

Aspectos ambientais e interações com aquíferos

José Luiz Albuquerque Filho (IPT) e Sibeles Ezaki (IPA)

1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Conceitos básicos relativos a aspectos ambientais e impactos ambientais

- **Aspectos** ambientais e **Impactos** ambientais compreendem relações de causa e efeito
- **Aspectos** se referem às atividades do empreendimento que podem causar **impactos**
- Distinção dos **aspectos** requer conhecimento dos **processos industriais** envolvidos em cada modelo: Carbon Capture and Storage (CCS); Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS); BioEnergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)
- A depender do modelo e processos considerados, os **aspectos** podem variar e, por consequência, os **impactos**:
 - **Processos produtivos** na planta industrial > Modo de captura do CO₂ > Contenção provisória
 - **Armazenamento** exclusivo *in situ* > Compartilhamento com outras plantas
 - **Logística** para injeção do CO₂: diretamente no local > Dutos > Transporte por veículos

1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

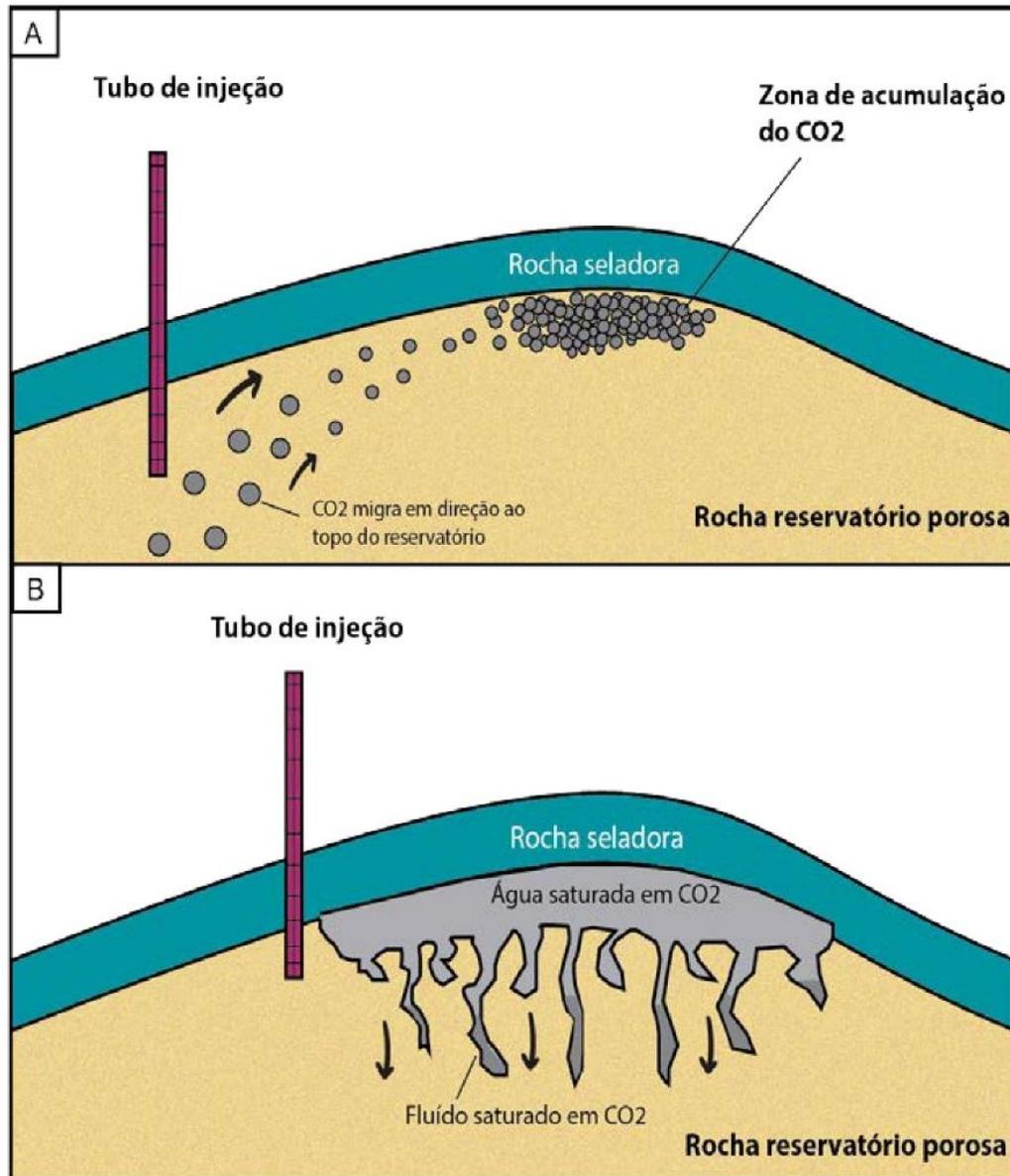
Aspecto ambiental considerado: *Armazenamento de CO₂*

- As discussões a seguir se limitam ao **aspecto armazenamento** de CO₂ em profundidade no subsolo, tendo em vista os potenciais efeitos a aquíferos no Estado de São Paulo.
- Alguns pressupostos:
 - **Armazenamento** com características comuns a diferentes modelos;
 - **Avaliação de impactos** tendo como base a modelagem desses efeitos e a análise de prováveis consequências à extração, tratamento e uso da água subterrânea (disponibilidade e qualidade); e
 - **Monitoramento e mitigação dos impactos** devem ser formulados no contexto da avaliação específica, caso a caso, sendo aqui abordados apenas de modo genérico.

2. ARMAZENAMENTO DE CO₂ E EFEITOS NOS AQUÍFEROS

- Tipos de armazenamento de CO₂ em rochas reservatório;
- Efeitos da Injeção do CO₂; e
- Aspectos necessários relacionados aos tipos de monitoramento.

Tipos de Armazenamento de CO₂ em rochas reservatório



A - Armazenamento estrutural

O CO₂ tende a migrar através da rocha reservatório para a superfície, devido a impulsão causada pela sua diferença de densidade em relação aos outros fluidos do reservatório.

O CO₂ acumulará em estrutura de aprisionamento (trap) constituída pela rocha seladora (Ex.: basaltos; outros tipos)

B - Armazenamento por solubilidade

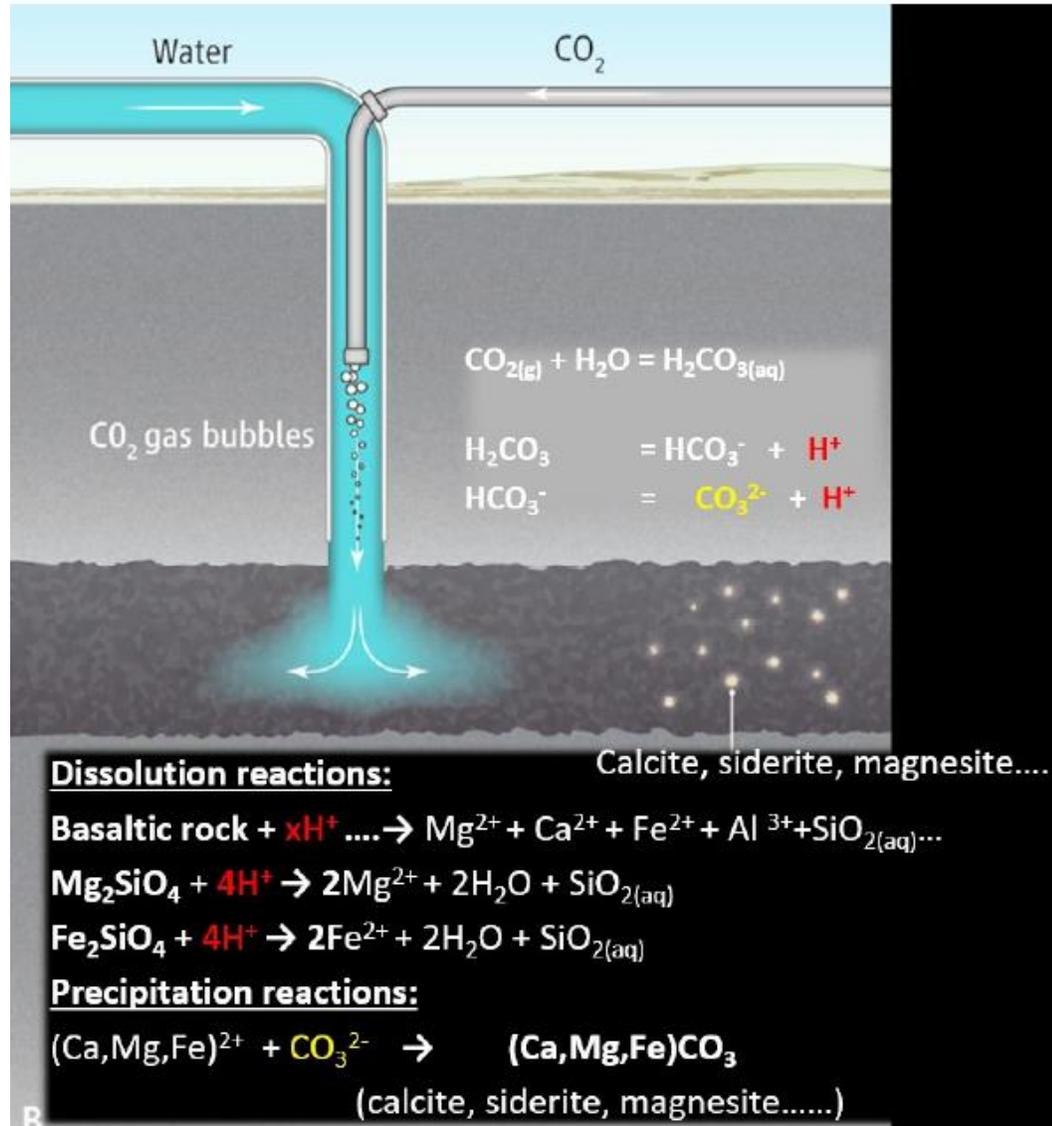
Dissolução do CO₂, em sua forma supercrítica ou gasosa, na água intersticial do reservatório, formando uma salmoura densa.

Com o passar do tempo, a salmoura saturada em CO₂ torna-se mais densa que os fluídos ao seu redor, rumando de forma descendente para as porções inferiores do reservatório.

(Orita & Cruz 2022)

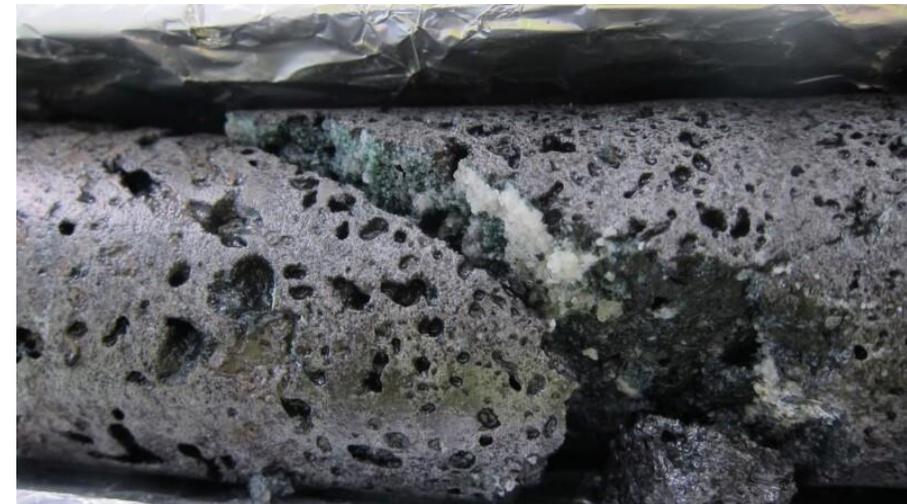
Tipos de Armazenamento de CO₂ em rochas reservatório

C



C – Armazenamento por mineralização em basaltos (pelo método carbonatação) implica na injeção de fluidos ricos em CO₂ e dissolução de fase sólida para liberação de cátions (rochas ricas em Ca²⁺, Fe²⁺ e Mg²⁺) e precipitação de carbonatos

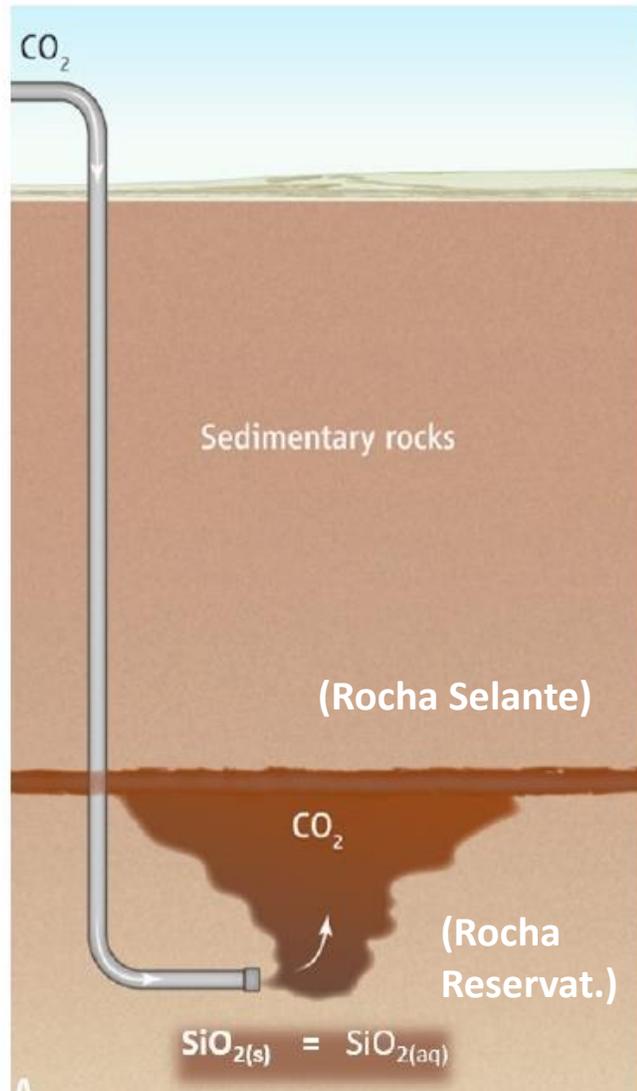
Testemunho de sondagem ilustrando o preenchimento com mineralização



<https://jpt.spe.org/twa/new-technology-accelerates-mineral-trapping-of-carbon-dioxide>
(Voight 2022)

(Gíslason & Oaklers 2014; Gíslason *et al.* 2018)

Tipos de Armazenamento de CO₂ em rochas reservatório



C – Armazenamento por mineralização em rochas sedimentares

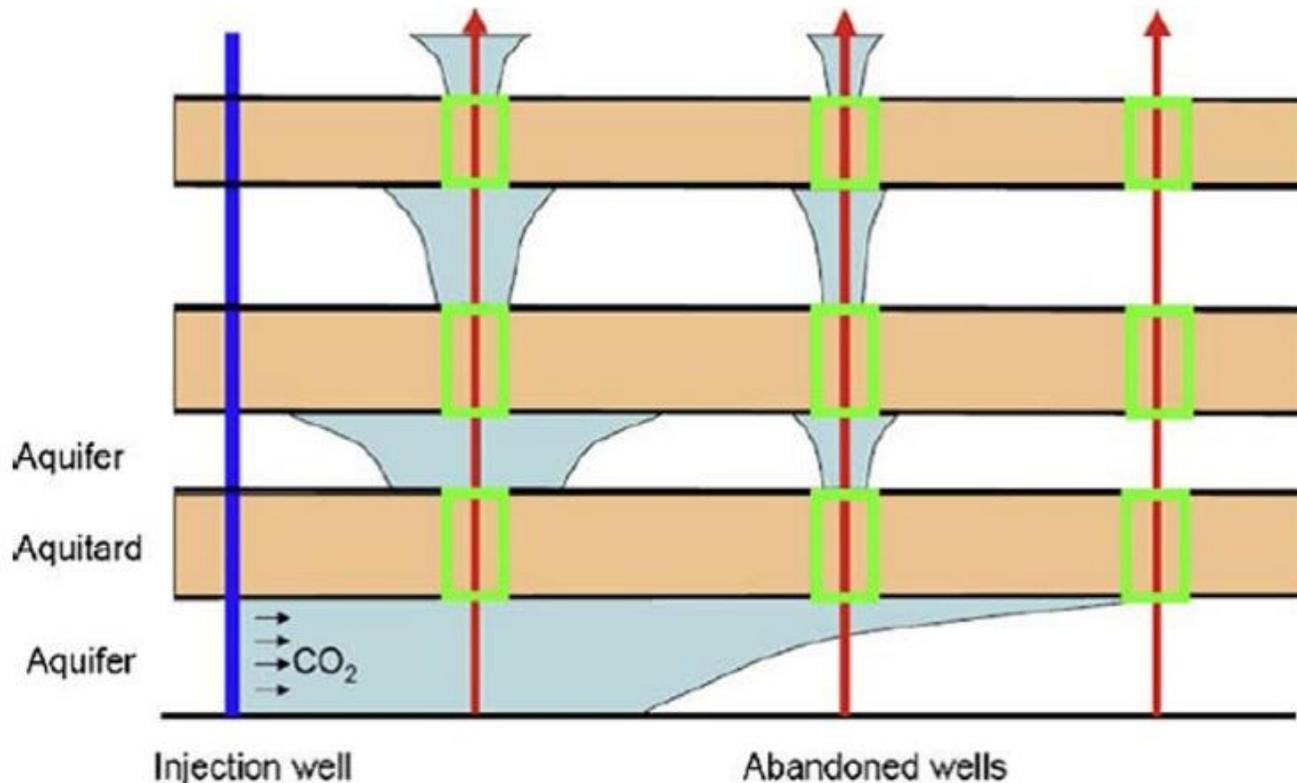
- CO₂ dissolvidos reagem formando minerais de carbonato estáveis (*trapping mineral*);
- Minerais pouco reativos, predominantemente quartzosos; e
- Processo leva milhares de anos.

(Gíslason & Oaklers 2014; Gíslason *et al* 2018)

▪ Efeitos da Injeção do CO₂ nas rochas reservatório e adjacências

- **Diminuição da porosidade e da permeabilidade** no poço de injeção;
- **Migração espacial do CO₂ para água subterrânea:** movimento da pluma de CO₂ injetada e extensões alcançadas devem ser verificado a partir do poço de injeção;
- **Vazamento de fluidos para fora da rocha-reservatório**, nas seguintes possibilidades:
 - a) através de formação de rocha selante com baixa permeabilidade;
 - b) pelo poço de injeção;
 - c) zonas de alta permeabilidade (falhas ou fraturas condutivas e poços existentes);
- **Aumento nas concentrações iônicas nas águas** (1,5 a 3 ordens de magnitudes – Ex: Columbia Basalt River, EUA) e de STD (Sólidos Totais Dissolvidos); e
- **Risco de alteração da qualidade da água** em aquíferos sobrejacentes.

▪ Efeitos da Injeção do CO₂ e migração



(Celia et al. 2011, Celia et al. 2015)

Aquitarde = unidade de baixa permeabilidade, que armazena água e pode transmitir água lentamente de um aquífero a outro

Aquiclude = unidade impermeável que não transmite água

- **Vazamento de CO₂** para fora da formação de injeção;
- **Contaminação de recursos hídricos** subterrâneos em formações mais rasas (aquíferos mais rasos) como decorrência da migração de fluidos das rochas reservatórios ou através dos selantes;
- **Risco de vazamento** devido a deficiências construtivas nos poços de injeção, ocasionando migração de CO₂ para fora da área de injeção; e
- **Observação:** nos EUA e Europa existe a preocupação com a proteção dos mananciais subterrâneos adjacentes às áreas de injeção e armazenamento.

(Diretiva EU 2009; EPA 2010, 2013)

▪ Efeitos a serem considerados em relação à planta de injeção de CO₂

Controle da operação de injeção e armazenamento

- Análise de qualidade das águas pré e pós-injeção de CO₂;
- Modelagem numérica das condições hidrogeológicas do reservatório pré e pós injeção: controle do movimento da pluma de CO₂, % da porosidade ocupada; % de CO₂ injetado que foi mineralizado;
- Testemunhos de sondagem: verificação da presença de nódulos (de anquerita) em poros e fraturas pós-injeção;
- Uso de marcadores isotópicos para monitorar mineralização do CO₂; e
- Levantamentos sísmicos de superfície também ajudam a rastrear a pluma de CO₂.

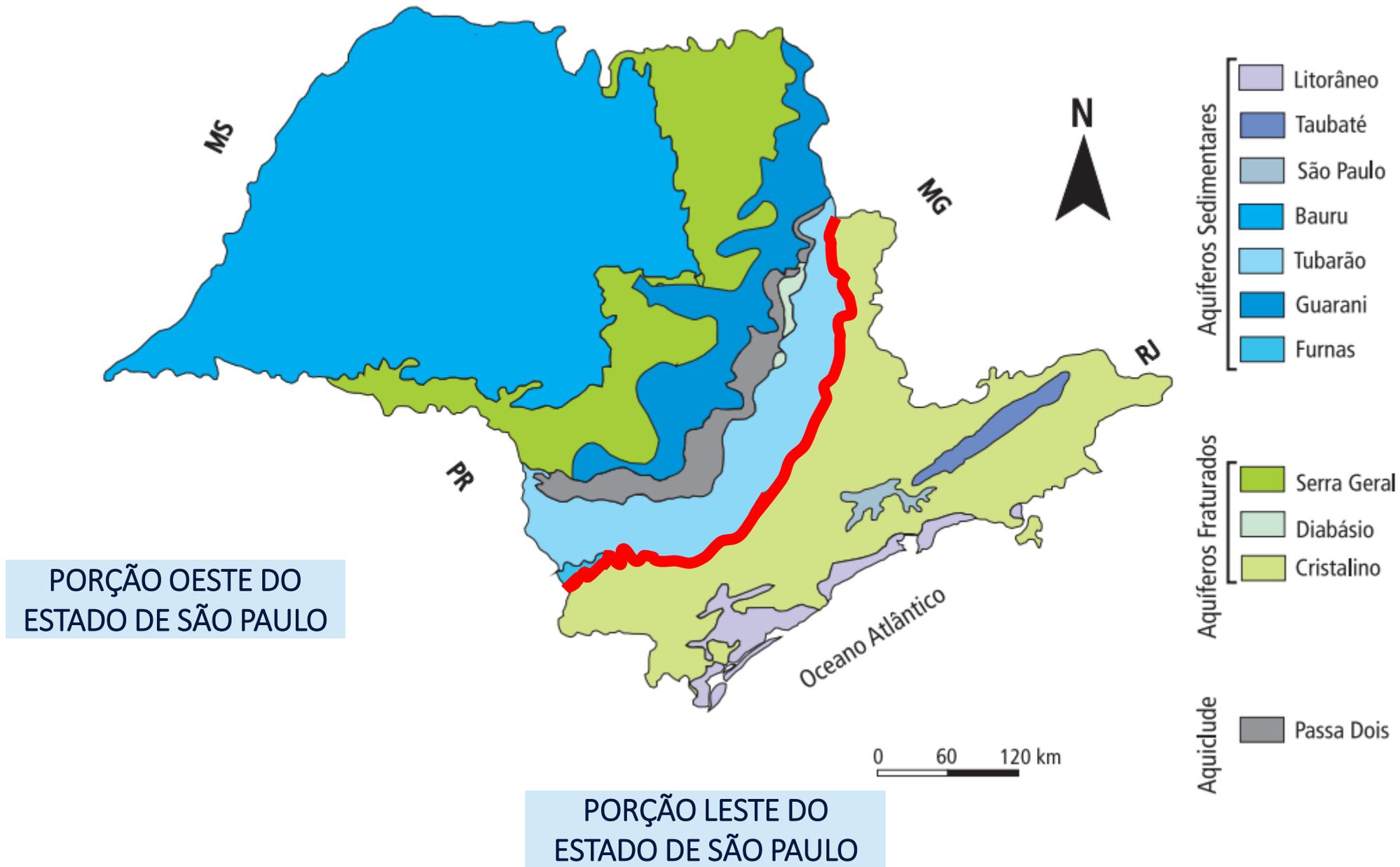
▪ Efeitos a serem considerados no Monitoramento

Avaliação dos efeitos da injeção de CO₂ nas águas subterrâneas

- Definição de um plano de monitoramento;
- Análise de qualidade das águas do(s) aquífero(s) pré e pós-injeção de CO₂ na rocha reservatório;
- Modelamento geoquímico da interação entre os fluidos injetados, as águas do aquífero e as rochas (máficas/ultramáficas, sedimentares) para cada caso específico; e
- Modelagem numérica das condições hidrogeológicas dos aquíferos pré e pós injeção: controle do movimento da pluma de CO₂.

3. CONHECIMENTO HIDROGEOLÓGICO GERAL: O QUE SE PODE OBSERVAR QUANTO AO ESTADO DE SÃO PAULO

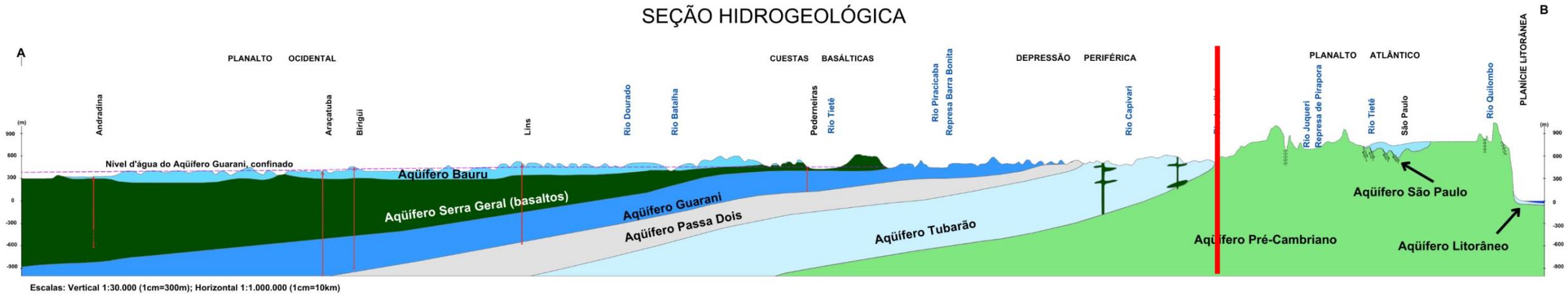
- Os aquíferos e a sua distribuição geográfica;
- Arquitetura das camadas formadoras dos aquíferos;
- Importância do potencial produtivo dos sistemas aquíferos (Mapa de Águas Subterrâneas);
- Caracterização hidrodinâmica, hidroquímica e produtividade dos aquíferos; e
- Importância das águas subterrâneas para o abastecimento público dos municípios paulistas.



(Iritani & Ezaki 2012)

PORÇÃO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

SEÇÃO HIDROGEOLÓGICA

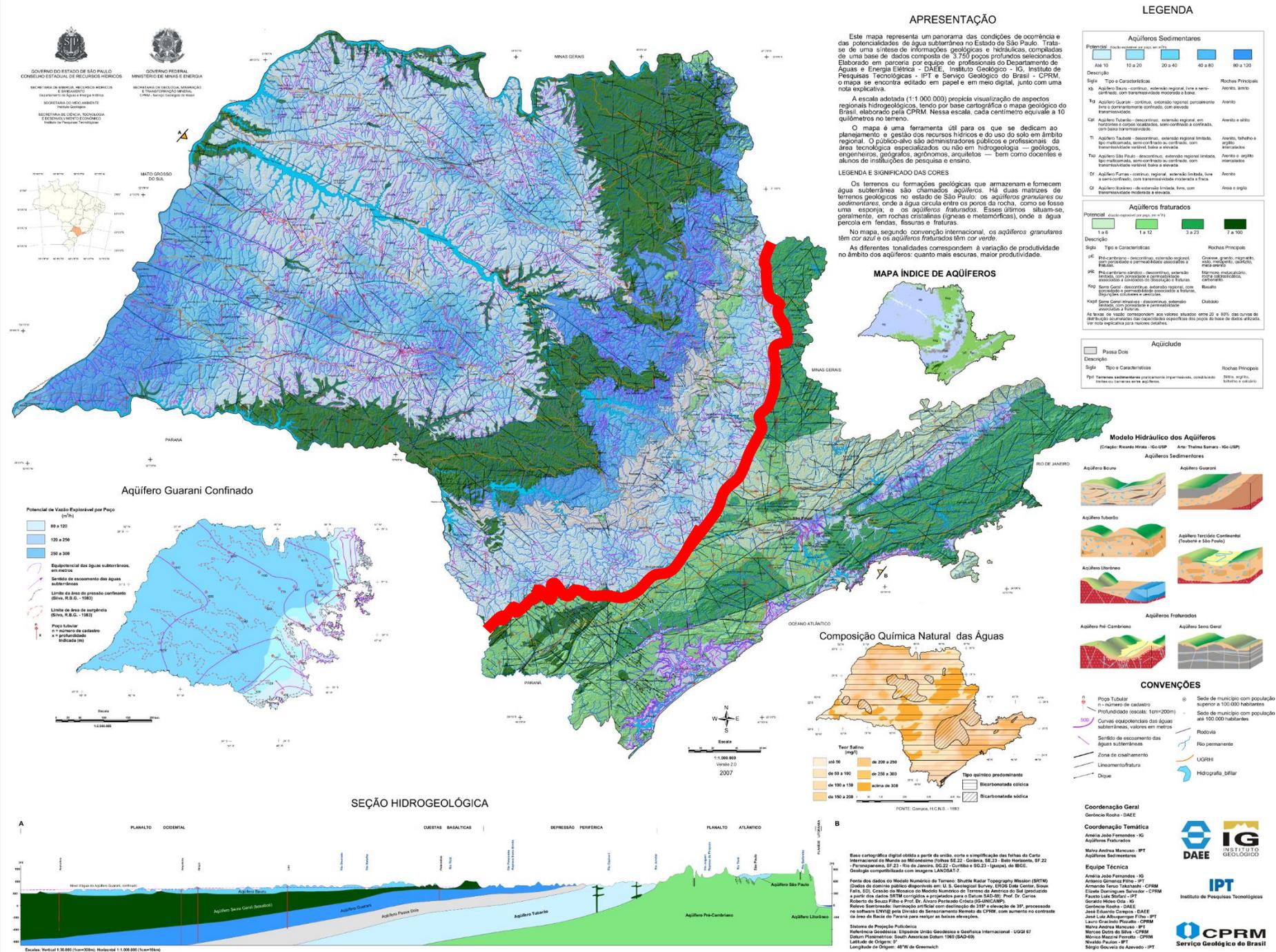


PORÇÃO LESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

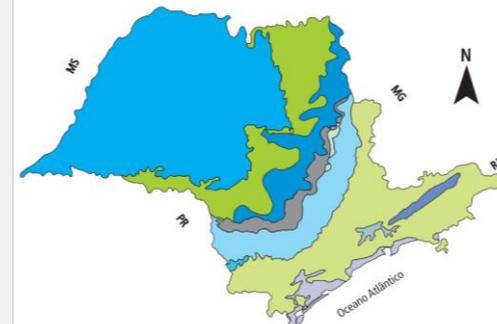
(DAEE, IG/SMA, IPT, CPRM 2005)

MAPA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

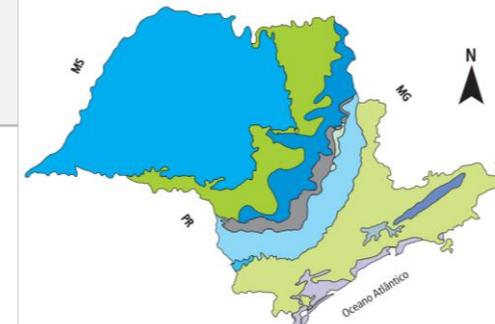
(DAEE, IG/SMA, IPT, CPRM 2005)



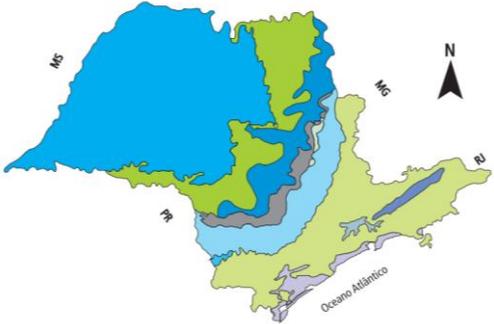
Sistema Aquífero	Unidade Hidroestati-gráfica	Classificação das água	Tipo de ocorrência	Cond. Hidráulica (K)	Capacidade Específica (Q/s)	Vazão Explorável (Q)
Cenozóico	Litorâneo	Na-HCO ₃ Ca-Cl intrusão salina	De extensão limitada, livre, com transmissividade moderada a elevada.	0,001 – 01 m/dia	0,01 a 3,32 m ³ /h/m	< 10 a 20 m ³ /h
	São Paulo	Na-HCO ₃ bicarbonatadas mistas	Descontínuo, extensão regional limitada, tipo multicamada, semi-confinado ou confinado, com transmissividade variável, baixa a elevada.	---	---	< 10 a 40 m ³ /h
	Taubaté	Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃ ou mistas	Descontínuo, extensão regional limitada, tipo multicamada, semi-confinado ou confinado, com transmissividade variável, baixa a elevada.	0,01 a 4,66 m/d, com valores superiores a 1,00 m/d na região de Lorena e acima de 3,00 m/d no eixo das cidades de Jacareí, São José dos Campos e Caçapava.	0,02 a 14 m ³ /h/m	< 10 a 120 m ³ /h



Sistema Aquífero	Unidade Hidroestati-gráfica	Classificação das águas	Tipo de ocorrência	Cond. Hidráulica (K)	Capacidade Específica (Q/s)	Vazão Explorável (Q)
Bauru	Grupo Bauru Grupo Caiuá	Ca-HCO ₃ Ca-Mg-HCO ₃ Na-HCO ₃	Contínuo, extensão regional, livre a semi-confinado, transmissividade moderada a baixa.	0,002 m/dia a 3,66 m/dia	0,022 a 4,9 m ³ /h/m	10 a 120 m ³ /h
Paraná	Furnas	Na-HCO ₃	Contínuo, regional, extensão limitada, Livre a semi-confinado, transmissividade moderada a fraca.		0,035 m ³ /h/m	até 10 m ³ /h
Guarani	Botucatu Aflorante (livre) Botucatu Confinado	Ca-HCO ₃ Na-HCO ₃ Na-Cl-SO ₄	Contínuo, extensão regional, parcialmente livre e predominantemente confinado, elevada transmissividade.	Valores médios de K Área Confinada: 2,6 m/dia Área Livre: 3,0 m/dia	---	20 a 360 m ³ /h
Tubarão	Grupo Itararé Grupo Guatá	salinas, Na-HCO ₃ e Ca-HCO ₃ mistas Sulfatadas	Descontínuo, extensão regional, em horizontes e corpos localizados, semi-confinado a confinado, baixa transmissividade.	0,002 – 0,7 m/dia	0,002 a 4,67 m ³ /h/m	< 1 a 40 m ³ /h

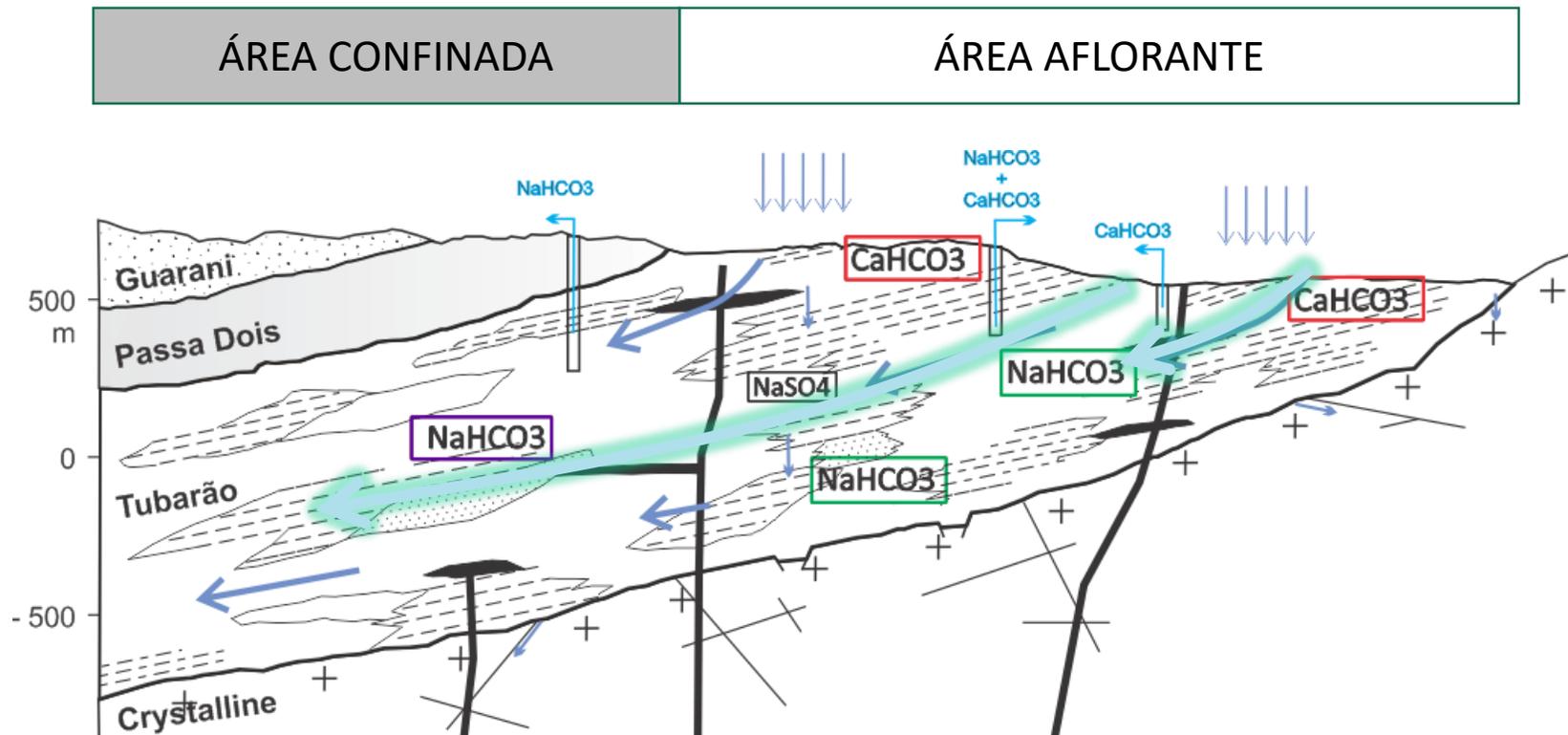


Sistema Aquífero	Unidade Hidroestati-gráfica	Classificação das águas	Tipo de ocorrência	Cond. Hidráulica (K)	Capacidade Específica (Q/s)	Vazão Explorável (Q)
Cristalino	Pré- Cambriano	Ca-HCO3 Mg-HCO3 Na-HCO3 Na-Cl ou mistas	Descontínuo, extensão regional, com porosidade e permeabilidade associados a fraturas.	0,84 – 0,0084 m/dia	0,01 a 0,14 m³/h/m	0 m³/h a 50 m³/h vazão média: ~ 5 m³/h
	Pré- Cambriano Cárstico	---	Descontínuo, extensão limitada, porosidade e permeabilidade associadas a cavidades de dissolução e fraturas.		0,12 a 7 m³/h/m	provável: 7 a 100 m³/h
Serra Geral	Basalto	Na-HCO3 Ca-HCO3 Mistas Na-SO4	Descontínuo, extensão regional, porosidade e permeabilidade associados	Horizontal: 0,043 – 4,3 m/dia Vertical: 0,86 – 8,6 m/dia	0,16 a 2,89 m³/h/m	< 1 a 100 m³/h vazão média: ~ 23 m³/h
	Diabásio		Serra Geral intrusivas - descontínuo, extensão limitada, porosidade e permeabilidade associadas a fraturas.		0,01 a 0,48 m³/h/m	1 a 120 m³/h



Adaptado de PERHS (2020); DAEE – Estudos de Águas Subterrâneas por Regionasi (década 1980).

- Modelo de circulação de água do Aquífero Tubarão



Águas NaHCO₃
Mais profundas

pH ~ 9,2 δO^{18} -8,3‰
Tempos de residência:
15.000 a >45.000 anos

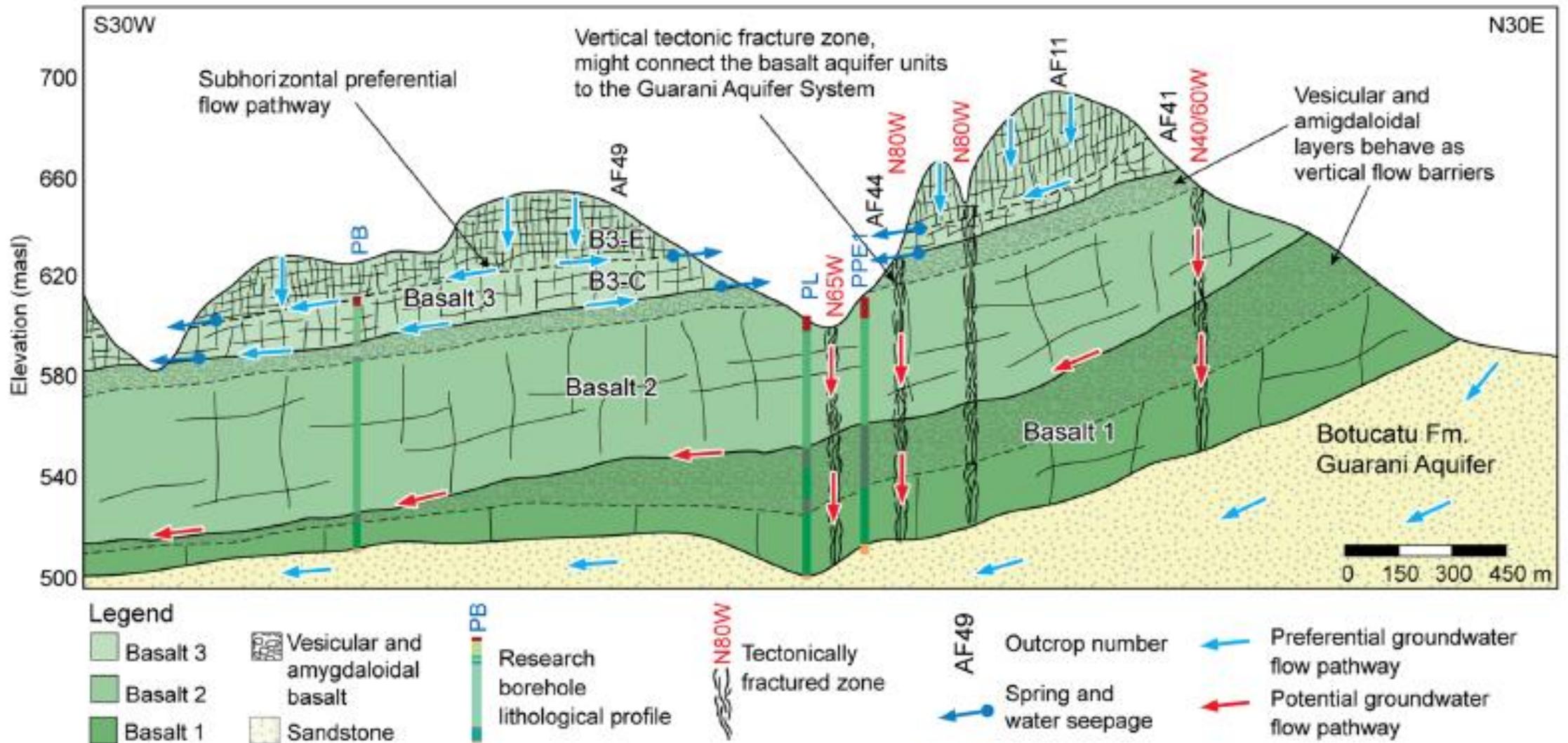
pH ~8,6
10.000 a
45.000
anos

Águas CaHCO₃
Menos profundas

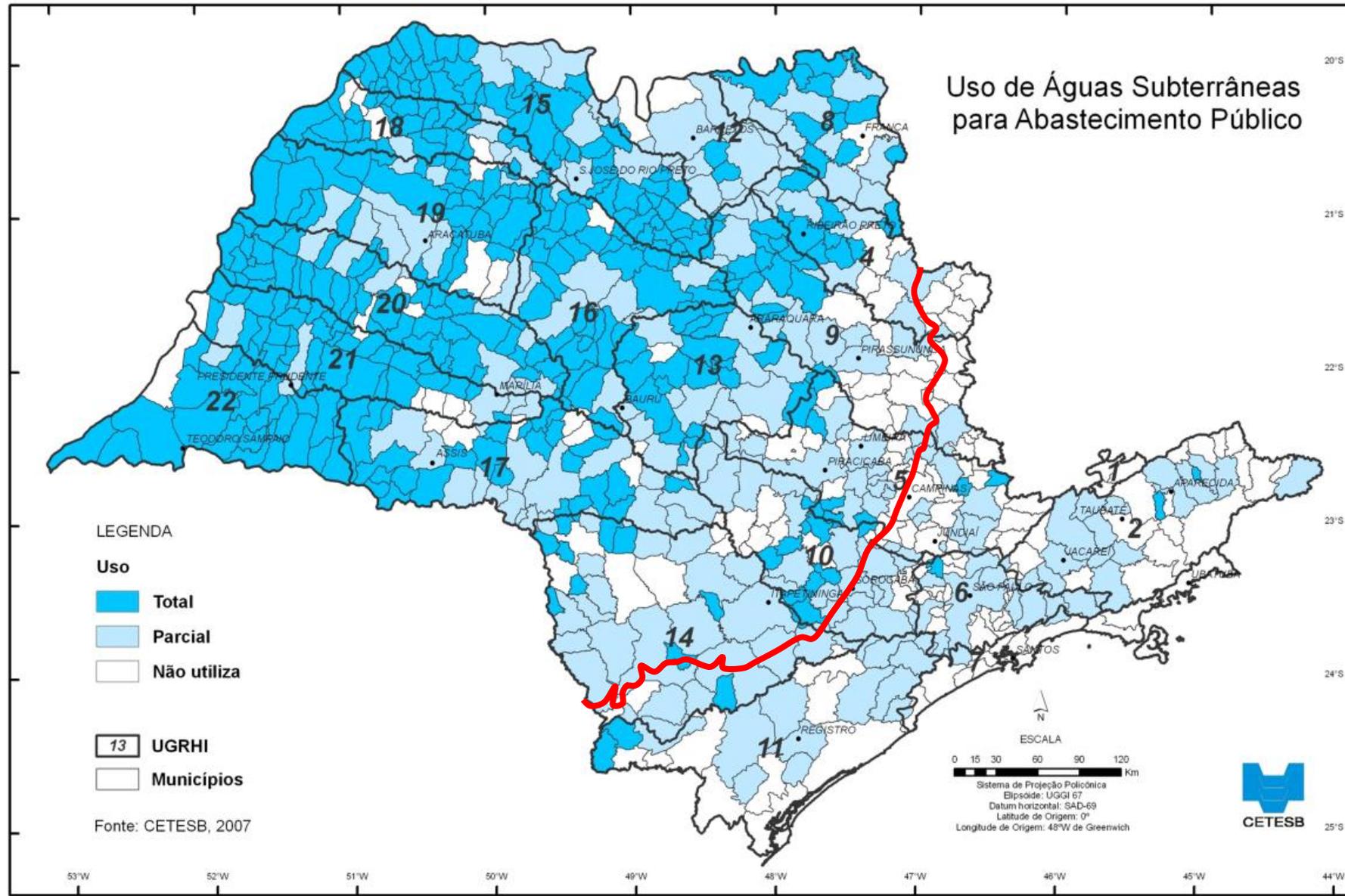
pH ~ 7,6 δO^{18} -5,5‰
Tempos de residência:
1.800 a 12.000 anos

(Ezaki et al. 2020)

Modelo de circulação de água do Aquífero Serra Geral/Sistema Aquífero Guarani



(Fernandes et al. 2006)



(CETESB, 2007)

4. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

- I) Regulamentos relativos à prevenção da contaminação das águas subterrâneas, ainda não estão estabelecidos;
- II) O estado da arte atual (benchmarking) ainda muito preliminar (ou pouco existente) acerca do conhecimento nos vários campos de especialização necessários;
- III) Tendência de elevados custos para a realização de estudos e pesquisas, inerentes às grandes profundidades envolvidas, quanto à hidrogeologia, hidroquímica, geologia estrutural, sismologia, dentre outros;
- IV) Riscos de falhas nos selos geológicos representam aspecto sensível no processo de armazenamento de CO₂ pois, caso não devidamente assegurados, podem resultar em fugas e migrações para camadas superiores e contaminar aquíferos/mananciais de água potável;
- V) Os monitoramentos (preventivos e sistemáticos) requeridos envolvem grandes profundidades, com aspectos complexos a monitorar e custos elevados.

GRATO PELA ATENÇÃO!

JOSÉ LUIZ ALBUQUERQUE FILHO

PESQUISADOR IPT

SIBELE EZAKI

PESQUISADORA IPA

OMAR YAZBEK BITAR

PESQUISADOR IPT

HEMILY JULIA BARROS BERNARDO

PESQUISADORA IPT



Referências

- AJAY, T.; GOMES, J.S.; BERA, A. 2019. A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. **Petroleum Science**, 16: 1028-1063.
- Celia, M.A.; Nordbotten, J.M.; Court, B.; Dobossy, M.; Bachu, S. 2011. Field-scale application of a semi-analytical model for estimation of CO₂ and brine leakage along old wells, *Int. J. Greenh. Gas Control*, 5(2): 257–269.
- CELIA, M.A.; BACHU, S.; NORDBOTTEN, J.M.; BANDILLA, K.W. 2015. Status of CO₂ storage in deep saline aquifers with emphasis on modeling approaches and practical simulations. **Water Res. Reser.**, 51(9): 6846-6892.
- DAEE/ IG/ IPT/CPRM. 2005. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa. São Paulo. São Paulo: DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica, IG- Instituto Geológico, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 3 v. (mapa e CD-ROM).
- EU Directive (2009), Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/ 35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006, Official Journal of the European Union, L 140, 5.6.2009, 114 pp.
- Ezaki, S; Gastmans, D.; Iritani, M.A.; Santos, V; Stradioto, M.T. (2020) Geochemical evolution, residence times and recharge conditions of the multilayered Tubarão aquifer system (State of São Paulo – Brazil) as indicated by hydrochemical, stable isotope and ¹⁴C data. *Itopoes in Environmental and Health Studies*.
- Fernandes, A.J.; Maldaner, C.H.; Negri, F.; Rouleau, A.; Wahnfried, I.D. (2016) Aspects of a conceptual groundwater flow model of the Serra Geral basalt aquifer (São Paulo, Brazil) from physical and structural geology data. *Hydrogeologic Journal*.



Referências

- Gíslason S.R.; Oelkers, E.H. 2014. Carbon Storage in Basalt. *Science* 344: 373–374.
- Gíslason *et al.* 2018. A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase. *Energy Procedia* 146: 103–114.
- Orita, G.K.L.; Cruz, V.G.P. 2022. Captura e armazenamento de CO₂: uma revisão das tecnologias existentes, carbonatação in situ de basaltos e avaliação do potencial do Grupo Serra Gral como reservatório de CO₂. *Geociências*, 41(3): 779 – 795.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2010), Federal Register, 40 CFR Parts 124, 144, 145, et al., Federal Requirements Under the Underground Injection Control (UIC) Program for Carbon Dioxide (CO₂) Geologic Sequestration (GS) Wells, Final Rule, 10 Dec.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2013), Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Area of Review Evaluation and Corrective Action Guidance for Owners and Operators, EPA, Office of Water (4606M), Rep. EPA 816-R-13-005, May.
- Voight, M. 2022. New Tchnology Accelrates mineral Trapping of Carbon Dioxide. The Way Ahead.

