DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DIMENSIONAIS DE AQUÍFEROS A PARTIR DE POÇOS EXPLORATÓRIOS NA PROVÍNCIA HIDROGEOLÓGICA DO PARNAÍBA

Richardson Pereira Silva[1]

Cláudio José da Silva de Sousa[2]

INTRODUÇÃO

Na Hidrogeologia, os registros de poços tubulares são fundamentais para a caracterização e compreensão dos aquíferos, definidos como formações geológicas com capacidade de armazenamento, transporte, filtragem da água subterrânea (Rebouças, 2008). Os poços tubulares fornecem informações relevantes acerca das formações geológicas interceptadas, incluindo geometria, características litoestratigráficas e propriedades hidráulicas e hidrodinâmicas dos sistemas aquíferos.

As principais fontes de dados hidrogeológicos compreendem relatórios técnicos, processos de outorga de direito de uso das águas, produção acadêmica e cadastro de poços, com destaque para o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). O SIAGAS constitui uma base de dados permanentemente atualizada e recomendada como repositório nacional compartilhado para armazenamento, manuseio e difusão de informações de águas subterrâneas (Brasil, 2006). Contudo, a base apresenta inconsistências associadas a erros de georreferenciamento de poços, duplicidade de registros, incongruências nas características dos poços, incoerências litoestratigráficas, fatores que podem comprometer interpretações acerca das características dos aquíferos, do dimensionamento de reservas e delimitação de zonas de recarga.

Nesse contexto, a comparação dos registos do SIAGAS com outras bases de dados pode auxiliar no aprimoramento de modelos hidrogeológicos mais aderentes às características reais dos aquíferos. Nesse sentido, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio do Programa de Revitalização da Atividade de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Áreas Terrestres (REATE), disponibilizou acesso gratuito ao acervo de dados técnicos públicos associados às bacias sedimentares brasileiras em ambiente terrestre (ANP, 2023).

Esses registros encontram-se armazenados no Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) e abrangem dados sísmicos, gravimétricos, magnetométricos, gamaespectrométricos, eletromagnéticos e informações provenientes de poços exploratórios cadastrados na ANP. Entre os documentos disponíveis, destacam-se o arquivo geral de poço, a consolidação de dados de poço exploratório, os perfis compostos e digitais. Os perfis compostos sintetizam os dados obtidos durante a perfuração, integrando colunas e faixas destinadas à representação de curvas de perfilagem, à codificação das unidades estratigráficas interceptadas e à apresentação de informações complementares (ANP, 2024).

Na Província Parnaíba, unidade geotectônica que abrange aproximadamente 600.000km^2 entre os Estados do Maranhão, Piauí, Pará, Tocantins e pequenas porções da Bahia e Ceará (Silva *et al.*, 2003), existem 251 poços cadastrados pela ANP, dos quais 222 são públicos e 29 confidenciais. As profundidades registradas, desconsiderando-se valores nulos, variam entre

1 Discente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão; E-mail richardson.20220000319@aluno.uema.br; Bolsista PIBIC/FAPEMA.

2 Doutor em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão; E-mail claudiojose@professor.uema.br.

471,50 e 24.450 m, interceptando as sequências sedimentares definidas por Góes e Feijó (1994), a saber: Siluriana (Grupo Serra Grande), Devoniana (Grupo Canindé), Carbonífero-Triássica (Grupo Balsas), Jurássica (Grupo Mearim) e Cretácea.

Essas sequências sedimentares constituem o arcabouço intergranular de importantes sistemas aquíferos, tais como Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí, caracterizados por produtividade hidrogeológica muito alta a alta; Sambaíba e Corda, de produtividade alta a moderada; e Itapecuru, de produtividade moderada a baixa, entre outros. Diante disso, a análise dos perfis compostos de poços exploratórios representa uma oportunidade relevante de investigação contínua das sequências sedimentares profundas, condição raramente observada em poços tubulares convencionais, cujas profundidades são, em geral, significativamente inferiores. Nesse contexto, o presente trabalho visa analisar os parâmetros dimensionais dos aquíferos — como profundidade e espessura das camadas — com base nesses perfis, comparando-os aos dados do Siagas, em apoio à gestão sustentável da água.

METODOLOGIA

A metodologia adotada foi estruturada em etapas sequenciais, iniciando-se com revisão bibliográfica voltada à investigação dos conhecimentos geológicos referentes às formações sedimentares da Província Parnaíba e à análise de documentos técnicos associados a poços exploratórios destinados à prospecção de petróleo e gás natural. Posteriormente, procedeu-se à síntese de todas as informações coletadas, com objetivo de compreender a gênese e o contexto geológico das formações sedimentares.

Na sequência, realizou-se o levantamento e a composição de um banco de dados geográficos, mediante importação de informações espaciais para o ambiente do sistema de informação geográfica QGIS, v. 3.28.11, Firenze (*Open Source Geospatial Foundation - OSGeo*). Os dados foram organizados na projeção cartográfica Lat/Long e no Sistema Geodésico SIRGAS 2000. Foram importados dados temáticos referentes ao Grupo Itapecuru (Diniz *et al.,* 2014); cidades, hidrografia, batimetria (Cordani *et al*., 2016); estruturas tectônicas (Sousa *et al*., 2012); unidades da federação (IBGE, 2022); limite da Província Parnaíba (SGB, 2023).

A caracterização dos parâmetros dimensionais das formações geológicas foi conduzida a partir da análise de 251 registros de poços exploratórios provenientes do Programa REATE, dos quais somente 135 foram selecionados em virtude da disponibilidade de perfis compostos. Os registros foram organizados em planilha no Microsoft Excel, estruturada em colunas específicas contendo informações de cada poço exploratório. Os dados registrados incluíram identificação do poço, coordenadas geodésicas e UTM, e elevação; e profundidade inicial e final das formações geológicas interceptadas, espessura e o tipo de contato entre elas (concordante ou discordante).

Na etapa subsequente, os registros foram importados para o ambiente do QGIS, com o objetivo de comparar os parâmetros dimensionais do Sistema Aquífero Itapecuru, especificamente, as profundidades inicial e final, obtidas a partir de dados de poços exploratórios do Programa REATE, com aquelas procedentes de poços tubulares do SIAGAS.

Inicialmente, foram considerados 1.144 registros de poços tubulares do SIAGAS que interceptam os depósitos sedimentares do Grupo Itapecuru, dos quais 1.084 possuem filtros instalados predominantemente nessa unidade, além de 97 poços exploratórios do Programa REATE. A partir dessa análise, foi elaborado um quadro comparativo dos parâmetros anteriormente mencionados com base em ambos os conjuntos de dados.

Em seguida, os registros dos poços do Programa REATE foram submetidos à análise exploratória de dados, com vistas à preparação para a interpolação por krigagem ordinária (Yamamoto; Landim, 2013), realizada no ambiente SURFER v. 29. Nessa operação foram considerados apenas os poços que interceptaram totalmente o Grupo Itapecuru, sendo descartados os registros duplicados, aqueles com valores discrepantes (*outliers*), considerando

o intervalo de ±1 desvio padrão em relação à média, além dos poços excessivamente espaçados, com distâncias superiores a 82 km entre si.

Como resultado dessa triagem, restaram 67 registros de poços exploratórios. Os valores regionalizados de profundidade inicial, profundidade final e espessura sedimentar foram então comparados aos observados nos poços do SIAGAS localizados nas mesmas posições. Para essa comparação, dos 1.084 registros originais, foram selecionados apenas 14, situados dentro do domínio espacial coberto pelos dados regionalizados.

Uma vez avaliados os valores de profundidade inicial, profundidade final e espessura sedimentar observados nos poços exploratórios, foi realizada a análise das camadas aquíferas e confinantes dos depósitos sedimentares do Grupo Itapecuru. Para isso, em cada um dos 67 poços exploratórios validados na etapa anterior, foram computadas a espessura das camadas aquíferas e dos aquitardos, bem como a litologia correspondente a esses estratos. Os registros foram então importados para o ambiente SURFER, onde foram submetidos à interpolação por krigagem ordinária. Em seguida, os dados regionalizados foram exportados para o QGIS, com o objetivo de compor os mapas temáticos resultantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspectos dimensionais das unidades estratigráficas da Província Parnaíba

A Província Parnaíba apresenta extensão aproximada de 600.000 km² e possui sua coluna sedimentar compartimentada em grandes sequências deposicionais formadas entre o Siluriano e o Cretáceo. Essas sequências englobam unidades estratigráficas, grupos e formações que hospedam importantes sistemas aquíferos regionais, tais como Serra Grande, Cabeças e o Sistema Aquífero Poti-Piauí, os quais constituem relevantes reservatórios de águas subterrâneas.

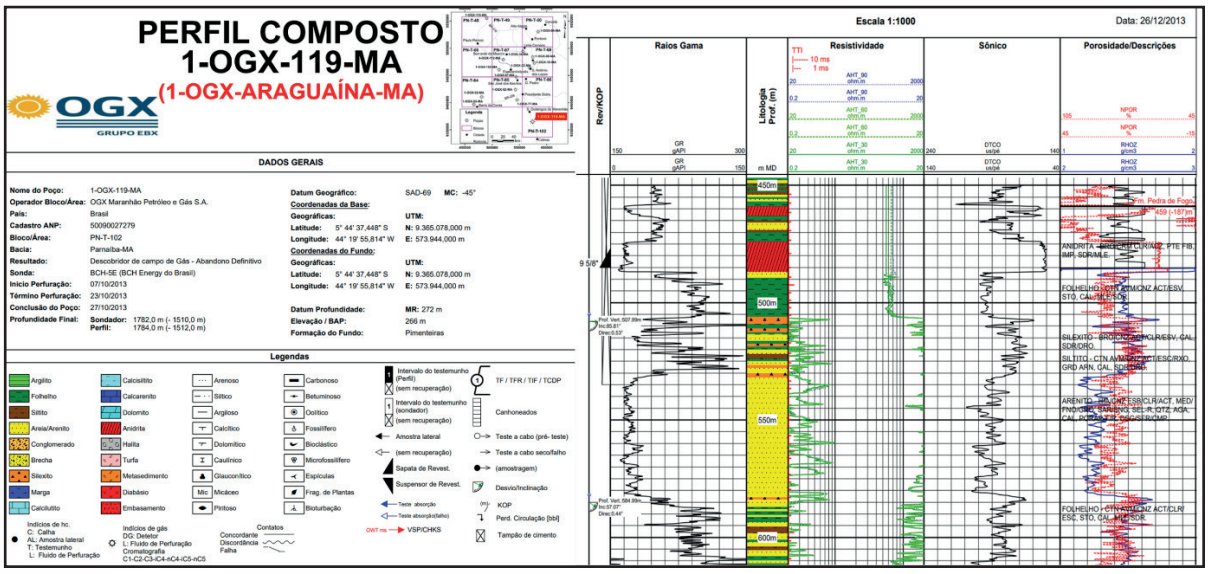
Entre os principais parâmetros empregados na avaliação do potencial hidrogeológico de uma formação aquífera destacam-se a espessura dos depósitos sedimentares e a profundidade das unidades geológicas. A espessura sedimentar está diretamente relacionada ao volume potencial de armazenamento, enquanto a profundidade condiciona a viabilidade técnica e econômica da explotação hídrica subterrânea. Aquíferos situados em maiores profundidades demandam investimentos mais elevados em perfuração e construção de poços tubulares, além da utilização de sistemas de bombeamento de maior potência, o que implica incremento nos custos operacionais de explotação.

Nesse contexto, os perfis compostos de poços exploratórios assumem um papel importante na determinação da profundidade inicial e final das unidades estratigráficas uma vez que esses liminares procedem de uma avaliação conjunta de perfis de raios gama, de eletrorresistividade, sônico, de porosidade, entre outros. Os poços exploratórios correspondem a perfurações executadas com a finalidade de investigar a ocorrência de petróleo e gás natural em áreas ainda não confirmadas como produtoras, constituindo etapa fundamental das atividades de prospecção de hidrocarbonetos.

As informações relativas aos poços exploratórios cadastrados ANP são disponibilizadas em formatos tabulares e vetoriais (*shapefile*). A tabela de poços reúne dados referentes à identificação do poço, número de cadastro, operador responsável, unidade federativa de perfuração, bacia sedimentar associada e coordenadas geográficas em sistema Latitude/Longitude, expressas em graus, minutos e segundos, bem como em coordenadas decimais.

De acordo com ANP (2024), os perfis compostos de poços exploratórios consistem em combinações de colunas ou faixas (tracks) utilizadas para representar perfis de raios gama, resistividade, perfil sônico e porosidade, além de codificar a coluna litológica penetrada e apresentar outras informações, constituindo um resumo dos dados adquiridos durante a perfuração dos poços, tal como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de perfil composto de poço exploratório com registros geofísicos de raios gama, resistividade elétrica, perfil sônico e porosidade



Fonte: Adaptado de Programa REATE (ANP, 2023).

Na Província Parnaíba, também denominada Bacia do Parnaíba no contexto da indústria petrolífera, os perfis compostos têm sido predominantemente empregados em estudos voltados à prospecção de formações geradoras e reservatórios de hidrocarbonetos (Cruz, 2016; Silva, 2019; Santos, 2022), além de aplicações em análises estratigráficas (Picco, 2019), caracterização de fácies sedimentares, interpretação de sistemas deposicionais e identificação de superfícies estratigráficas, entre outras abordagens.

No âmbito hidrogeológico, embora o uso de poços exploratórios seja pouco reportado na literatura, no presente estudo esses registros foram empregados na caracterização de parâmetros dimensionais dos aquíferos, tais como espessura sedimentar, profundidade do topo e da base das formações geológicas. Essa abordagem foi fundamentada no fato de que tais poços interceptam integralmente as unidades geológicas, possibilitando estimativas mais realistas desses parâmetros.

Dessa forma, do total de 251 poços exploratórios cadastrados na Província Parnaíba, 29 registros (11,5%) possuem caráter confidencial, enquanto 222 (88,5%) são de domínio público. Dentre os poços públicos, 135 exibem perfis compostos, distribuídos da seguinte forma: 128 localizados no Maranhão, 6 no Piauí e 1 no Pará (Figura 3). A maior concentração de registros de poços exploratórios ocorre na Bacia do Grajaú, sítio deposicional da Província Parnaíba, que concentra a sedimentação cretácea (Góes, 1995), representada pelo Grupo Itapecuru e pela Formação Codó.

Nesse compartimento, localiza-se o depocentro da Província Parnaíba, caracterizado pelas maiores espessuras da coluna sedimentar, que atingem aproximadamente 4.000 m (Cordani *et al.,* 2016), área alvo da indústria petrolífera e de gás natural. Conforme a Figura 3, os limiares de classes de profundidade de sondagem foram baseados em quartis, evidenciando que mais de 75% dos poços exploratórios possuem profundidades superiores a 1.500 m, enquanto entre 50% e 75% dos registros situam-se no intervalo entre 2.113 e 3.423 m de profundidade.

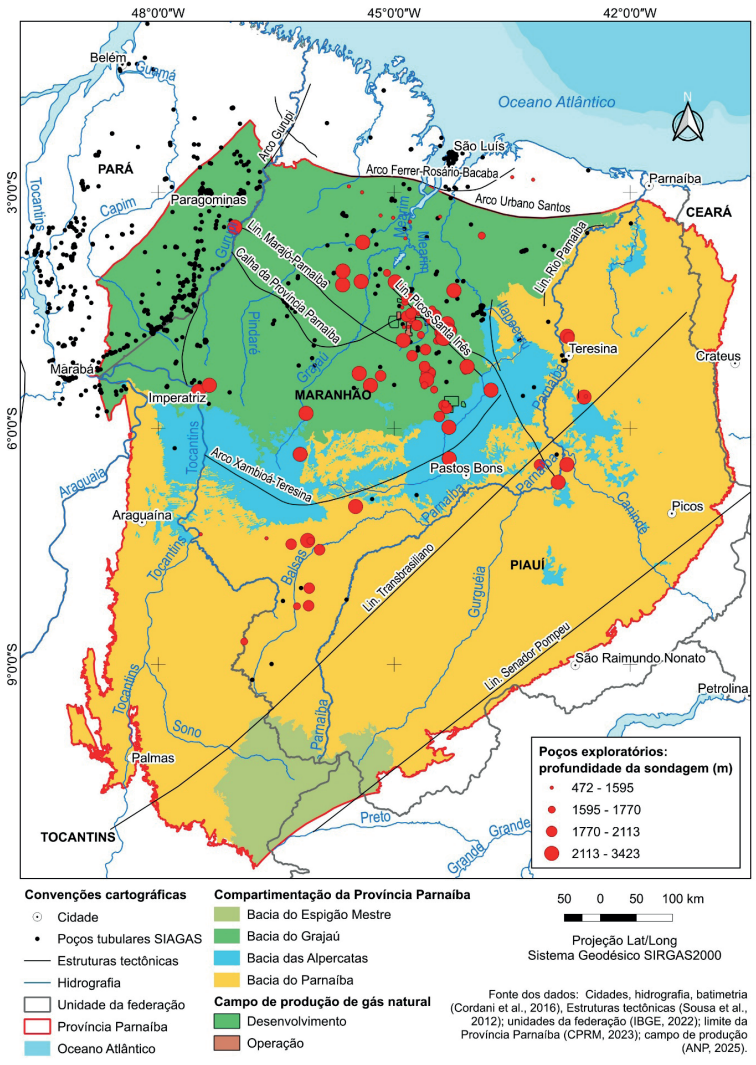
Esse intervalo de profundidade possibilita a construção de uma coluna sedimentar representativa da Província Parnaíba, uma vez que engloba litologias associadas às principais sequências sedimentares da unidade geotectônica definidas por Góes e Feijó (1994): Siluriana, Devoniana, Carbonífero-Triássica, Jurássica e Cretácea. Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta os valores máximos, mínimos e médios das profundidades inicial e final, e por conseguinte, das espessuras das unidades estratigráficas da Província Parnaíba.

As unidades estratigráficas da Província Parnaíba apresentam distintas características hidrogeológicas e variações significativas de espessura sedimentar. A unidade mais profunda corresponde ao Grupo Serra Grande, delimitado superiormente pela Formação Jaicós e inferiormente pela Formação Ipu. Esse grupo apresenta espessura média de 429,67 m e ocorre em profundidades superiores a 1.600 m, condição que restringe economicamente a explotação de águas subterrâneas.

Sobrejacente ao Grupo Serra Grande encontra-se o Grupo Canindé, que abriga os aquíferos Cabeças e Poti, tendo como arcabouço sedimentar as formações homônimas. Segundo Monteiro *et al.* (2012), essas unidades apresentam produtividade hidrogeológica variando de muito alta a alta. A Formação Cabeças possui espessura média de 135,47 m, enquanto a Formação Poti apresenta espessura média de 199,69 m. O Grupo Canindé apresenta espessura média de 791,10 m.

O Grupo Balsas, depositado entre o Carbonífero e o Triássico, reúne aquíferos com produtividade hidrogeológica variável (Monteiro et al., 2012), abrangendo unidades de alta a moderada produtividade, como os aquíferos Piauí e Sambaíba, com espessuras médias de 204,11 m e 174,16 m, respectivamente, até unidades de produtividade geralmente muito baixa, como Motuca e Pedra de Fogo, com espessuras médias de 264,88 m e 178,79 m.

Figura 3 – Profundidade de sondagem dos poços exploratórios na Província Parnaíba e distribuição espacial dos poços tubulares do SIAGAS



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 1 – Cotas inicial e final (máxima, mínima e média) das profundidades das unidades estratigráficas da Província Parnaíba, com suas respectivas espessuras sedimentares

UNIDADE ESTRATIGRÁFICA	PROFUNDIDADE INICIAL (m)			PROFUNDIDADE FINAL (m)			ESPESSURA (m)		
	MÁX	MÍN	MÉD	MÁX	MÍN	MÉD	MÁX	MÍN	MÉD
Grupo Itapecuru	96,00	2,00	7,07	602,00	13,00	110,58	600,00	5,00	103,62
Fm. Codó	602,00	0,00	122,67	784,00	45,00	252,45	237,00	28,00	129,78
Fm. Corda	447,00	3,00	171,46	1011,00	27,00	223,59	777,00	17,00	52,14
Fm. Pastos Bons	504,00	58,00	228,66	560,00	80,00	302,15	405,00	15,00	73,50
Fm. Sambaíba	482,00	80,00	284,51	705,00	147,00	458,67	468,00	63,00	174,16
Fm. Motuca	758,00	3,00	449,65	968,00	6,00	628,44	504,00	3,00	178,79
Fm. P. de Fogo	968,00	3,00	635,68	1294,70	25,00	900,56	463,00	12,00	264,88
Fm. Piauí	1294,0	0,00	856,19	1581,00	20,00	1060,29	286,30	16,00	204,11
Fm. Poti	1624,00	5,00	1035,76	1937,60	1581,00	1235,45	377,00	10,00	199,69
Fm. Longá	1900,00	223,00	1383,96	2075,00	420,00	1494,37	211,00	35,10	110,41
Fm. Cabeças	2109,50	415,00	1535,81	2218,00	487,00	1671,27	212,00	8,00	135,47
Fm. Pimenteiras	2187,00	580,00	1451,06	2561,00	855,00	1707,66	555,00	79,90	256,60
Fm. Itaim	2561,00	855,00	1703,53	2748,00	955,00	1826,86	187,00	80,00	123,33
Fm. Jaicós	2748,00	1100,00	1601,54	2967,00	545,00	1770,83	219,00	56,00	169,29
Fm. Tianguá	2967,00	545,00	1793,03	3114,00	708,00	1917,65	198,00	98,00	124,62
Fm. Ipu	3114,00	1145,00	1943,25	3408,00	1176,00	2031,21	307,00	30,00	87,97

Fonte: Elaboração própria, a partir de perfis de poços exploratórios do Programa REATE (ANP, 2023).

Já o Grupo Mearim, constituído pelas formações Pastos Bons e Corda, abriga aquíferos classificados com produtividade hidrogeológica moderada a baixa (Monteiro et al., 2012). A Formação Pastos Bons, unidade basal do grupo, apresenta espessura média de 73,50 m. Sobreposta a essa unidade, a Formação Corda possui espessura sedimentar média de 52,14 m.

As unidades mais recentes da Província Parnaíba são a Formação Codó e o Grupo Itapecuru, localizadas em menores profundidades. A Formação Codó possui espessura média de 129,78 m. Já o Grupo Itapecuru ocorre predominantemente em níveis rasos, com espessura média de 103,62 m, sendo considerado promissor para explotação de águas subterrâneas, embora apresente produtividade hidrogeológica moderada a geralmente baixa devido à presença de níveis pelíticos (Monteiro *et al*., 2012).

Comparação entre dados de poços tubulares do SIAGAS e de poços exploratórios do REATE no contexto do Grupo Itapecuru

Os resultados que se seguem visam comparar a profundidade inicial, profundidade final e espessura de unidades estratigráficas obtidas a partir dos registros de poços do SIAGAS e o do Programa REATE. Para tanto, foram considerados os intervalos em que os poços interceptam os depósitos sedimentares do Grupo Itapecuru, unidade estratigráfica que apresenta maior dimensão territorial da Província Parnaíba, cerca de 25% do seu domínio, com uma área aflorante de aproximadamente 153.273 km^2 e cujos estratos hospedam o Sistema Aquífero Itapecuru (Silva; Sousa, 2024).

De acordo com Silva e Sousa (2024), dos 375.247 poços tubulares cadastrados no SIAGAS, em 2024, 1.144 interceptam o Grupo Itapecuru. Esses registros apresentaram profundidades iniciais variando entre 0 e 96 m, profundidades finais entre 6 e 606 m e espessuras sedimentares entre 6 e 606 m. Desse total, 1.084 poços (94,7%) possuem filtros instalados predominantemente

no Grupo Itapecuru, evidenciando sua relevância para o abastecimento hídrico, especialmente no Estado do Maranhão.

A distribuição espacial dos poços do SIAGAS (Figura 3) exibe predominância no Pará, com 768 registros (67%), seguido pelo Maranhão, com 370 poços (32%), Tocantins, com 5 registros e Piauí com 1. Já os dados do Programa REATE indicam que 128 (94,81%) dos 135 poços exploratórios estão localizados no Maranhão, unidade federativa onde está localizado o depocentro da Província Parnaíba; interceptado pelos lineamentos Picos–Santa Inês e Marajó–Parnaíba, além de concentrar 12 campos de produção de gás natural operados pela Eneva S.A.

Dos 135 registros do REATE, 97 poços exploratórios interceptam integralmente o Grupo Itapecuru, apresentando profundidades iniciais entre 2 e 96 m, profundidades finais entre 13 e 602 m e espessuras sedimentares entre 5 e 600 m. Comparativamente aos dados do SIAGAS (Tabela 2), as maiores divergências ocorreram nas profundidades finais, com diferenças absolutas entre 4 e 7 m, principalmente próximas ao contato com a Formação Codó.

A divergência entre as medições pode ser associada às técnicas de perfuração adotadas pelo Programa REATE e pelo SIAGAS. Os poços exploratórios são perfurados utilizando métodos geofísicos avançados, baseados em raios gama, resistividade elétrica, sônico e porosidade, o que possibilita uma delimitação mais precisa das unidades sedimentares. Já os poços tubulares de águas subterrâneas são perfurados com técnicas com menor rigor de precisão, resultando em registros menos detalhados. Além disso, a profundidade final desses poços pode ser influenciada por aspectos de viabilidade econômica, impactando diretamente sua execução.

As profundidades iniciais apresentaram menor discrepância entre os bancos de dados devido ao fato de o Grupo Itapecuru constituir a principal unidade aflorante na Bacia do Grajaú. A principal exceção observada foi no poço exploratório 1-BJST-1-MA, localizado em Bom Jardim/MA, onde o Grupo Itapecuru ocorre abaixo de depósitos de praia e aluviões com espessura de 92 m.

Tabela 2 – Comparativo entre profundidades (inicial e final) e espessura sedimentar do Grupo Itapecuru obtidas em poços tubulares do SIAGAS e poços exploratórios do Programa REATE

GRUPO ITAPECURU	PROFUNIDADE INICIAL (m)		PROFUNDIADE FINAL (m)		ESPESSURA SEDIMENTAR (m)	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
Poços tubulares SIAGAS	0,00	96,00	6,00	606,00	6,00	606,00
Poços exploratórios Programa REATE	2,00	96,00	13,00	602,00	5,00	600,00
Diferença	2,00	0,00	7,00	4,00	1,0	6,00

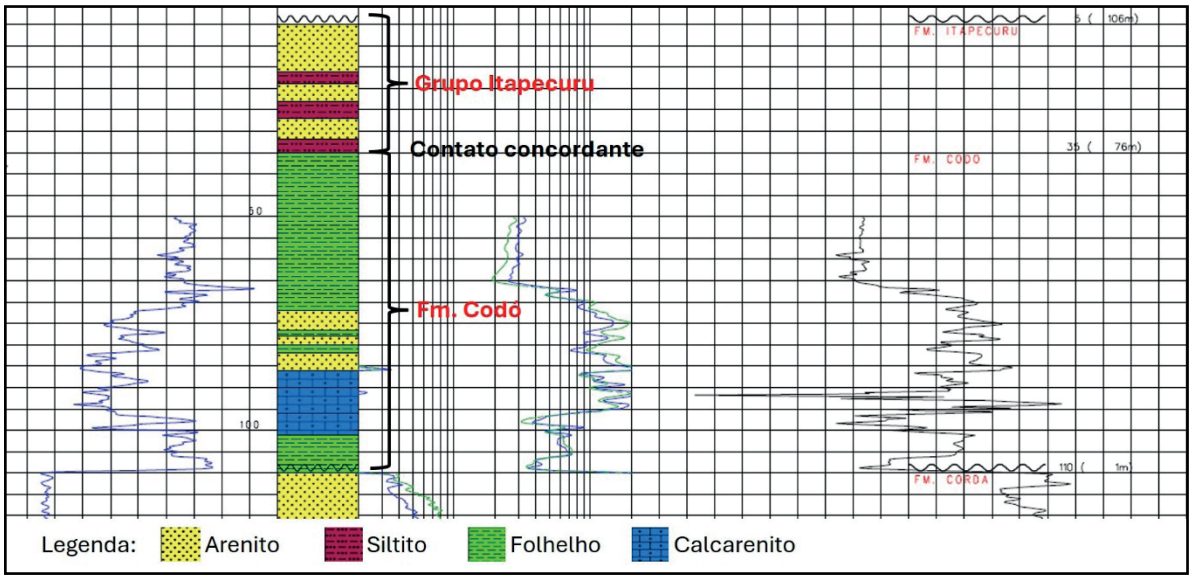
Fonte: Elaboração própria.

A diferença observada nas profundidades finais dos poços pode ser atribuída a diversos motivos, entre eles, o propósito da perfuração: os poços exploratórios têm como principal objetivo a caracterização geológica das seções perfuradas, resultando em perfis estratigráficos mais detalhados e que alcançam maiores profundidades, para fins de avaliação de potenciais reservatórios de hidrocarbonetos. Já os poços destinados à explotação de água, são geralmente mais rasos e com menor detalhamento geológico.

Ainda, em relação às profundidades finais, verificou-se que o contato entre o Grupo Itapecuru e a Formação Codó, subjacente, é concordante nos poços exploratórios, sendo

marcado pela transição entre sequências de arenito, siltito e argilito do Grupo Itapecuru para níveis de arenito, folhelho, calcarenito, calcário, anidrita, gipsita e marga da Formação Codó, conforme exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Seção do poço exploratório 2-CP-1-MA, em Capinzal do Norte/MA, exibindo transição concordante entre o Grupo Itapecuru, marcada por níveis de arenito e siltito, e a Formação Codó, subjacente, representada preferencialmente por folhelho, arenito e calcarenito



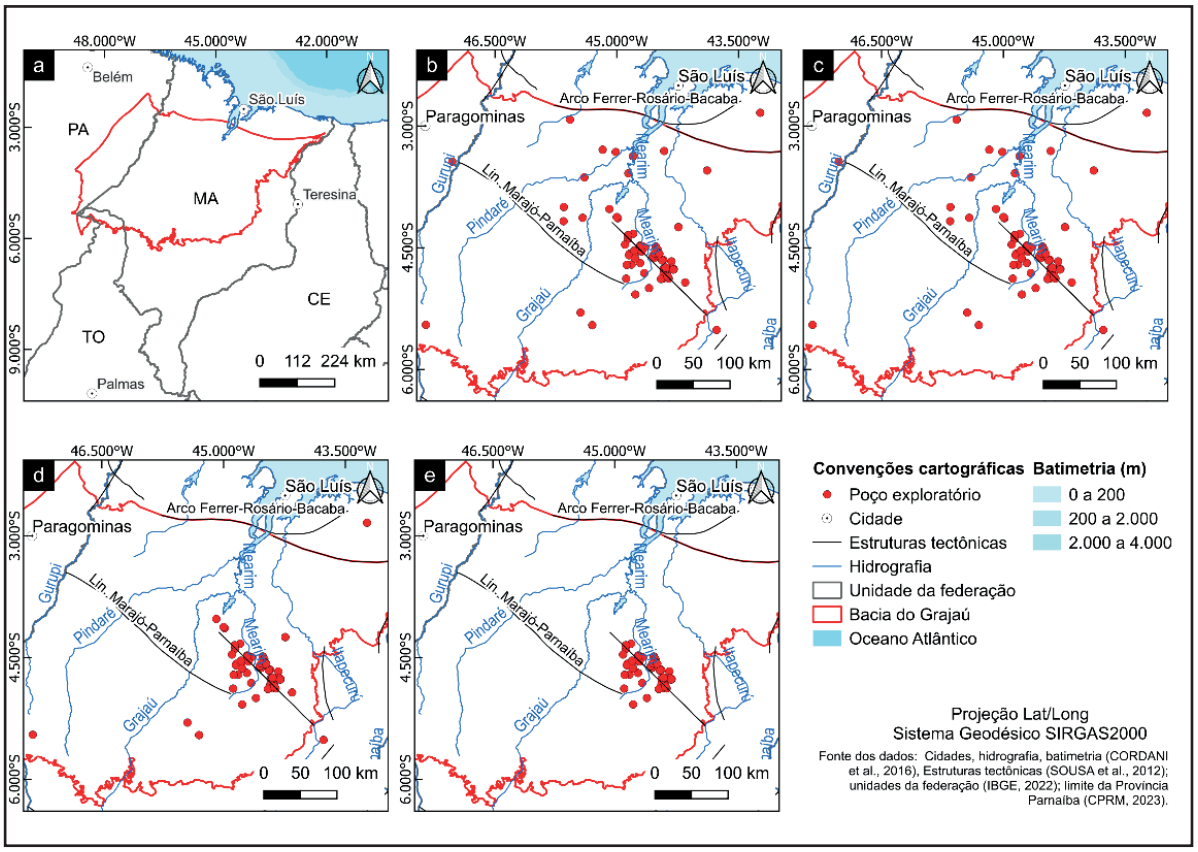
Fonte: Adaptado de Programa REATE (ANP, 2023).

A preparação dos poços exploratórios para aplicação da krigagem ordinária implicou, inicialmente, na limpeza dos registros. O conjunto inicial de dados era composto por 97 poços que interceptavam o Grupo Itapecuru no domínio da Bacia do Grajaú (Figura 5a-b). Após a remoção de registros duplicados quanto à localização espacial, mantendo-se apenas os poços mais profundos, o total foi reduzido para 92 registros (Figura 5c).

Em seguida, foram removidos os valores discrepantes (outliers), considerando-se como critério registros situados fora do intervalo de $^{\pm}1$ desvio padrão em relação à média, visando minimizar distorções na interpolação por krigagem ordinária, restando 80 poços (Figura 5d). Posteriormente, excluíram-se os registros mais distantes do aglomerado principal, resultando em 67 poços utilizados na análise final (Figura 5e).

A Figura 6 ilustra os dados raster resultantes da interpolação por krigagem ordinária aplicada aos registros de poços exploratórios, cujos parâmetros do variograma experimental foram: campo geométrico de 41 km, considerando que a maior distância entre dois poços foi de 82 km; passo da variância espacial entre pares de amostra de 5 km; tolerância do passo de $^{\pm}$ 2,5 km, para mais e para menos; número de passos de 8, obtido mediante a razão entre o campo geométrico (41 km) e o passo (5 km); alcance ou range de 13 km; efeito pepita de 250; e patamar ou Sill de 860. Os dados do variograma experimental obtido foram ajustados variograma teórico do modelo gaussiano.

Figura 5 – Análise exploratória dos poços exploratórios do Programa REATE: a) localização da Bacia Sedimentar do Grajaú; b) 97 poços que interceptam o Grupo Itapecuru; c) 92 poços exploratórios, excluídas as duplicatas; d) 80 poços exploratórios, excluídos os *outliers*; e) 67 poços exploratórios, excluídos os poços com distância entre si maior que 82 km



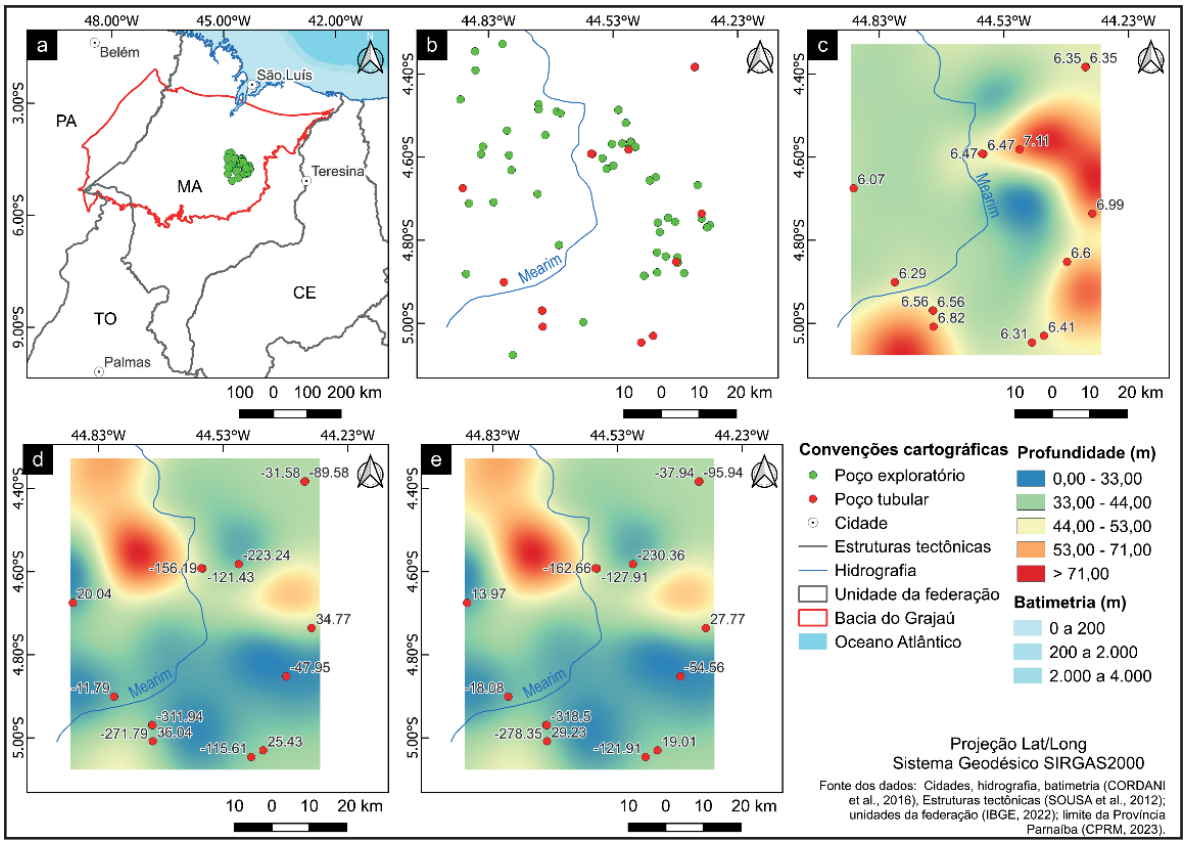
Fonte: Elaboração própria.

A partir desses parâmetros, foram obtidos os dados regionalizados de profundidade inicial (Figura 6c), profundidade final (Figura 6d) e espessura sedimentar (Figura 6e). Os valores regionalizados, presentes nos dados raster mencionados, foram confrontados com os valores observados em 14 poços tubulares do SIAGAS (Figura 6c, 6d, 6e). Nessa operação, considerando que as profundidades entre unidades estratigráficas nos poços exploratórios são determinadas por diferentes técnicas geofísicas, os valores obtidos por meio da regionalização dos poços exploratórios foram considerados como valores de referência.

Considerando que os poços exploratórios são totalmente penetrantes nos depósitos do Grupo Itapecuru, espera-se que a diferença entre as profundidades finais observadas nos poços exploratórios e nos poços do SIAGAS resulte em: a) valores positivos, indicando que a profundidade registrada no SIAGAS é coerente com a base do Grupo Itapecuru; e b) valores negativos, sugerindo que a profundidade registrada no SIAGAS é incoerente, por não atingir a base da unidade geológica. Com base nessa análise, verificou-se que, dos 14 poços tubulares do SIAGAS avaliados, 10 (72%) apresentaram profundidades finais incoerentes, enquanto 4 (28%) apresentaram valores compatíveis com a regionalização obtida a partir dos poços exploratórios.

Nos casos de incoerência, os resultados podem estar associados à inclusão indevida de formações subjacentes, como Codó e Corda, no intervalo atribuído ao Grupo Itapecuru; à baixa resolução estratigráfica dos poços do SIAGAS, geralmente baseada apenas em descrições visuais; e a erros de preenchimento ou padronização cadastral, não sendo descartadas inconsistências interpretativas ou erros humanos relacionados aos contatos entre unidades estratigráficas.

Figura 6 – Dados raster resultantes da regionalização por krigagem ordinária: a) localização dos dados no Estado do Maranhão; b) espacialização dos poços exploratórios e tubulares; c) comparação da profundidade inicial; d) comparação da profundidade final; e) comparação da espessura da camada sedimentar



Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, apesar da importância dos registros do SIAGAS, como fonte primária de dados para os estudos hidrogeológicos, limitações na confiabilidade dos parâmetros nele observados reforçam a necessidade de análises críticas e complementações a partir de outras abordagens, como perfis geofísicos e uso de dados de poços exploratórios.

Dos 93 poços analisados no âmbito do Programa REATE, 87 apresentaram informações detalhadas sobre a litologia do Grupo Itapecuru. A análise desses registros evidenciou sequências intercaladas de materiais arenosos e pelíticos. As porções aquíferas são constituídas principalmente por areias e arenitos, enquanto os aquitardos são representados por argilitos, siltitos, folhelhos e, ocasionalmente, calcarenitos.

Os registros de espessura de aquíferos e aquitardos obtidos a partir dos poços exploratórios foram comparados àqueles provenientes de poços tubulares. Para essa análise comparativa, utilizaram-se os 14 poços tubulares do SIAGAS situados na área da regionalização obtida com base nos poços exploratórios do Programa REATE. Em relação aos poços exploratórios, foram utilizados 65 registros.

Quando analisados os poços exploratórios, verificou-se que as camadas aquíferas do Grupo Itapecuru apresentaram espessura média de 26,55 m, variando entre 0,97 m e 85,88 m. Já os aquitardos exibiram espessura média de 22,06 m, com valores mínimo e máximo de 1,86 m e 62,83 m, respectivamente. Em comparação aos dados do SIAGAS (Tabela 3), observou-se discrepância significativa, uma vez que as espessuras médias registradas para as camadas aquíferas e aquitardos foram de 39,50 m e 73,86 m, respectivamente.

Tabela 3 – Comparação das espessuras das camadas aquíferas e de aquitardos do Grupo Itapecuru obtidas a partir de poços tubulares do SIAGAS e poços exploratórios do Programa REATE

GRUPO ITAPECURU	ESPESSURA DO AQUÍFERO (m)			ESPESSURA DO AQUITARDO (m)		
	MÍNIMA	MÁXIMA	MÉDIA	MÍNIMA	MÁXIMA	MÉDIA
Poços tubulares SIAGAS	3,00	156,00	39,50	9,00	220,00	73,86
Poços exploratórios Programa REATE	0,97	85,88	26,55	1,86	62,83	22,06
Diferença	2,03	73,12	12,95	7,14	157,17	51,80

Fonte: Elaboração própria.

Essas divergências podem ser atribuídas, em grande parte, à precisão das técnicas de perfuração e à metodologia empregada na caracterização litológica das camadas. Como discutido anteriormente, os dados provenientes do SIAGAS exibem baixa resolução na definição dos limites litológicos, uma vez que são baseados na experiência do geólogo ou profissional habilitado, a partir de informações visuais e táteis dos materiais geológicos, à medida que a perfuração avança, gerando, por vezes, imprecisões nos limites registrados. Já nos poços exploratórios, os limites dos horizontes procedem da integração de várias técnicas como: raios gama, eletrorresistividade, perfis sônicos, entre outros, eliminando, portanto, o subjetivismo, na definição dos limites entre unidades.

No que se refere à composição litológica das camadas aquíferas, predominaram arenito (42,52%), seguido por areia/arenito (33,33%) e areia (24,13%). Quanto aos aquitardos, identificaram-se intercalações de camadas pelíticas, configurando várias seções confinantes em um mesmo poço. Elas são compostas, principalmente, por siltito (59,77%), argilito (47,12%), folhelho (43,67%), seguidos, em menor percentual, por intercalações de folhelho/siltito (28,73%), argilito/siltito (8,04%), argilito/folhelho (5,74%), calcarenito (2,29%).

As espessuras das camadas aquíferas não são tão espessas quando comparadas às dos aquitardos, fato que pode ser atribuído ao ambiente de sedimentação característico das formações do período Cretáceo. Esse contexto deposicional esteve associado a ambientes marinho raso, lacustre de flúvio-deltaico, em especial aos depósitos sedimentares do Grupo Itapecuru, correspondente a seis ciclos deposicionais atribuídos a sistemas de vales estuarinos incisos (Rossetti, 2001). Nesse cenário, houve predominância de depósitos pelíticos (argilas, folhelhos e siltitos), corroborando para a baixa vocação hidrogeológica do Sistema Aquífero Itapecuru, conforme relatado por Leal (1997); Monteiro et al. (2012) e Diniz et al. (2014).

CONCLUSÕES

A Província Parnaíba constitui um importante domínio sedimentar brasileiro, caracterizado por grandes espessuras deposicionais e pela ocorrência de aquíferos estratégicos para o abastecimento hídrico. Entre essas unidades, o Grupo Itapecuru destaca-se pela relevância hidrogeológica e operacional, especialmente no Estado do Maranhão. A análise comparativa entre os dados do SIAGAS e do Programa REATE evidenciou diferenças significativas nas profundidades finais e espessuras sedimentares dessa unidade, demonstrando maior precisão estratigráfica nos poços exploratórios do REATE devido ao emprego de técnicas geofísicas avançadas, enquanto os registros do SIAGAS apresentaram limitações relacionadas à baixa resolução litológica e inconsistências cadastrais.

As divergências observadas nas espessuras das camadas aquíferas e aquitardos indicam que o uso isolado de bancos de dados de poços tubulares pode comprometer a confiabilidade das interpretações hidrogeológicas. Nesse contexto, a integração entre os dados do SIAGAS e os levantamentos de maior resolução do Programa REATE mostra-se fundamental para a obtenção de informações mais consistentes sobre profundidade, espessura e composição das unidades estratigráficas. Além disso, a predominância de arenitos intercalados com níveis pelíticos no Grupo Itapecuru evidencia a heterogeneidade do sistema aquífero, aspecto que influencia diretamente o armazenamento e a circulação das águas subterrâneas, reforçando a importância de estudos detalhados para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos no Maranhão.

AGRADECIMENTOS

À Fundação **de Amparo à Pesquisa** e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão pela concessão da bolsa de iniciação científica e a Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Acervo de dados: dados de poços**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/acervo-de-dados. Acesso em: 13 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Acesso aos dados técnicos: disponibilização gratuita de dados técnicos públicos terrestres**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/acesso-aos-dados-tecnicos. Acesso em: 13 maio 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Moção n° 38, de 7 de dezembro de 2006**. **Recomenda a adoção do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) pelos órgãos gestores e usuários de informações hidrogeológicas**. Brasília, DF: CNRH, 2006. Disponível em: https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/pdf/Mocao_038_CNRH.pdf. Acesso em: 29 maio 2024.

CORDANI, U. G. et al. **Mapa tectônico da América do Sul**. CGMW-CPRM-SEFEMAR, 2016. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16750. Acesso em: 15 nov. 2024.

CRUZ, E. M. **Análise estratigráfica da sequência siluriana da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/items/3f7364dc-2bd0-43f0-b77c-785af5065dd8. Acesso em: 15 nov. 2024.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. de C. da; PAULA, T. L. F. de. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: instruções técnicas**. Brasília: CPRM, 2014. 46 p. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html. Acesso em: 15 nov. 2024.

GÓES, A. M. **A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba**. 1995. 171 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/000743793. Acesso em: 15 nov. 2024.

GÓES, A. M.; FEIJÓ, F. J. **Bacia do Parnaíba**. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, n. 1, p. 57-67, 1994. Disponível em: https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/581. Acesso em: 15 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Portal de mapas do IBGE: malha de unidades da federação 2022 (shp)**. Disponível em: https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa223826. Acesso em: 15 nov. 2024.

LEAL, O. **Inventário hidrogeológico básico no Nordeste: folha 4 – São Luís/SE**. Recife: SUDENE, 1997.

MONTEIRO, A. B.; CORREIA FILHO, F. L.; DINIZ, J. A. O. **Recursos hídricos subterrâneos do Estado do Maranhão**. 2012. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27781/18016. Acesso em: 15 nov. 2024.

PICCO, G. de M. **Interpretação da distribuição de corpos sedimentares na Bacia do Parnaíba (Andar Alagoas)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

REBOUÇAS, A. da C. **Importância da água subterrânea**. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 13-29.

ROSSETTI, D. de F. **Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú**. *In*: ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. *O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-44.

SANTOS, G. O. R. **Avaliação do potencial da Formação Pimenteiras para reservatórios não convencionais do tipo shale gas no poço 1-OGX-101-MA, área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Geoportal SGB: bacias sedimentares brasileiras**. Disponível em: https://geoportal.sgb.gov.br/. Acesso em: 21 nov. 2024.

SILVA, A. J. P. da; LOPES, R. da C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. **Bacias sedimentares paleozóicas e meso-cenozóicas interiores**. *In*: BIZZI, L. A.; SCHOBBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, F. H. (org.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM, 2003. p. 55-85. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/didote/pdf/geologia_tectonica.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

SILVA, K. A. P. **Interpretação e correlação de dados de poços e linhas sísmicas 2D da Bacia do Parnaíba – Estado do Maranhão**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SILVA, R. P.; SOUSA, C. J. da S. de. **Caracterização do aquífero Itapecuru na Província Hidrogeológica do Parnaíba: aspectos geológicos, dimensionais e hidráulicos**. *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – SEMIC, 36., 2024, São Luís. *Livro de resumos* [...]. São Luís: Editora UEMA, 2024. p. 1911-1913. Disponível em: https://www.

ppg.uema.br/wp-content/uploads/2025/02/LIVRO-DE-RESUMOS-SEMIC-2024-_.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

SOUSA, C. S.; KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; LOPES, E. C. S.; TEIXEIRA, S. G.; OLIVEIRA, J. K. M.; MOURA, E. M.; LEÃO, M. H. B. **Mapa geológico e recursos minerais do Estado do Maranhão**. *In*: KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. (org.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Maranhão: sistema de informações geográficas – SIG, escala 1:750.000*. Belém: CPRM, 2012.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.