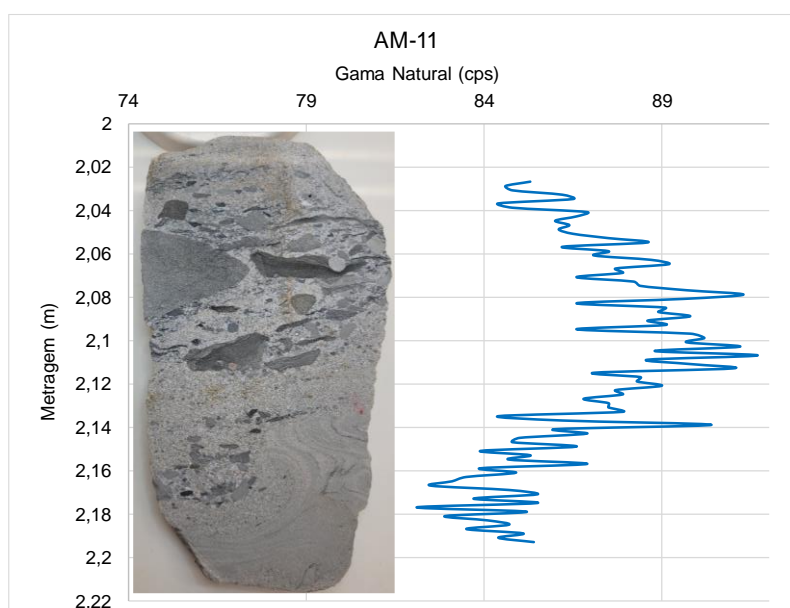


Gráfico 5 – Curva de Gama Natural da AM-11

Similarmente ao comportamento do Gráfico 2, as contagens de raios gama mostraram maior intensidade nas porções com presença de intraclastos argilosos da amostra AM-11. Na região da base, ainda é possível observar picos correspondentes a quantidades menores de clastos no canto inferior esquerdo da amostra.

Além de discriminar a presença dos intraclastos, no caso da AM-08, a curva de gama natural marcou o contato entre arenitos de composições e características diferentes (Gráfico 6). É possível notar uma mudança de granulometria e composição do arenito, com laminações pelíticas na base e porção mais quartzosa no topo. Esse contato coincide com uma baixa na contagem de gama natural, possibilitando diferenciar as duas litologias.

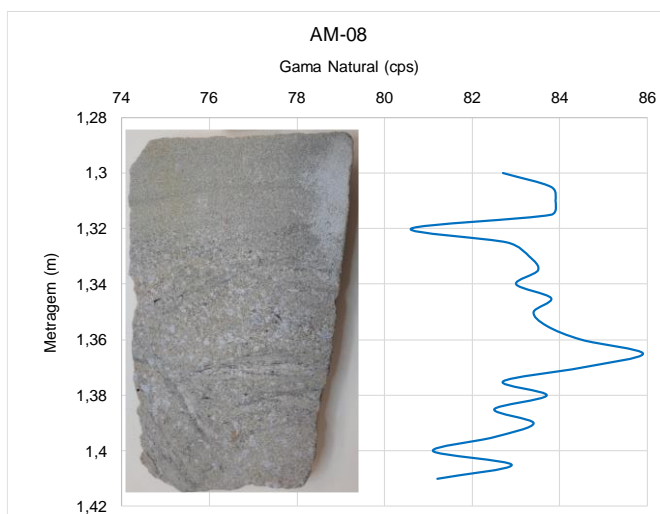


Gráfico 6 – Curva de Gama natural da AM-08

Para amostras de arenitos mais homogêneos, sem a presença de laminações argilosas, a curva de gama natural é mais constante, como nas amostras AM-04 e AM-06 (Gráfico 7 e 8). A pequena oscilação registrada indica a homogeneidade dos arenitos e reflete também a sua composição mineralógica mais quartzosa.

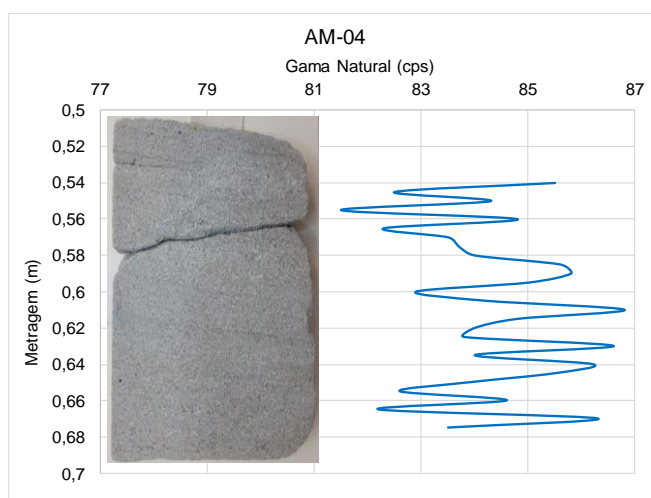


Gráfico 7 – Curva de Gama natural da AM-04

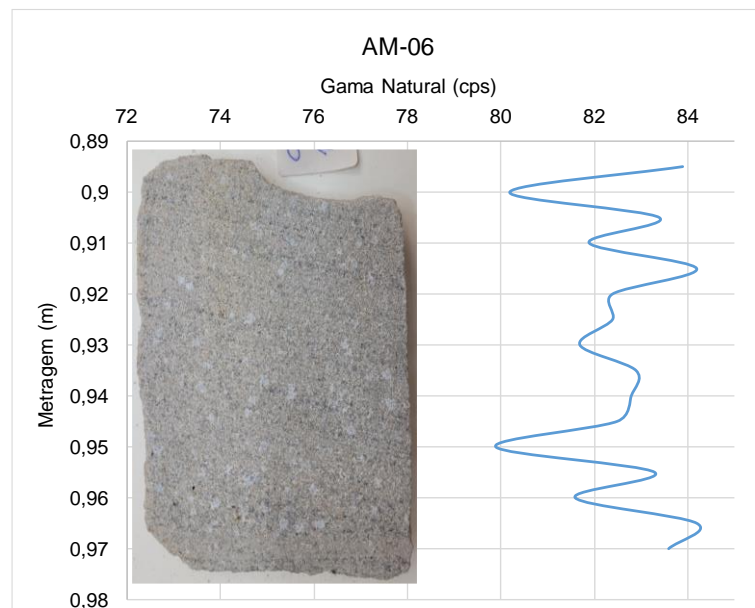


Gráfico 8 – Curva de Gama natural da AM-06

6.5.3 Fluorescência de Raios X

Foram selecionados os elementos químicos que melhor refletem a mineralogia das amostras analisadas, como Fe, K, Ca e S.

A variação na abundância do elemento Ferro destaca principalmente as laminações argilosas e concentrações ferruginosas, características encontradas nas amostras AM-05 e AM-09 (Gráfico 9 e 10).

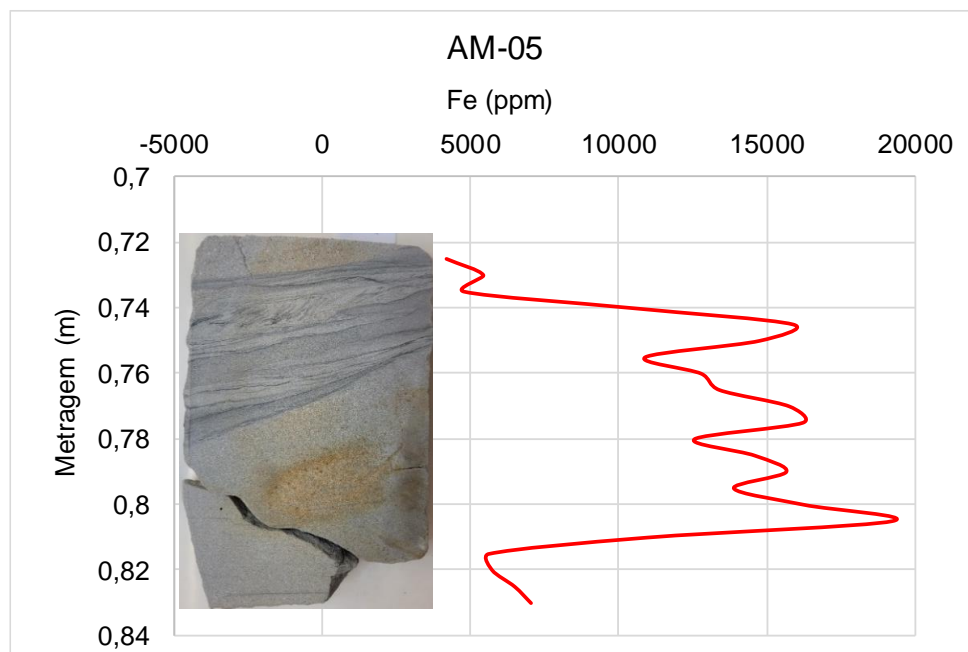


Gráfico 9 – Concentração de Fe da AM-05

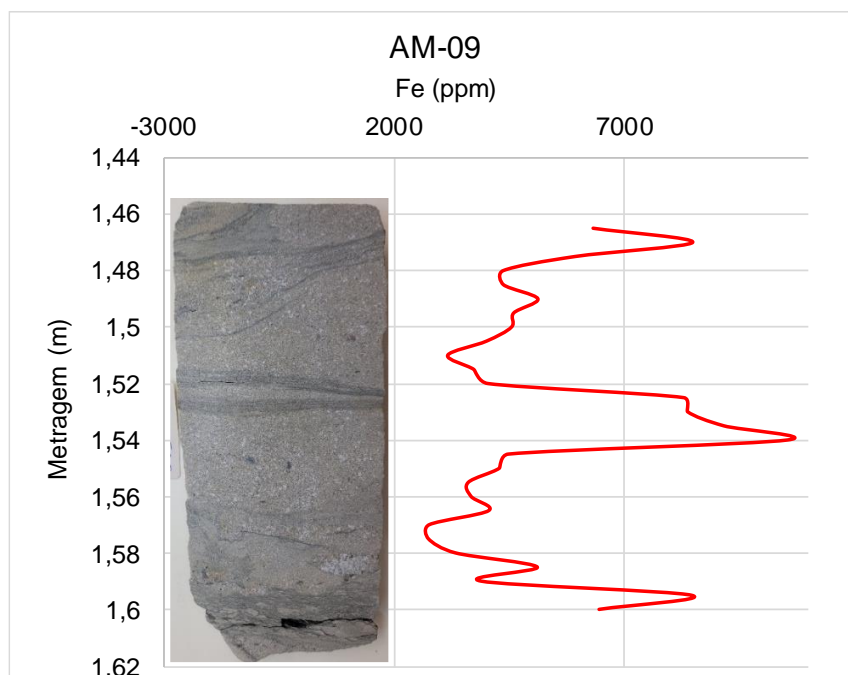


Gráfico 10 – Concentração de Fe da AM-09

De forma análoga à susceptibilidade magnética representada nos Gráficos 1 e 3, a curva da concentração de Fe apontou o caráter ferruginoso da AM-05 (Gráfico 9), bem como as laminações argilosas. Na AM-09, a curva permitiu discriminar as laminações argilosas da amostra com 3 picos bem definidos (Gráfico 10).

Para o elemento Enxofre, foram observadas altas concentrações na AM-05, que se assemelha ao comportamento do Fe (Gráfico 11).

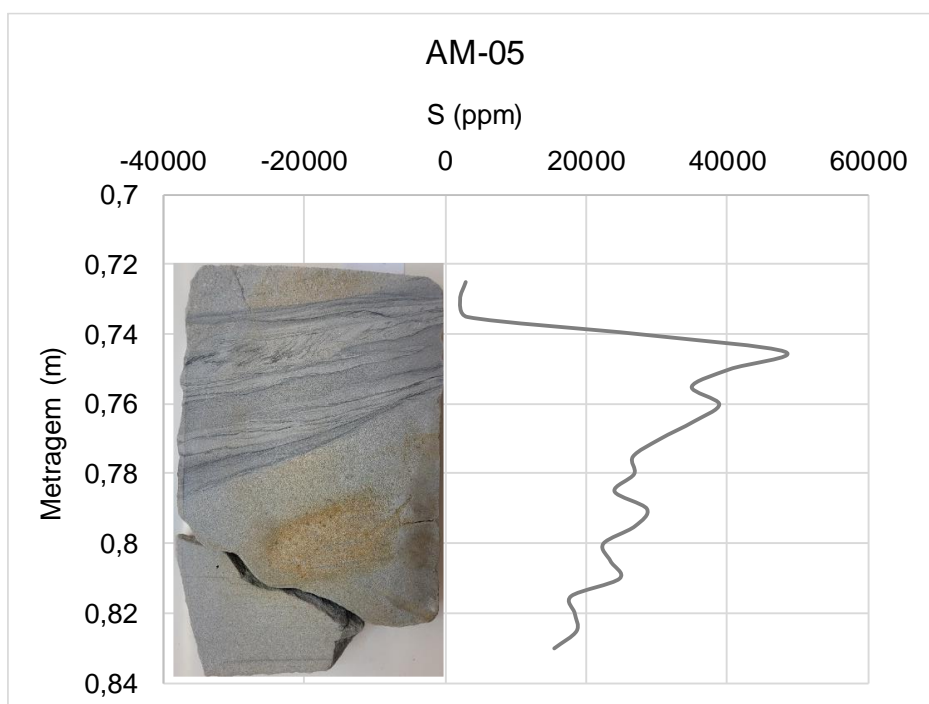


Gráfico 11 – Concentração de S da AM-05

Ainda que os difratogramas de raios X da AM-05 não tenham indicado a presença de sulfetos de ferro, as porções piritizadas observadas macroscopicamente em amostra de mão se confirmam pelo comportamento das concentrações de Fe e S demonstrados pela fluorescência de raios X.

De maneira análoga ao comportamento das curvas de gama natural, o elemento Potássio apresentou picos mais bem definidos em amostras com contraste entre porções arenosas e laminações argilosas, como a AM-09 (Gráfico 12). Discriminando laminações argilosas em 3 picos bem definidos, a curva de K refletiu a composição dos argilominerais na AM-09 de maneira análoga ao conteúdo de Fe.

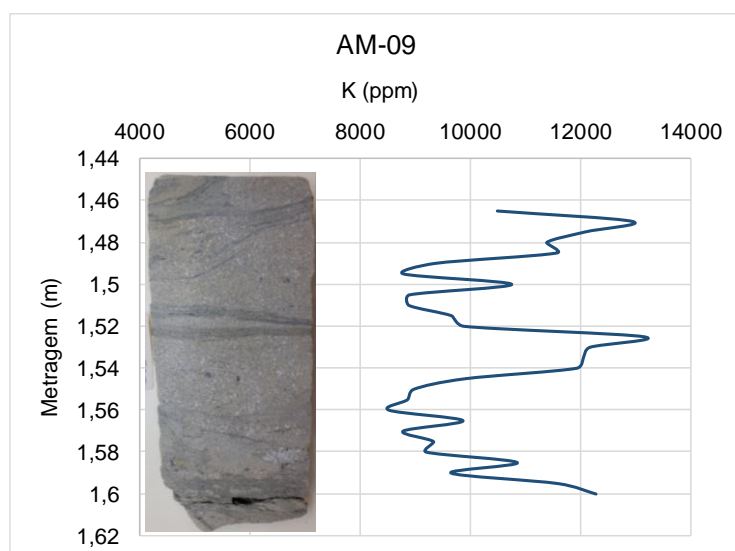


Gráfico 12 – Concentração de K da AM-09

Para arenitos homogêneos, ainda que as concentrações de K sejam consideráveis, o comportamento da curva não registra variações significativas, como na AM-04 (Gráfico 13).

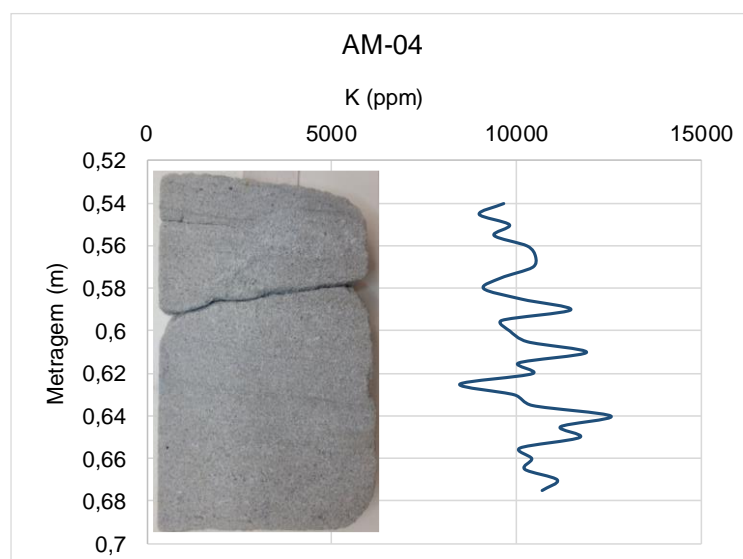


Gráfico 13 – Concentração de K da AM-04

As concentrações do elemento Calcio permitiram distinguir diferentes tipos de arenitos, em relação a sua composição mineralógica, como nos casos das amostras AM-03 e AM-08 (Gráficos 14 e 15).

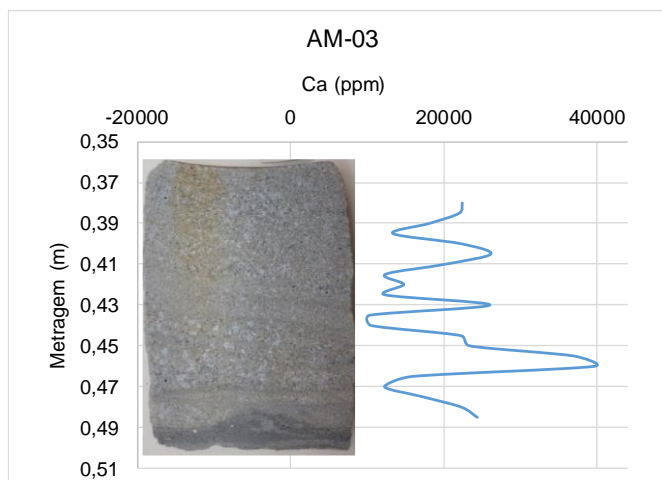


Gráfico 14 – Concentração de Ca da AM-03

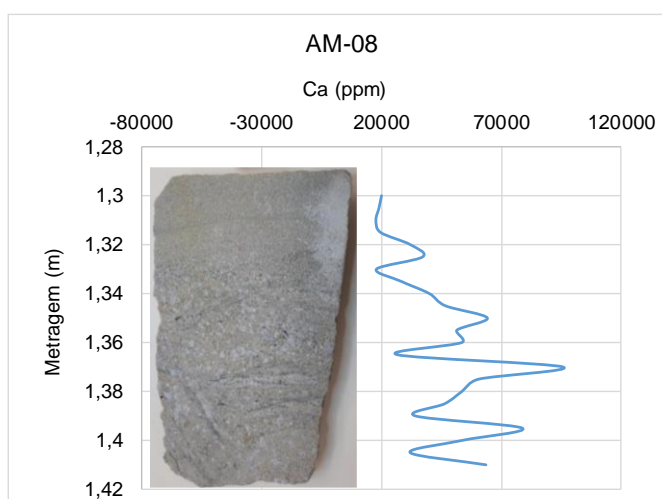


Gráfico 15 – Concentração de Ca da AM-08

Na AM-03, é possível observar que a curva varia de acordo com a característica do arenito, onde a porção central representada por uma intercalação de arenito fino possui uma diminuição na abundância de Ca. Nas porções onde ocorre o arenito médio, observa-se o aumento do conteúdo de Calcio, que pode estar relacionado com a presença de calcita.

Quando observamos a AM-08, essa mudança na concentração de Ca é mais nítida, já que a amostra é dividida praticamente em dois tipos de arenitos da base para o topo, sendo um Arenito médio em contato com um Arenito fino, respectivamente. É possível notar que o conteúdo de Ca é menor para o Arenito fino e maior para o Arenito médio, o que pode estar diretamente relacionado com a presença de Calcita, visto que os difratogramas de raios x da AM-08 apontaram a ausência de calcita no Arenito fino e a presença do carbonato para o Arenito médio.

7. DISCUSSÃO

É notório que a região da Bacia do Paraná abriga uma quantidade considerável de fontes estacionárias de diferentes setores, com destaque para o setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo. Do ponto de vista quantitativo, os dados de emissão de CO₂ da plataforma SEEG (Figura 12) corroboram com a distribuição e quantidade de fontes estacionárias levantadas (Figura 11). O Estado de São Paulo é o que possui maiores emissões.

Os dados dos poços da ANP indicaram que a distribuição das espessuras da Fm. Campo Mourão está de acordo com as espessuras propostas pelas isópacas de França e Potter (1988) (Figura 3). A presença de *outliers* em poços de São Paulo são passíveis de interpretação estratigráfica da Fm. Campo Mourão pela anexação do Membro Campo do Tenente. Vesely et al., (2021) denominaram como Formação Campo do Tenente, podendo ser diferenciada da Fm. Campo Mourão (Figura 4). A anexação da Formação Campo do Tenente como Membro da Fm. Campo Mourão superestima dados de espessura no poço 1-CP-1-SP, além do que existem diferenças litológicas entre as unidades, sendo a Fm. Campo Mourão mais arenosa e a Fm. Campo do Tenente mais pelítica.

A mesma situação ocorre pela anexação do Membro Rio Segredo na Formação Campo Mourão. Como proposto por França & Potter (1988), o Membro Rio Segredo corresponde a porção inferior arenosa da Formação Taciba. Deste modo, não pertence a Fm. Campo Mourão, influenciando na espessura do poço 2-LI-1-SP.

Ainda que existam diferentes interpretações estratigráficas para alguns poços, as medidas centrais se mostram compatíveis com os critérios de espessura de reservatórios apontados por Bachu et al. (2009).

De maneira análoga, a distribuição das profundidades do topo da Formação Campo Mourão também se mostra compatível com os critérios de Bachu et al. (2009). Ainda que a profundidade média da formação no Estado de São Paulo seja menor que no Paraná, ainda assume valores compatíveis com os critérios adotados por Bachu et al. (2009), ou seja, profundidades médias de 1812 metros para o Estado de São Paulo e 2187 metros para o Estado do Paraná (Figura 15).

O poço C-IG-93 apontou que ainda que as rochas sejam predominantemente arenosas na Formação Campo Mourão, existem diferentes tipos de arenitos, com variações granulométricas e mineralógicas em uma mesma amostra. A associação de fácies corrobora o ambiente deposicional interpretados por Petri et al. (1996), que se baseia em um modelo fluxo de detritos provenientes de uma borda continental. Em adição, as interpretações propostas por Vesely et al. (2021) também se mostram complementares, apontando que os

ambientes deposicionais variaram de fluviais a marinhos profundos com associações deltaicas e costeiras.

A variação de ambientes deposicionais pode ser observada nas diferenças estruturais sedimentares dos arenitos. Existem arenitos mais homogêneos, como no caso das amostras AM-04, AM-06, AM-07 e AM-12, onde não ocorrem laminações argilosas e intraclastos pelíticos. A homogeneidade destes também se mostra na mineralogia apontada pelos difratogramas de raios X, indicando a baixa ou nenhuma ocorrência de argilominerais (Tabela 4).

Por outro lado, os arenitos com laminações argilosas, clastos e intraclastos pelíticos indicam um ambiente com maior influência glacial, sugerindo a hipótese de Carvalho e Vesely (2017), de que os avanços e recuos de uma margem glacial mais distante do sítio deposicional, eventualmente fornecia detritos por meio de *icebergs* e água de degelo. Estas estruturas podem ser observadas nas amostras AM-09, AM-10 e AM-11. A ocorrência de depósitos de fluxo gravitacional subaquático proposta por Vesely et al. (2021) também pode ser observada na forma de estruturas convolutas, como no caso da AM-11 (Figura 20, C).

As análises oriundas do MSCL, como Susceptibilidade Magnética, Gama Natural e Fluorescência de Raios X, permitiram principalmente destacar ou discriminar aspectos estruturais e composicionais das amostras. Para amostras homogêneas, a técnica se mostrou pouco passível de interpretação. Para aquelas que possuem uma variação composicional e estrutural, foi possível observar comportamentos distintos para cada análise.

Os gráficos de Susceptibilidade Magnética e Gama Natural destacaram principalmente a presença de intraclastos pelíticos, clastos e laminações argilosas. Os picos são reflexo da composição mineralógica dos argilominerais, e em um contexto de busca por reservatórios e corpos arenosos homogêneos, a técnica pode se mostrar útil para a discriminação de rochas-reservatório e rochas-selante, bem como avaliar a homogeneidade de um corpo arenoso.

A Fluorescência de Raios X destacou principalmente a composição química da mineralogia das rochas, registrando bem a presença de argilominerais e intraclastos. A associação entre estes dados e os difratogramas de raios X se mostrou eficiente, principalmente para a amostra AM-08 (Figura 23), onde destacou a presença de calcita em apenas um dos arenitos da amostra, refletindo na curva de abundância do elemento Ca. O mesmo ocorreu para a amostra AM-03, porém com ausência de calcita na porção pelítica. Esse resultado é importante porque a presença de carbonato nos arenitos pode favorecer a mineralização do CO₂ dissolvido no fluido de injeção, na forma de carbonato, induzindo a precipitação de mais carbonatos no sistema.

O elemento K, no geral, seguiu o mesmo comportamento das curvas de Gama Natural, muito pelo fato de estes estarem relacionados. O elemento K emite raios gama naturalmente, e está presente principalmente em argilominerais (incluindo a mica), podendo ser utilizado para discriminar e avaliar homogeneidade de corpos arenosos.

Para amostras como a AM-05, com conteúdo ferruginoso observado a olho nu, as concentrações de Fe e S permitiram comprovar as descrições feitas por Petri et al. (1996) de que alguns arenitos possuem concentrações de pirita.

No geral, os dados do MSCL se mostraram passíveis de interpretação para amostras heterogêneas tendo correlações diretas com as feições macroscópicas e mineralogia. Já nas amostras mais homogêneas os sinais permitem interpretar que a litologia é realmente homogênea e por isso não registra variações significativas das curvas, conforme já sugeria a observação macroscópica e os dados de DRX. Essa distinção pode ser interessante para a avaliação de rochas quando se busca reservatórios arenosos homogêneos.

8. CONCLUSÕES

Do ponto de vista quantitativo e qualitativo, a Bacia do Paraná abriga fontes estacionárias e emissões consideráveis que podem se aproveitar da tecnologia de captura e armazenamento de CO₂, conforme apontado pelos levantamentos de dados. No médio a longo prazo, muito provavelmente, essas fontes deverão ser associadas a soluções para mitigar ou zerar suas emissões, podendo se aproveitar da tecnologia CCS.

Em relação aos critérios estruturais adotados para a segurança dos reservatórios de CO₂, a Formação Campo Mourão apresenta espessuras e profundidades ideais para garantir a segurança do reservatório, tanto para o Estado de São Paulo, quanto para o Estado do Paraná.

Ainda que sejam necessários estudos mais aprofundados das rochas da Fm. Campo Mourão, dos pontos de vista mineralógicos, composicionais e estruturais, existem arenitos com potencial para serem reservatório, como nos casos das amostras AM-04, AM-06, AM-07 e AM-12. Estes arenitos se encontram em profundidades diferentes no poço C-IG-93, mas possuem características semelhantes, o que poderia se repetir em outros corpos arenosos da Fm. Campo Mourão.

Deste modo, o estudo das rochas da atual borda da Bacia é essencial para o entendimento e avaliação de como estas rochas estão em profundidade, para se ter parâmetros do que ocorre na porção central da Bacia, em maiores profundidades, onde os potenciais reservatórios podem ser caracterizados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, R. P., Hawkins, E., Bellouin, N., & Collins, B. (2021). IPCC, 2021: summary for Policymakers.
- Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H. B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., ... & Zhou, D. (2005). Underground geological storage. Cambridge University Press.
- Bachu, S., Hawkes, C., Lawton, D., Pooladi-Darvish, M., & Perkins, E. (2009). CCS site characterisation criteria. IEA GreenHouse Gas R&D Programme
- Brannon Jr, H. R., & Osoba, J. S. (1956). Spectral gamma-ray logging. Transactions of the AIME, 207(01), 30-35.
- Brouwer, P. (2006). Theory of XRF. Almelo, Netherlands: PANalytical BV.
- Carvalho, A.H. (2016). Análise estratigráfica do sistema flúvio-deltaico Pedra Alta, Carbonífero Superior da Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 115 pp.
- Carvalho, A.H., Vesely, F.F. (2017). Facies relationship recorded in a Late Paleozoic fluviodeltaic system (Parana Basin, Brazil): insights into the timing and triggers of subaqueous sediment gravity flows. Sedimentary Geology, 352: 45-62.
- Castro, J. C. (2004). Glaciação Paleozóica no Brasil, Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 151-162
- Cook, P. J., & Benson, S. M. (2005). Overview and current issues in geological storage of carbon dioxide. In Greenhouse Gas Control Technologies 7 (pp. 15-20). Elsevier Science Ltd.
- CPRM. Reate, 2023. ANP Terrestre. Disponível em: <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>. Acesso em: 20 de abr. 2023
- D'Ávila, R.S.F. (1999). Análise de Fácies e Estratigrafia Física do Arenito Lapa, Grupo Itararé, Bacia do Paraná, Brasil. Porto Alegre. 349 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- Dinnebier, R. E., & Billinge, S. J. (Eds.). (2008). Powder diffraction: theory and practice. Royal society of chemistry.
- Dos Santos, P. R., Rocha-Campos, A. C., & Canuto, J. R. (1996). Patterns of late Palaeozoic deglaciation in the Paraná Basin, Brazil. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 125(1-4), 165-184.

- França, A. B., & Potter, P. E. (1991). Stratigraphy and reservoir potential of glacial deposits of the Itararé Group (Carboniferous-Permian), Paraná Basin, Brazil. *AAPG bulletin*, 75(1), 62-85.
- França, A.B., Potter, P.E. (1988). Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (parte 1). *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 2: 147-191.
- França, A.B., Winter, W.R., Assine, M.L. (1996). Arenitos Lapa-Vila Velha: Um modelo de trato de sistemas subaquosos canal-lobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(1): 43-56
- Fúlfaro, V. J., Stevaux, J. C., Souza-Filho, E. E., & Barcelos, J. H. (1984). A Formação Tatuí (P) no Estado de São Paulo. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 33, pp. 711-723).
- Gama Jr, E. G., Perinotto, J. A., Ribeiro, H. J., & Padula, E. K. (1992). Contribuição ao estudo da ressedimentação no Subgrupo Itararé: tratos de fácies e hidrodinâmica deposicional. *Brazilian Journal of Geology*, 22(2), 228-236.
- Gordon, M.J. (1947). Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Sante Catarina e Rio Grande do Sul. *Notas Preliminares e Estudos da Divisão de Geologia e Mineralogia do DNPM*, 38: 1-20
- Ketzer, J. M., Machado, C. X., Rockett, G. C., & Iglesias, R. S. (2015). Brazilian atlas of CO2 capture and geological storage.
- Lima, F. P. D. (2021). Poços horizontais e fraturamento hidráulico na formação Irati, Bacia do Paraná. Uma análise à luz da experiência dos países produtores (Dissertação de Doutorado, Universidade de São Paulo).
- Milani, E. J. (1997). Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental (Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.).
- Milani, E. J., Faccini, U. F., Scherer, C. M., Araújo, L. M., & Cupertino, J. A. (1998). Sequências e hierarquia estratigráfica da bacia do Paraná (Ordoviciano ao Cretáceo), sul do Brasil. *Boletim IG-USP. Série Científica*, 29, 125-173.
- Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M., & Neto, O. P. (2007). Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 183-205.

- Northfleet, A. A., Medeiros, R. A., & Muhlmann, H. (1969). Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 12(3), 291-346.
- Nova Cana, 2023. Usinas Brasil. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil/estados/sao-paulo. Acesso em: 22 de ago. 2023
- Oliveira, E. P. D. (1927). Geologia e recursos minerais do Estado do Paraná. Monografia-SGM, Rio de Janeiro, (6).
- Perrotta, M. M., Salvador, E. D., Lopes, R. D. C., D'Agostino, L. Z., Chieregati, L. A., Peruffo, N., ... & Lacerda Filho, J. V. D. (2006). Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo. CPRM.
- Petri, S. (1964). Grupo Tubarão. *Boletim do Instituto Geográfico e Geológico*, (41), 56-63.
- Petri, S., & Pires, F. A. (1992). O Subgrupo Itararé (Permocarbonífero) na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(3), 301-10.
- Petri, S., Vieira, P. C., Oda, G. H., & Botelho, P. F. (1996). O Subgrupo Itararé, permocarbonífero da região do médio Tietê, Estado de São Paulo: Estudos em subsuperfície. *Revista do Instituto Geológico*, 17(1-2), 63-78.
- Riddiford, F. A., Tourqui, A., Bishop, C. D., Taylor, B., & Smith, M. (2003). A cleaner development: the In Salah Gas project, Algeria. In *Greenhouse Gas Control Technologies- 6th International Conference* (pp. 595-600). Pergamon.
- Rocha-Campos, A. C., & Rosler, O. (1978). Late Paleozoic faunal and floral successions in the Paraná Basin, southeastern Brazil. *Boletim Ig*, 9, 01-15.
- Rodrigues, S. W. D. O., & Caltabeloti, F. P. (2012). Geologia e recursos minerais da folha Itararé SG. 22-XBI. CPRM.
- Salgado, Felipe. Petróleo Hoje. Gás., GNLink assina acordo com a Tradener para construir e operar planta de liquefação no campo de Barra Bonita. 4 jan. 2023. Disponível em <https://petroleohoje.editorabrasilenergia.com.br/gnlink-assina-acordo-com-a-tradener-para-construir-e-operar-planta-de-liquefacao-no-campo-de-barra-bonita/>. Acesso em 15 abr. 2023.
- Schneider, R., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R. D., Daemon, R. F., & Nogueira, A. A. (1974). Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In *Congresso brasileiro de Geologia* (Vol. 28, No. 1974, pp. 41-65).
- SEEG Brasil, 2023. Emissões totais. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 12 de jul. 2023

- Stevaux, J. C., Souza Filho, E. D., Teixeira, J. A., & Landim, P. M. B. (1987). Sistemas deposicionais do Subgrupo Itararé (PC) na Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Capivari (SP): um modelo para prospecção de água subterrânea. SBG-NSP, Simp. Reg. Geol, 6, 355-374.
- UNFCCC (United Nations – Framework Convention on Climate Change). (2016). The Paris Agreement. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf Acesso em: 20 de jan de 2023.
- Vesely, F. F., Delgado, D., Spisila, A. L., & Brumatti, M. (2021). Divisão litoestratigráfica do Grupo Itararé no estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, 78.
- Vesely, F.F. & Assine, M.L. (2004). Seqüências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Geociências 34: 219-230.
- Walker, R. G. (1992). Facies model: response to sea level change. Geol. Asso. Canada, 409.
- Waseda, Y., Matsubara, E., & Shinoda, K. (2011). X-ray diffraction crystallography: introduction, examples and solved problems. Springer Science & Business Media
- White, I. C. (1908). Brasil, Comissão estudos minas de carvão, Relatório final, 617 p.