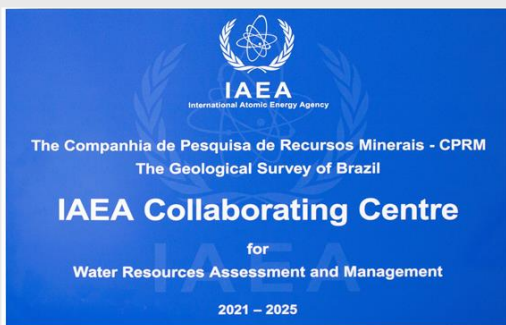


Programa de Recursos Hídricos

RELATÓRIO ANUAL

Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia



Dezembro, 2022 (Versão Preliminar)



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO
FEDERAL

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Adolfo Sachsida

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Lilia Mascarenhas Sant'agostino

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente

Cassiano de Souza Alves (Interino)

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Marcio José Remédio

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Hidrologia

Frederico Cláudio Peixinho

Chefe da Divisão de Hidrologia Exploratória

João Alberto Diniz

EQUIPE DO PROGRAMA DE APLICAÇÕES ISOTÓPICAS NA HIDROLOGIA

Roberto Eduardo Kirchheim

Andrea Segura Franzini

Guilherme Nogueira Santos

Isadora Aumond Kuhn

Eduardo Marcel Lazzarotto

Idembergue Barroso Macedo de Moura

Manoel Imbiriba Junior

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT
Departamento de Hidrologia
Divisão de Hidrologia Aplicada

Programa de Gestão de Riscos e Desastres

**Ação Orçamentária: Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta
de Eventos Hidrológicos Críticos**

RELATÓRIO ANUAL

Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia

AUTORES

Roberto Eduardo Kirchheim
Andrea Segura Franzini
Guilherme Nogueira Santos
Isadora Aumond Kuhn
Eduardo Marcel Lazzarotto
Idembergue Barroso Macedo de Moura
Manoel Imbiriba Junior

(Versão Preliminar)

Rio de Janeiro
Dezembro, 2022



REALIZAÇÃO

Divisão de Hidrologia Exploratória

AUTORES

Roberto Eduardo Kirchheim

Andrea Segura Franzini

Guilherme Nogueira Santos

Isadora Aumond Kuhn

Eduardo Marcel Lazzarotto

Idembergue Barroso Macedo de Moura

Manoel Imbiriba Junior

EQUIPE EXECUTORA

Carla Costa Machado, Patricia Wagner Soterio, Cristina Bomfim Peixoto, Luciano Trasel, Rejane Bao, Karine Pickbrenner, George Rodrigues De Sousa Araujo, Fabio Araujo da Costa, Robson de Carlo da Silva, Rafael Diego Diniz Bezerra de Albuquerque, Gilberto Nunes Barreto, Vitor Hugo Serravalle Reis Rodrigues, Amilton de Castro Cardoso, Homero Reis de Melo Junior, Manoel Imbiriba Junior, Herculy Pessoa e Castro, Jean Ricardo da Silva Nascimento, Bruna Karoline de Sena Silva, Sandy Mayone Ribeiro, Mauro Campos Trindade, Vivian Athaydes Canello Fernandes, Marcio Costa Abreu, Andrea Segura Franzini, Guilherme Nogueira Santos, Eduardo Lazzarotto, Katarina Rempel, Castrolago Silva Barbosa, Idembergue Barroso de Moura, Victor Hugo da Mota Paca, Felipe T. Augusto, Aline Garcia, Márcio Cândido, Roberto Fernando de Paiva, Leanize Teixeira de Oliveira, Vanesca Sartorelli Medeiros, Roberto Kirchheim, Cristovaldo Bispo dos Santos.

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

XXXXX

FOTOS DA CAPA: Placa de Centro Colaborativo outorgada pela AIEA ao SGB, Diretora Alice Castilho, Chefe de Departamento Frederico Peixinho e Coordenador do Programa de Aplicações Isotópicas Roberto Kirchheim, Coletas Isotópicas em Belém geradas por Manoel Imbiriba e amostras de Marabá.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)



Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária:

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - CPRM
www.cprm.gov.br
seus@cprm.gov.br

RESUMO

O Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia possui um caráter claramente transversal dentro da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial do SGB. O mesmo é constituído de uma série de componentes, cada qual com seu grupo de atividades, ora de caráter mais operacional como é o caso dos esforços na construção de uma rede de monitoramento isotópica de chuvas, ora de caráter eminentemente de pesquisa e inovação como é caso dos desenvolvimentos realizados com radioisótopos e gases nobres. O trabalho aqui apresentado enfatiza os resultados de caráter de inovação científica obtidos durante o ano de 2022. Neste sentido merecem destaque os avanços que o SGB alcançou no tema de aplicações hidrogeológicas de gases nobres e radioisótopos, incluindo aqui técnicas para datação de idades de águas subterrâneas antigas e muito antigas. Da mesma forma, o SGB vem assumindo uma posição de destaque no cenário nacional e continental através da operação da rede GNIP, da implementação da Rede GNIR, assim como através da determinação das assinaturas isotópicas das águas subterrâneas monitoradas pela rede RIMAS. São trazidos aqui, os principais avanços em termos de sistematização de dados.

ABSTRACT

The National Program for Isotopic Applications in Hydrology has a clearly transversal character within the Directorate of Hydrology and Territorial Management of the Geological Survey of Brazil. It is made up of a series of components, each with its group of activities, sometimes of a more operational nature, as is the case with the efforts to build an isotopic rain monitoring network, sometimes of an eminently research and innovation character, as is the case of developments carried out with radioisotopes and noble gases. The work presented here emphasizes the results of scientific innovation obtained during the year 2022. In this sense, the advances that the SGB achieved in the subject of hydrogeological applications of noble gases and radioisotopes, including techniques for dating groundwater ages, are worthy of mention. old and very old. Likewise, the SGB has been assuming a prominent position in the national and continental scenario through the operation of the GNIP network, the implementation of the GNIR Network, as well as through the determination of isotopic signatures of the groundwater monitored by the RIMAS network. The main advances in terms of systematization of isotope data for the considered period are brought here.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes do Programa e Ações Estratégicas.....	13
Figura 2. Distribuição Espacial de ^{18}O na Precipitação no Brasil - 2019 e 2020/Janeiro.	10
Figura 3. Distribuição Espacial de ^{18}O na Precipitação no Brasil - 2019 e 2020/Julho...	10
Figura 4. Distribuição Espacial de ^{18}O na Precipitação no Brasil - 2019 e 2020/Outubro.	10
Figura 5. Distribuição Espacial de ^2H para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco...	11
Figura 6. Distribuição Espacial de ^{18}O para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.	12
Figura 7. Imagens das Coletas Isotópicas no Rio Coxins-Taquari.....	10
Figura 8. Distribuição Espacial de ^2H para o Rio Coxin	10
Figura 9. Distribuição Espacial de ^{18}O para o Rio Coxin	10
Figura 10. Mapa de Localização das Amostras Radioisótopos no SAG do RS.	11
Figura 11. Dinâmica das Coletas Isotópicas de Campo.	12
Figura 12. Representantes de Grupos de Pesquisa em Isotopia Aplicada a Wetlands..	13
Figura 13. Dinâmica da Reunião do CRP na AIEA em Viena	14
Figura 14. Artigo em Coautoria em Revista de Excelência (Advances in Atmospheric Sciences, 2022).	15
Figura 15. Coletas de Águas Saturadas em Gases no Fundo Marinho.....	21

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1: Atividades Estratégicas do Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia**Erro! Indicador não definido.**
- Quadro 2: Resultados Alcançados 2022.....**Erro! Indicador não definido.**
- Quadro 3: – Lista e Informações sobre GNIP’s da Rede de Monitoramento Isotópico de Chuva no Brasil**Erro! Indicador não definido.**
- Quadro 4: Formulário Padrão de Projeto.....**Erro! Indicador não definido.**
- Quadro 5: Sumário de Ações de Capacidades Analíticas**Erro! Indicador não definido.**

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE QUADROS	9
SUMÁRIO	10
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 HISTÓRICO	11
1.2 ESTRUTURA DO PROGRAMA	12
2 ATIVIDADES REALIZADAS	10
2.1 GNIP	11
2.2 GNIR	10
2.2.1 GNIR Bacia do Rio São Francisco	10
2.2.2 GNIR Bacia do Rio Coxins	10
2.3 PROJETOS DE PESQUISA	10
2.3.1 Contribuição ao Conhecimento dos Fluxos de Água na Sub bacia do Alto São Francisco Utilizando Isótopos Estáveis (H e O).....	10
2.3.2 Caracterização Isotópica e Hidrodinâmica do SAG no Sul do Brasil.....	11
2.3.3 Caracterização Isotópica e Hidrodinâmica do SAB no Sudeste do Brasil	12
2.3.4 Técnicas de Multitraçadores Isotópicos Aplicada a Compreensão de Áreas Úmidas.....	12
2.3.5 Projeto de NTC (National Technical Cooperation) Uso de Radioisótopos para Determinação de Idades de Águas Subterrâneas	15
2.3.6 Projeto de Pesquisa de Aplicação de Técnicas Isotópicas de Gases Nobres em Geologia Marinha	21
2.4 EQUIPAMENTOS	21
2.5 PRÓXIMOS PASSOS	23
3 CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS	25
APÊNDICE A – Relatório para AIEA	26
APÊNDICE B – Projeto de Pesquisa Doutorado (Aprovado CTC e em execução).....	36
APÊNDICE C – Projeto de Pesquisa Doutorado (Aprovado CTC e em execução).....	53
APÊNDICE D – Projeto de Pesquisa CRP de Aplicações Isotópicas em Áreas Úmidas.....	69
APÊNDICE E – Projeto de Pesquisa CRP Variabilidade Isotópica da Precipitação	76
APÊNDICE F – Projeto de Pesquisa NTC para Datação de Águas Antigas.....	88
ANEXO A – Caderno Técnico: Estação de Monitoramento Isotópico de Porto Alegre.....	95

1 INTRODUÇÃO

No âmbito da Ciência e Inovação o SGB-CPRM vem articulando desde 2015 arranjos institucionais assim como atividades técnicas específicas para consolidar-se como instituição líder nacional no tema das aplicações isotópicas na hidrologia. Atualmente o SGB conta com um Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia albergado dentro da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial – DHT. Trata-se de um programa consolidado que apoia e complementa os demais projetos operacionais da DHT. O objetivo geral do Programa é o de assimilar, testar, desenvolver e difundir as valiosas aplicações isotópicas na hidrologia (desde a chuva, águas superficiais e subterrâneas) como uma ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos no país.

A cada novo ano, há uma repactuação de metas e novo alinhamento para manter as ações coerentes com as estratégias da DHT e recursos financeiros e pessoais disponíveis. Em virtude da execução das ações de caráter isotópico em território nacional, com benefícios perceptíveis em escala continental, a empresa possui atualmente a condição de Centro Colaborativo da AIEA. Significa que a AIEA reconhece o SGB como instituição parceira, capaz de auxiliar na difusão de técnicas nucleares para fins pacíficos, neste caso, através do uso das técnicas isotópicas na hidrologia.

O objetivo maior da atuação do SGB como Centro Colaborativo da AIEA é usar e difundir a aplicação de técnicas isotópicas na hidrologia e assumir papel de liderança técnica no país e na América do Sul. Trata-se, portanto, de um grande desafio a ser assumido pela empresa, e, que tem o propósito de identificar problemas e apresentar soluções na área de recursos hídricos utilizando a hidrologia isotópica.

Considerando sua solidez institucional e capacidade/qualidade profissional, além da ampla capilaridade em todo o território nacional, o SGB reúne as condições ideais para exercer liderança técnica nacional e continental na metodologia isotópica aplicada à hidrologia. Através da sua equipe de especialistas, o SGB vem executando uma série de ações na área dos recursos hídricos, onde o refinamento isotópico agrega expressivo valor e coloca a empresa na vanguarda científica. Ressalta-se também o espírito de liderança conquistado pela SGB no âmbito continental, onde a mesma tem assumido protagonismo em importantes iniciativas.

Através destas inserções, o SGB consolida-se também como instituição apta para difusão das técnicas isotópicas em território Sul-americano. Abrem-se oportunidades de parcerias institucionais nacionais e internacionais importantes e janelas de capacitação imprescindíveis para avançar no cumprimento da missão corporativa.

O SGB, através do Programa de Aplicações Isotópicas em Recursos Hídricos, participa ativamente e formalmente em 04 Projetos de Cooperação do tipo CRP (Coordinated Research Project) e 01 Projeto do tipo TNP (Technical National Project), ambos através da AIEA adjudicados por mérito em competição mundial. Além destes, o SGB é responsável pela Rede GNIP no Brasil. Os recursos obtidos pelo SGB na forma de repasse financeiro direto e ou indireto (custeio de análises isotópicas e envio de equipamentos) alcançam a ordem de R\$ 500.000,00/ano.

Todas estas conquistas não seriam possíveis sem a contribuição de cada um dos colaboradores do SBG e parceiros institucionais, principalmente da UNESP-Rio Claro (LEBAC e CEA). São técnicos (as), pesquisadores (as) e profissionais administrativos e gestores (as) que garantem a execução e sustentabilidade do Programa. O mérito é compartilhado com todos.

1.1 HISTÓRICO

A partir da aproximação institucional entre AIEA e o SGB a partir de 2014, foi estendido um convite formal para que o SGB exercesse a função de Centro Colaborativo para a difusão das técnicas isotópicas aplicadas à hidrologia. A realização de um curso de capacitação em hidrogeologia isotópica ministrado pela AIEA no SGB consolidou a parceria. Aceito o desafio por parte do SGB, através de Ato da Presidência (no 092/PR/15 de 14/04/2015) foi conformado um Grupo de Trabalho (GT) constituído para discutir e definir, conceitual e estruturalmente, o modelo deste Centro Colaborativo (CC) e apresentar um plano de ação detalhado, alinhado ao conteúdo programático definido pela IAEA e aos projetos em andamento do próprio SGB. A primeira reunião técnica do GT ocorreu em 14/05/2015 na sede do SGB e, já em agosto de 2015, durante uma missão técnica formal da AIEA ao Brasil, foi apresentada e discutida a primeira versão do Plano Estratégico. Desde 2017 o SGB vem executando o referido programa através de dotação financeira exclusiva. Em 2021, o SGB e a

AIEA assinaram acordo internacional formalizando o vínculo e adotando plano estratégico comum com validade até 2024.

Ressalta-se que, do ponto de vista financeiro, a função de CC implica em expressiva contrapartida da AIEA, apoio estratégico fundamental para tornar a aplicação de técnicas isotópicas uma prática corrente nas ações do SGB e com isso difundi-las no país e no continente. Esta contrapartida da AIEA envolve o custeio das determinações analíticas isotópicas na rede de laboratórios credenciados, no envio de técnicos de excelência para ministrar os cursos de capacitação no Brasil e na aceitação de colaboradores do SGB em cursos sobre técnicas isotópicas ministrados no exterior.

1.2 ESTRUTURA DO PROGRAMA

O referido programa é constituído de componentes que por sua vez são formados por atividades estratégicas. Cada uma destas atividades destacadas possui uma breve descrição de caráter técnico-operativa. A Figura 1 cita as componentes e as linhas de ação de como o programa foi concebido.



Figura 1. Componentes do Programa e Ações Estratégicas

O Quadro 1 identifica as atividades estratégicas dentro de cada componente compondo um programa específico para os próximos 04 anos, no qual são reconhecidos as metas e os produtos a serem alcançados. A partir da leitura do Quadro pode-se perceber que o programa consiste em atividades que abarca o ciclo hidrológico como um todo, mas ao mesmo tempo buscam alicerças bases sólidas do ponto de vista analítico, capacitação, geração de produtos inovadores. A articulação institucional, seja com parceiros nacionais e ou internacionais é fundamental.

Quadro 1. Atividades estratégicas do Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia

Componentes	Atividades	Entregas	Cronograma	Resultados / Impactos	Indicadores de Desempenho
TREINAMENTO E CAPACITAÇÃO	Está em desenvolvimento na CPRM o Programa Nacional para Uso de Isótopos em Hidrologia, onde dentre os objetivos principais constam as atividades de capacitação. A aplicação de isótopos na hidrologia é importante ferramenta para otimização da avaliação e gestão dos recursos hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> - 06 (seis) treinamentos internos/cursos sobre o uso de isótopos em hidrologia para equipe da CPRM; - 03 (três) cursos internos sobre técnicas avançadas (como uso de traçadores e modelagem); - 03 (três) participações promovendo sessão de discussão sobre aplicações de isótopos em hidrologia no âmbito de Conferências Nacionais sobre Águas Subterrâneas e Recursos Hídricos. - 01 Simpósio sobre aplicações de isótopos em hidrologia ao nível continental (Serviços Geológicos de países vizinhos); - Continuação da participação da CPRM nos treinamentos internacionais sobre isótopos organizados pela AIEA. 	<p>2020-2021</p> <p>2020-2022</p> <p>2020-2024</p> <p>2023</p> <p>2020-2024</p>	A CPRM torna-se instituição de referência, capaz de promover e colaborar com a AIEA em disseminar o uso de isótopos na hidrologia no país e no continente sul-americano	<ul style="list-style-type: none"> - Número de treinamentos / eventos em isotopia básica. - Número de técnicos treinados da CPRM. - Número de instituições envolvidas em colaboração. - Acessibilidade no site da CPRM sobre informações do uso de isótopos na hidrologia.
AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE ANALÍTICA	A CPRM dispõe de uma rede de laboratórios analíticos regionais, porém ainda não trabalha com técnicas isotópicas.	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de projetos e submissão de propostas às agências de fomento para montagem de instalações analíticas para de isótopos estáveis na CPRM 	2020-2024	Prover ao LAMIN condições de atendimento da demanda de análises isotópicas em água nos projeto em desenvolvimento na CPRM.	<ul style="list-style-type: none"> - Número de equipamentos instalados e em operação. - Número de amostras processadas ao ano; - Adequação a padrões e testes de qualidade.
DISSEMINAÇÃO TÉCNICAS ISOTÓPICAS	Disseminação do conhecimento sobre o uso de isótopos estáveis na hidrologia visando à avaliação e a gestão dos recursos hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> - 10 Publicações específicas (Memorial Técnico) para cada uma das 10 GNIP's instalada no território nacional; - 15 (quinze) artigos técnicos- científicos publicados em revistas nacionais e/ ou internacionais; - Disponibilização de dados isotópicos em água no banco de dados e acessibilidade no site da CPRM. 	<p>2020-2024</p> <p>2020-2024</p> <p>2020-2024</p>	Disseminação das técnicas isotópicas no uso de isótopos estáveis em água visando a avaliar a gestão dos recursos hídricos. Amplo acesso à comunidade científica e usuários das informações.	<ul style="list-style-type: none"> - 10 Memoriais técnicos das Estações GNIP's publicados. - Número de artigos técnico-científicos publicados em revistas nacionais e/ou internacionais; - Acessos a dados isotópicos em água no site da CPRM.
MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE CHUVA - GNIP	A Cooperação AIEA-CPRM tem propiciado ao Brasil monitorar a assinatura isotópica das águas de chuvas por meio das estações de coleta da rede GNIP, sob a responsabilidade da CPRM. Algumas das estações GNIP possuem coleta para trítio.	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção, operação e monitoramento de 10 (dez) estações, já instaladas, da Rede GNIP; - Instalação de 07 (sete) novas estações para comporem a rede GNIP, no território nacional; - Instalação de 03 (três) novas estações para comporem a rede GNIP em áreas de fronteiras. - Banco de dados disponível em nível nacional e no repositório GNIP da AIEA. 	<p>2020-2024</p> <p>2020-2022</p> <p>2021-2022</p> <p>2020-2024</p>	Coleta de dados isotópicos em amostras de água de chuva coletadas em estações GNIPs como apoio para a gestão da disponibilidade, da dinâmica e da segurança hídrica no contexto Continental.	<ul style="list-style-type: none"> - Banco de dados com informações disponíveis. - Número de novas estações GNIP instaladas. - Dados disponíveis na rede oficial GNIP/AIEA.
MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - RIMAS	Avaliações de estudos isotópicos nos aquíferos monitorados pela Rede	<ul style="list-style-type: none"> - Análises de 600 (seiscentas) amostras de águas subterrâneas da RIMAS; 	<p>2020-2024</p> <p>2024</p>	Avaliações de isótopos em 20 aquíferos regionais no país com informações disponíveis para pesquisa pela comunidade científica e	<ul style="list-style-type: none"> - Banco de dados com informações disponíveis; - Número de poços de monitoramento/ amostras analisadas;

	Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS)	- Avaliação isotópica em 20 (vinte) aquíferos com dados disponibilizados em publicação institucional; - Elaboração e publicação de 01 (um) atlas com a distribuição isotópica nas águas subterrâneas em contexto nacional.	2024	tomadores de decisão permitindo melhores práticas de gestão d'água.	- Número de relatórios institucionais publicados; - Contribuição efetiva na gestão e impacto positivo na resolução de conflitos
PROJETO PILOTO DE MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE RIOS - GNIR	A CPRM e a AIEA iniciarão ações de monitoramento isotópico em rios no território nacional. Em forma de projeto piloto o programa inicia com o Rio Amazonas, São Francisco e Paraná.	- Coleta e análise isotópica de 400 (quatrocentas) amostras de águas dos 3 Rios indicados; - Elaboração de 03 (três) Manuais de monitoramento de coleta de amostras para os 3 (três) rios indicados.	2020-2024 2021	Aprimoramento da avaliação da dinâmica das águas nas bacias monitoradas, e desenvolvimento de ferramentas para a gestão.	- Banco de dados com informações disponíveis; - Número de amostras Analisadas; - Número de relatórios e <i>papers</i> publicados; - Número de rios com monitoramento isotópico (GNIR).
AVALIAÇÃO ISOTÓPICA NO PROJETO PILOTO URUCUIA	O uso da isotopia em muito contribuirá para o entendimento da dinâmica dos recursos hídricos no Aquífero Urucuia.	- 200 (duzentas) amostras coletadas e analisadas para isótopos estáveis em águas superficiais e subterrâneas na região do Urucuia; - Elaboração de 01 (um) Relatório de Avaliação Isotópica do Aquífero Urucuia.	2020-2024 2020-2024	Entendimento da dinâmica e da origem da água contribuindo para gestão integrada de recursos hídricos na escala da bacia.	- Número de amostras analisadas; - Banco de dados com informações disponíveis; - Número de relatórios institucionais publicados; - Contribuição efetiva na gestão.
AVALIAÇÕES ISOTÓPICAS EM ÁREAS PRIORITÁRIAS	Avaliações isotópicas específicas em aquíferos de áreas urbanas de alta prioridade devido a conflitos de qualidade e quantidade	- 300 Amostras de água coletadas (rios e águas subterrâneas) em projetos específicos relacionados à dinâmica das águas subterrâneas em áreas prioritárias de conflitos hídricos. - Relatórios de avaliações isotópicas em aquíferos de área urbanas.	2020-2024 2020-2024	Entendimento da dinâmica e origem da água contribuindo para a gestão integrada dos recursos hídricos sob o ponto de vista de quantidade e qualidade em regiões urbanas.	- Número de amostras analisadas; - Banco de dados com informações disponíveis; - Número de relatórios institucionais publicados; - Contribuição efetiva na gestão e impacto positivo na resolução de conflitos de recursos hídricos em áreas urbanas.

Fonte: Acordo de Cooperação Internacional entre SGB e AIEA (2021).

2 ATIVIDADES REALIZADAS

De acordo com o Quadro 1 acima se pode perceber não somente a quantidade, mas também a variedade de atividades relacionadas as aplicações isotópicas. Além de envolver o funcionamento de uma rede permanente de coleta e análise isotópica em precipitação (Rede GNIP), o programa também se encarrega de apoiar as demais atividades da DHT e DGM que envolvam a aplicação de traçadores isotópicos, como é caso da RIMAS, dos Projetos Integrados em Parceria com a ANA, assim como no Projeto de Remediação da Bacia Carbonífera e, recentemente em Geologia Marinha. Importante salientar que o Quadro 1 também representa uma matriz lógica e estratégica que orienta as ações do programa. Confrontando os objetivos e metas para o período programado, ou seja, com alcance até 2024, com o que efetivamente foi alcançado, torna-se possível mensurar o desempenho geral do Programa de Isotopia e priorizar recursos humanos e financeiros nas frentes ainda incompletas.

O Quadro 2 abaixo destaca os resultados em relação aos indicadores originalmente proposto.

Quadro 2. Resultados atingidos até final de 2022.

Componentes	Entregas	Cronograma	Resultados Atuais (final de 2022)
TREINAMENTO E CAPACITAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> - 06 (seis) treinamentos internos/cursos sobre o uso de isótopos em hidrologia para equipe da CPRM; - 03 (três) cursos internos sobre técnicas avançadas (como uso de traçadores e modelagem); - 03 (três) participações promovendo sessão de discussão sobre aplicações de isótopos em hidrologia no âmbito de Conferências Nacionais sobre Águas Subterrâneas e Recursos Hídricos. - 01 Simpósio sobre aplicações de isótopos em hidrologia ao nível continental (Serviços Geológicos de países vizinhos); - Continuação da participação da CPRM nos treinamentos internacionais sobre isótopos organizados pela AIEA. 	2020-2021 2020-2022 2020-2024 2023 2020-2024	<ul style="list-style-type: none"> - Foram realizados 08 treinamentos internos beneficiando 150 colaboradores; - Foram realizados 03 cursos internos sobre técnicas avançadas; - Foram 2 participações formais promovendo técnicas isotópicas; - Programado para ocorrer em 2023 e já em discussão com AIEA; - Todos os cursos e isotopia ofertados pela AIEA tiveram participantes do SBG subsidiados
AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE ANALÍTICA	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de projetos e submissão de propostas às agências de fomento para montagem de instalações analíticas para de isótopos estáveis na CPRM 	2020-2024	<ul style="list-style-type: none"> - LAMIN e Programa de Isotopia aguardam remessa do Primeiro Espectrômetro de Massa a ser instalado em SP. Detector de Radônio em água sendo comprado via CNPQ e Espectrômetro de Massa de campo para gases nobres e isótopos esperado para 2024.
DISSEMINAÇÃO TÉCNICAS ISOTÓPICAS	<ul style="list-style-type: none"> - 10 Publicações específicas (Memorial Técnico) para cada uma das 10 GNIP's instalada no território nacional; - 15 (quinze) artigos técnicos- científicos publicados em revistas nacionais e/ ou internacionais; 	2020-2024 2020-2024	<ul style="list-style-type: none"> - Todas 10 publicações de Memorial Técnico das GNIPs estão prestes a ser lançadas em série em 2023. - 07 Artigos já publicados

	- Disponibilização de dados isotópicos em água no banco de dados e acessibilidade no <i>site</i> da CPRM.	2020-2024	- Principal Meta para 2023.
MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE CHUVA - GNIP	- Manutenção, e operação de 10 (dez) estações, já instaladas, da Rede GNIP; - Instalação de 07 (sete) novas estações para comporem a rede GNIP, no território nacional; -- Instalação de 03 (três) novas estações para comporem a rede GNIP em áreas de fronteiras. - Banco de dados disponível em nível nacional e no repositório GNIP da AIEA.	2020-2024 2020-2022 2021-2022 2020-2024	- 10 Estações GNIP SGB operantes - 08 novas Estações operantes instaladas; - 01 Estação em área de fronteira já instalada; - Repositório disponível mas ainda por compartilhar com público externo
MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - RIMAS	- Análises de 600 (seiscentas) amostras de águas subterrâneas da RIMAS; - Avaliação isotópica em 20 (vinte) aquíferos com dados disponibilizados em publicação institucional; - Elaboração e publicação de 01 (um) atlas com a distribuição isotópica nas águas subterrâneas em contexto nacional.	2020-2024 2024 2024	- 200 Amostras de água subterrânea RIMAS analisadas - Meta prioritária para 2023 e 2024 - Meta estabelecida para 2023
PROJETO PILOTO DE MONITORAMENTO ISOTÓPICO DE RIOS - GNIR	- Coleta e análise isotópica de 400 (quatrocentas) amostras de águas dos 3 Rios indicados; - Elaboração de 03 (três) Manuais de monitoramento de coleta de amostras para os 3 (três) rios indicados.	2020-2024 2021	- 300 Amostras já analisadas em 02 rios nacionais - Meta prioritária para 2023. Manual para 02 rios.
AVALIAÇÃO ISOTÓPICA NO PROJETO PILOTO URUCUIA	- 200 (duzentas) amostras coletadas e analisadas para isótopos estáveis em águas superficiais e subterrâneas na região do Urucuia; - Elaboração de 01 (um) Relatório de Avaliação Isotópica do Aquífero Urucuia.	2020-2024 2020-2024	- 100 Amostras coletadas - Meta prioritária ara 2023-2024
AVALIAÇÕES ISOTÓPICAS EM ÁREAS PRIORITÁRIAS	- 300 Amostras de água coletadas (rios e águas subterrâneas) em projetos específicos relacionados à dinâmica das águas subterrâneas em áreas prioritárias de conflitos hídricos. - Relatórios de avaliações isotópicas em aquíferos de área urbanas.	2020-2024 2020-2024	- >300 amostras coletadas - 03 Relatórios de Isotopia em aquíferos relacionados a áreas urbanas e estratégicas

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os resultados específicos e concretos de 2022 serão apresentados e detalhados a seguir.

2.1 GNIP

O SGB consolida-se cada vez mais como sendo a instituição que dinamiza a aplicação das técnicas isotópicas em recursos hídricos e climáticos no Brasil. Atualmente, o SGB, consorciado com instituições parceiras, opera 18 estações GNIP com coletas mensais. O Quadro 3 fornece as informações atualizadas desta operação, incluindo GNIP's operadas por instituições parceiras.

Quadro 3 – Lista e informações sobre GNIP's da Rede de Monitoramento Isotópico de Chuva no Brasil

Localidade GNIP	Isótopos Estáveis	Trítio ^3H	$\Sigma\text{ppt/m (mm)}$, $T (^{\circ}\text{C})$ y $P_{\text{ar}}(\%)$	Data Início	Análises Concluídas
Rio Claro-SP (UNESP)	✓	✓	✓	10/13	11/13-7/21
São Paulo-SP (USP)	✓	✓	✓	10/16	11/16-7/21

Belo Horizonte-MG (CDTN)	✓	✓	✓	10/06	11/06-7/21
Porto Alegre-RS	✓		✓	07/17	8/17-7/21
São Gabriel do Oeste-MS	✓		✓	07/17	9/18-3/19
Manaus-AM	✓	✓	✓	08/18	9/18-6/21
Recife-PE	✓	✓	✓	09/18	9/18-3/21
Salvador-BA	✓		✓	09/18	10/18-3/21
Belém-PA	✓	✓	✓	11/18	12/18-7/21
Porto Velho-RO	✓		✓	11/18	12/18-4/21
Teresina-PI	✓		✓	12/18	10/18-4/21
Goiânia-GO	✓		✓	12/18	1/19-4/21
Barreiras-BA (UFOB)	✓	✓	✓	02/19	10/19-4/21
Juazeiro do Norte-CE	✓		✓	01/21	2/21-7/21
Serra da Canastra – MG (ICM-Bio)	✓		✓	06/21	-
Marabá-PA (UFOPA)	✓		✓	12/21	-
Cuiabá-MT	✓	✓	✓	12/21	-
Santarém-PA (UNIFESSPA)	✓		✓	12/21	-
Palmas-TO (EMBRAPA)	✓		✓	12/21	-
Frederico Westphalen-RS (UFMS)	✓		✓	11/21	-
Curitiba-PR (UFPR)	✓		✓	12/21	-
Petrópolis-RJ	✓		✓	10/22	-
Criciúma-SC	✓		✓		
Abrolhos / Fernando de Noronha	✓	✓	✓		
Boa Vista-RR / GUI-VEN	✓		✓		
Rio Branco-AC / BOL	✓		✓		
Santana do Livramento-RS/URU	✓	✓	✓		

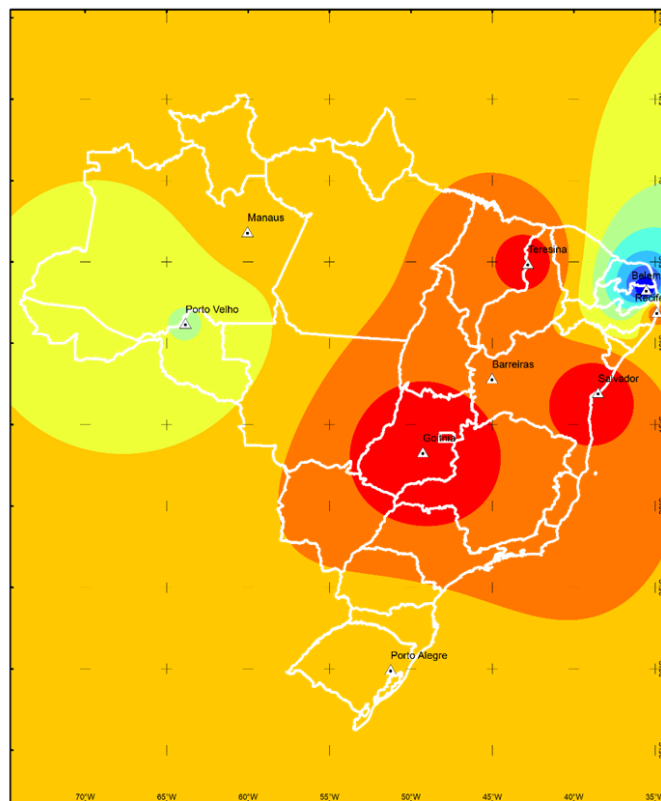
GNIP's em verde: Operação de terceiros; GNIP's em cinza: Operação direta SGB; GNIP's em azul: Operação direta SGB facilitada por parceiros institucionais; GNIP's em laranja: Expectativa para 2023/2024.

Se ressalta que o período complementar desde os últimos meses com análises até meses mais recentes conforma o lote em análise nos laboratórios da AIEA em Viena. Idem para as GNIP's recentes e sem análises, todavia.

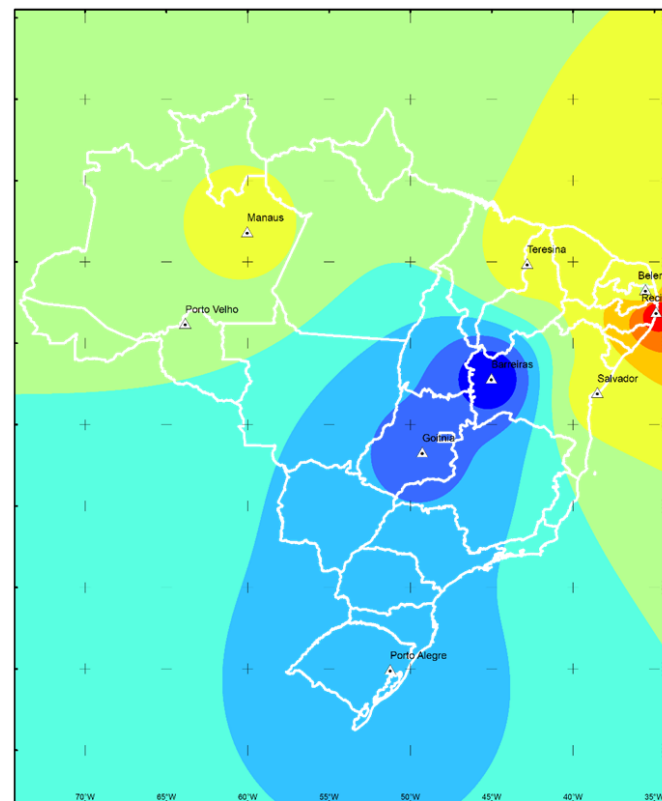
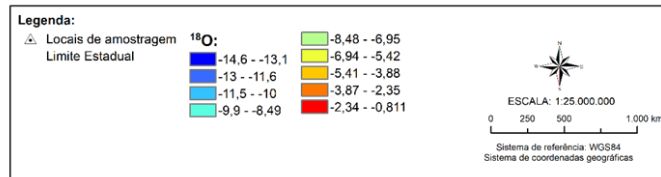
Os resultados das análises isotópicas para cada uma das GNIP's relacionadas sob responsabilidade do SBG estão sendo sistematizados para publicação no formato de cadernos executivos e memoriais descritivos da respectiva GNIP, conforme documento destacado no **Anexo I** (elaborado para a GNIP de Porto Alegre-RS).

Além da publicação dos respectivos memoriais descritivos, a página WEB do SBG contará com um repositório público no qual os dados estarão disponíveis para toda a comunidade científica interessada, tanto em sua forma bruta como também com um certo grau de sistematização.

A partir dos dados já existentes nas respectivas GNIP's, foi possível elaborar interpolações isotópicas mensais para todo o território nacional, conforme pode ser visualizado nas Figuras 2 a 4. Destaca-se aqui somente alguns dos meses referenciais. O banco de dados permite inúmeras sistematizações, as quais serão disponibilizadas na forma de uma série de produtos conforme comentado acima.



Distribuição Espacial do ^{18}O (JANEIRO DE 2019)



Distribuição Espacial do ^{18}O (JANEIRO DE 2020)

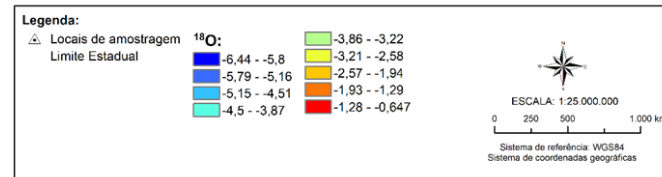


Figura 2. Distribuição Espacial de ^{18}O na Precipitação no Brasil - 2019 e 2020/Janeiro.

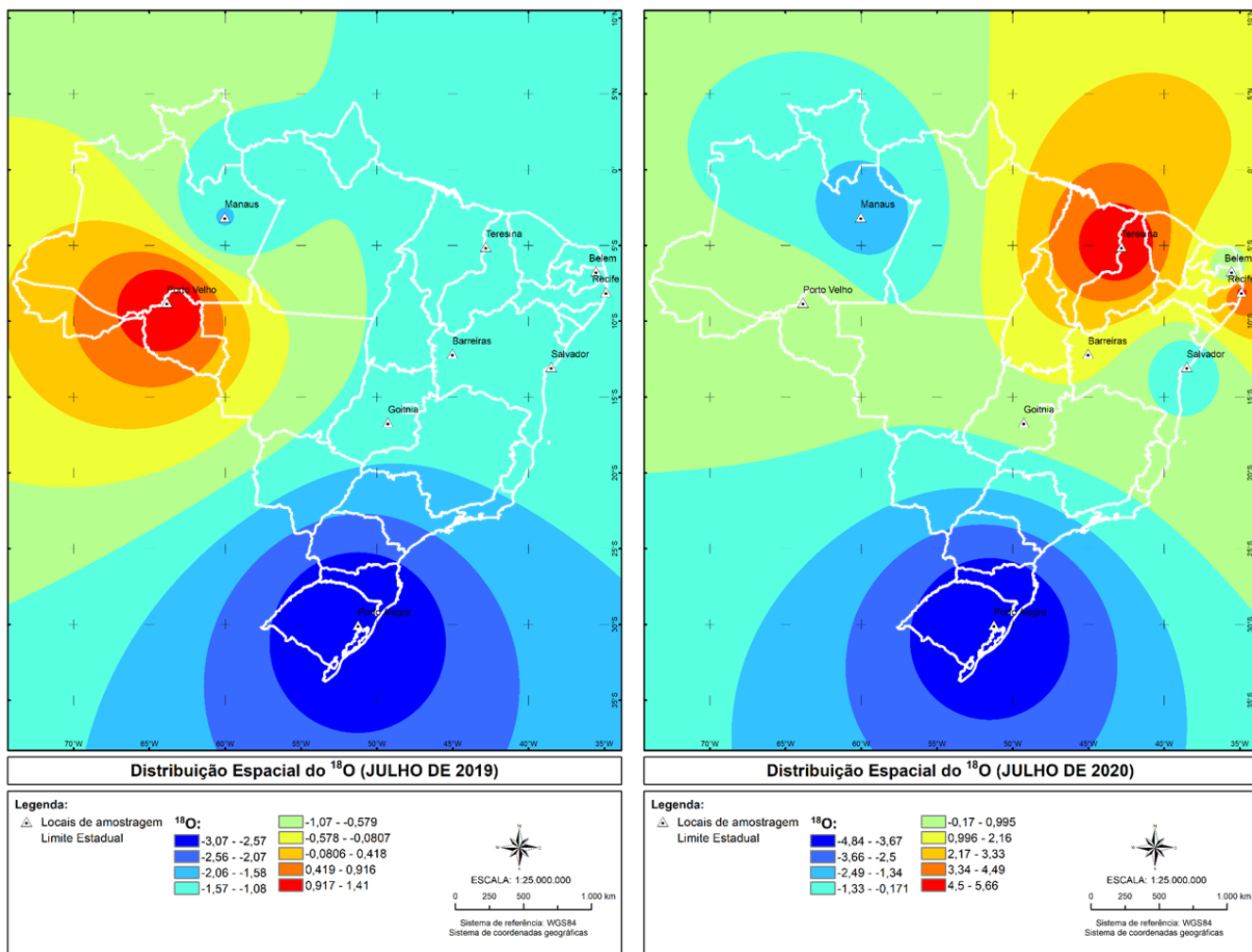


Figura 3. Distribuição Espacial de ^{18}O na Precipitação no Brasil - 2019 e 2020/Julho.

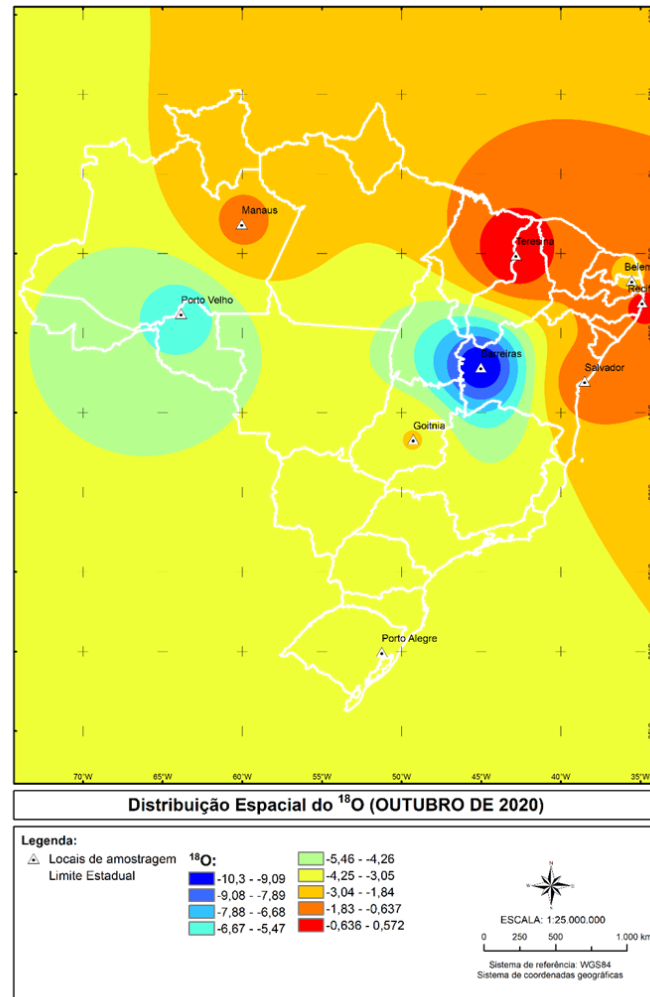
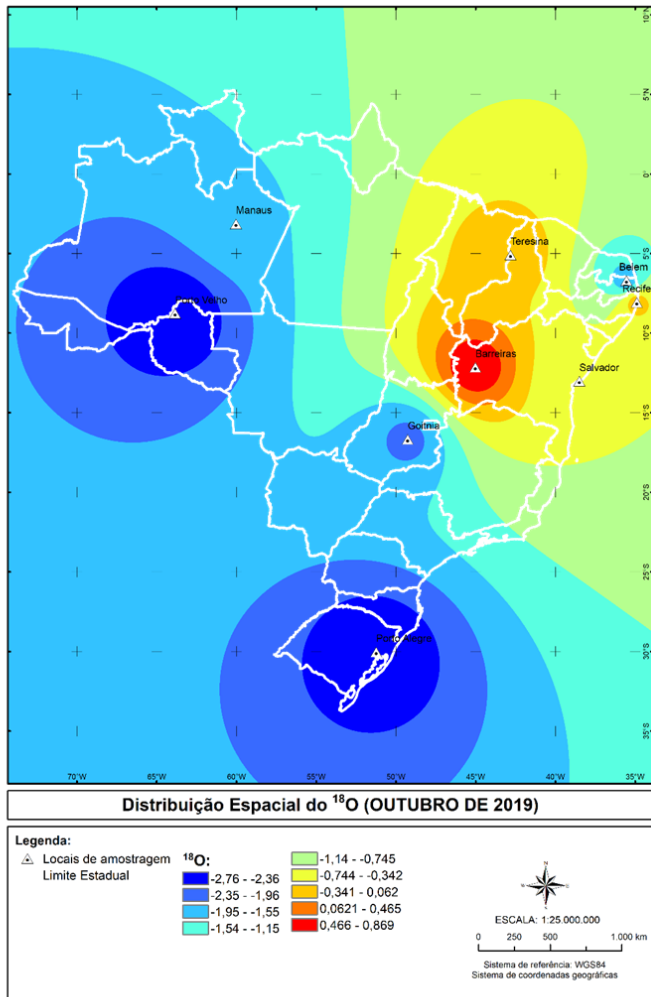


Figura 4. Distribuição Espacial de ^{18}O na Precipitação no Brasil - 2019 e 2020/Octubro.

Para o ano de 2023, estão previstas as seguintes atividades relacionadas a GNIP:

- ✓ Instalação de Estação GNIP em Santana do Livramento, Criciúma, Fortaleza, Fernando de Noronha, Roraima;
- ✓ Organização de Seminário Nacional sobre banco de dados isotópicos e repositório nacional;
- ✓ Organização de Seminário Latino-americano sobre Redes GNIP's;
- ✓ Incorporação das informações isotópicas das GNIP's no Atlas Isotópico Nacional.

2.2 GNIR

O SBG, de forma pioneira e ainda em caráter piloto, executa as ações de diagnóstico para montar a rede de monitoramento isotópica sistemática de rios no Brasil. Atualmente as ações se concentram nos Rios São Francisco, Coxins/Taquari e, para 2023-2024 estão previstas ações diagnósticas no Rio Amazonas.

2.2.1 GNIR Bacia do Rio São Francisco

A primeira campanha isotópica na Bacia do Rio São Francisco foi realizada na estação seca de 2021, conforme Relatório de Inovação 2021. As respectivas amostras foram processadas no Laboratório do Centro de Isótopos Estáveis da UNESP de Botucatu e os resultados foram entregues em novembro de 2022. A técnica analítica utilizada de espectrometria de massa com equipamento denominado Flash HT – Delta V. As imagens do equipamento podem ser visualizadas na Figura x. As incertezas analíticas fornecidas pelo laboratório foram de: $\delta^{2}\text{H}$ (‰) - Diferença relativa da razão isotópica ou valor- δ (incerteza $\pm 0,8\%$) e $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - Diferença relativa da razão isotópica ou valor- δ (incerteza $\pm 0,26\%$).

A respectiva campanha consistiu de um total de 100 amostras, sendo extraídas tanto no leito do canal principal do Rio São Francisco como de seus principais afluentes, desde a nascente até a foz.

Os resultados isotópicos foram interpolados espacialmente permitindo compor um mapa isotópico para a estação seca de 2021, tanto para ^2H como para ^{18}O . As figuras 5 e 6 ilustram este cenário.

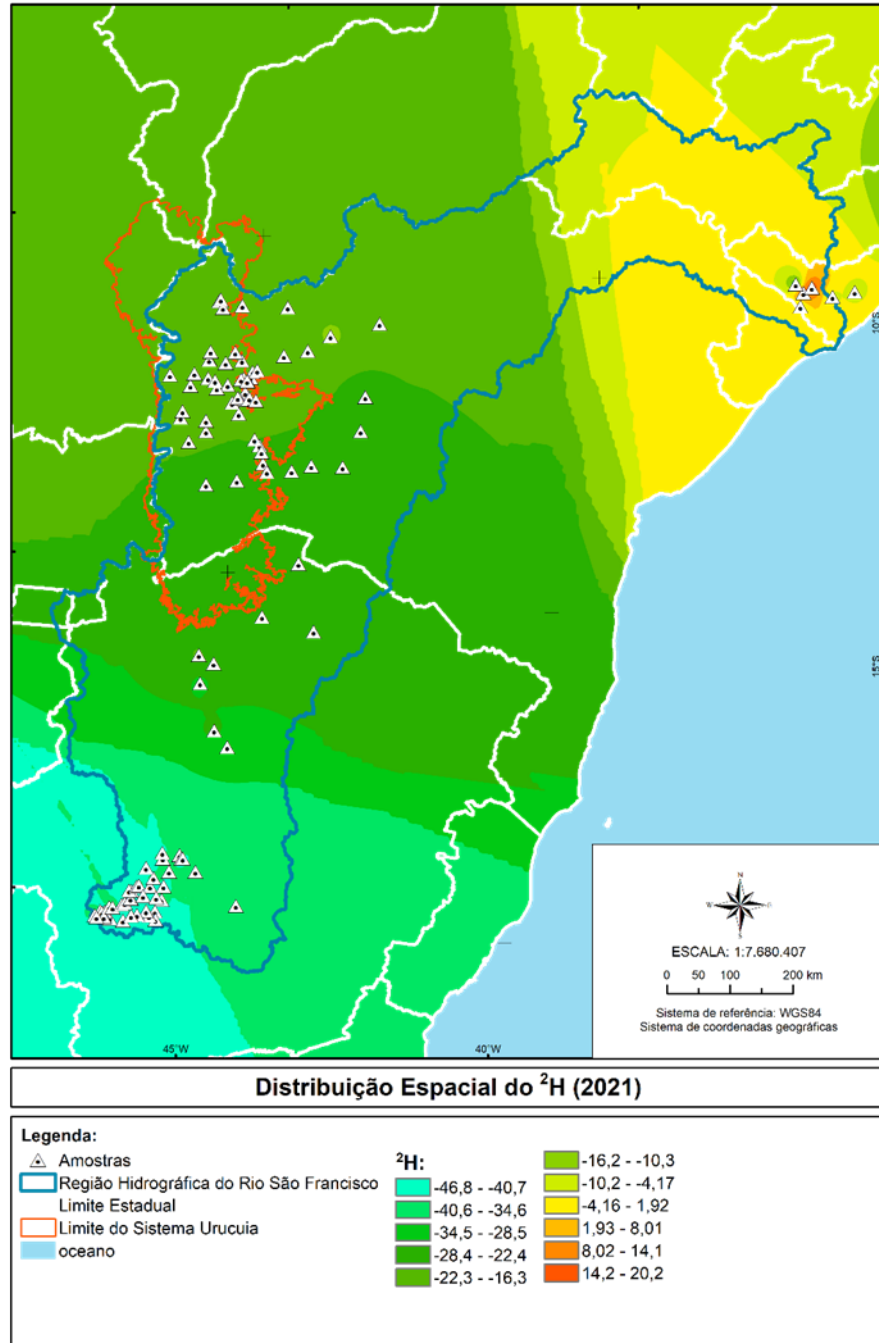


Figura 5. Distribuição Espacial de ^2H para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

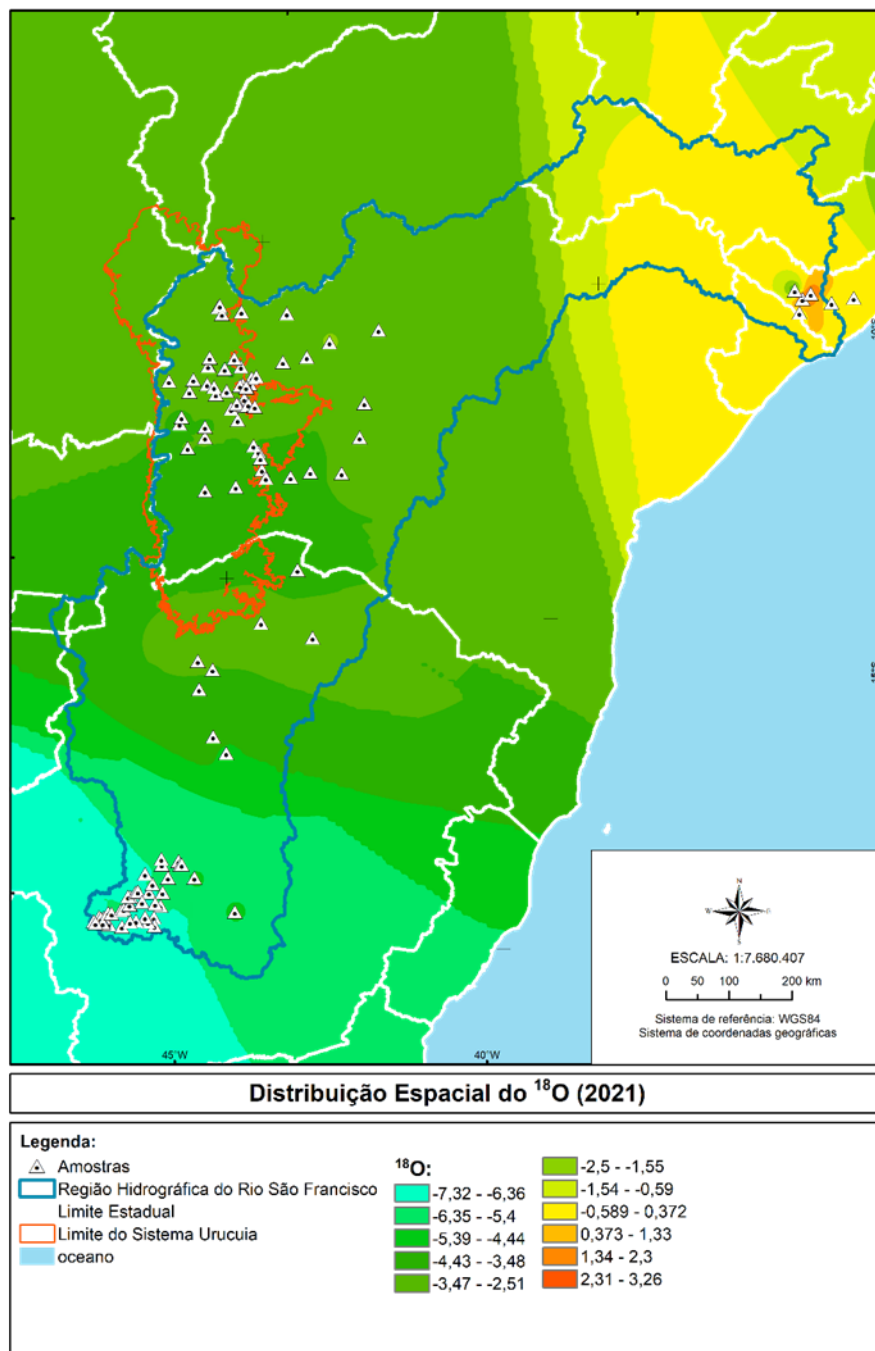


Figura 6. Distribuição Espacial de ^{18}O para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

Para o ano de 2023, estão previstas as seguintes atividades relacionadas a GNIR São Francisco:

- ✓ Execução da campanha da estação chuvosa, de preferência nos mesmos pontos amostrados na campanha da temporada seca;
- ✓ Análise laboratorial das respectivas amostras;
- ✓ Confecção do Produto de Caracterização Isotópica da Bacia do São Francisco e desenvolvimento do Manual de Monitoramento Isotópico do Rio São Francisco;
- ✓ Incorporação dos resultados no Atlas Isotópico Nacional.

2.2.2 GNIR Bacia do Rio Coxins

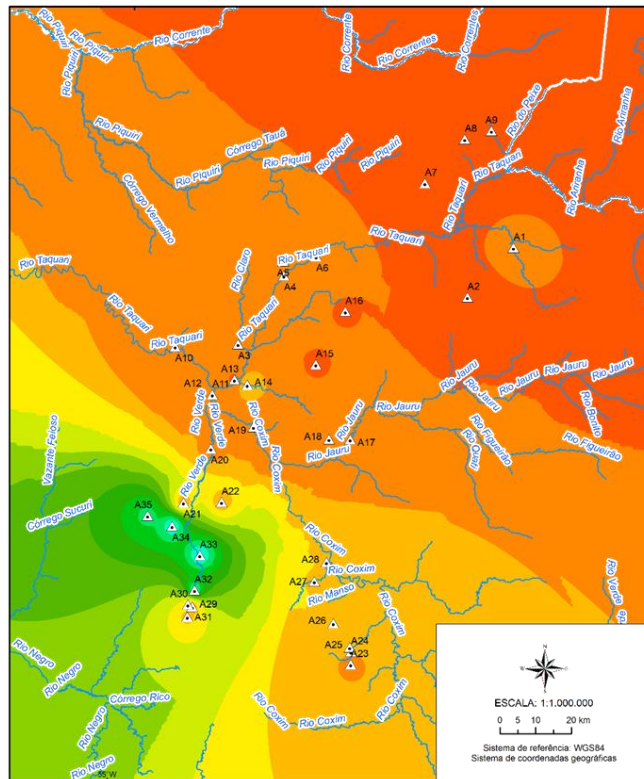
De forma análoga, foi realizada a segunda campanha isotópica na Bacia do Rio Coxins-Taquari (MS). Esta campanha foi executada por equipe de São Paulo e contemplou os mesmos 35 pontos distribuídos na calha principal e nos principais tributários da parte alta e média das drenagens já anteriormente amostrados na campanha de 2021. A Figura 7 ilustra a dinâmica das campanhas.



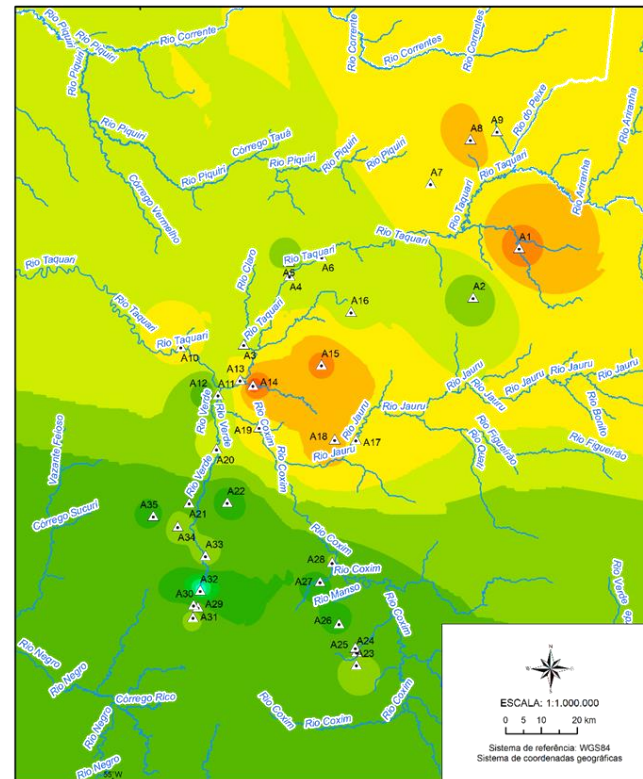
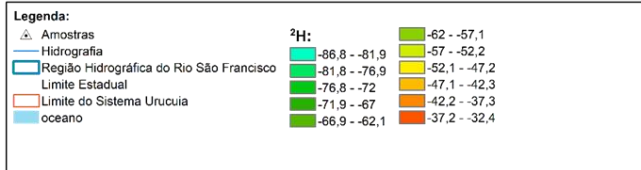
Figura 7. Imagens das Coletas Isotópicas no Rio Coxins-Taquari.

As respectivas amostras foram processadas no Laboratório do Centro de Isótopos Estáveis da UNESP de Botucatu e os resultados foram entregues em novembro de 2022. A técnica analítica utilizada de espectro com equipamento denominado Flash HT – Delta V. As imagens do equipamento podem ser visualizadas na Figura x. As incertezas analíticas fornecidas pelo laboratório foram de: $\delta^2\text{H}$ (‰) - Diferença relativa da razão isotópica ou valor- δ (incerteza $\pm 0,8\%$) e $\delta^{18}\text{O}$ (‰) - Diferença relativa da razão isotópica ou valor- δ (incerteza $\pm 0,26\%$).

Os resultados isotópicos foram interpolados espacialmente permitindo compor um mapa isotópico para a estação chuvosa de 2021 e estação seca de 2022, tanto para ^2H como para ^{18}O . As figuras 8 e 9 ilustram este cenário.



Distribuição Espacial do ^2H (2021)



Distribuição Espacial do ^2H (2022)

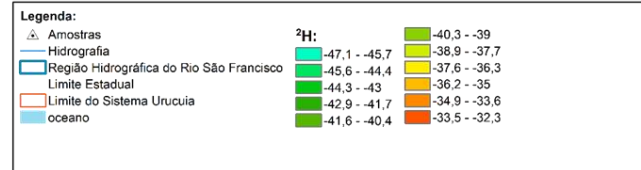


Figura 8. Distribuição Espacial de ^2H para o Rio Coxim

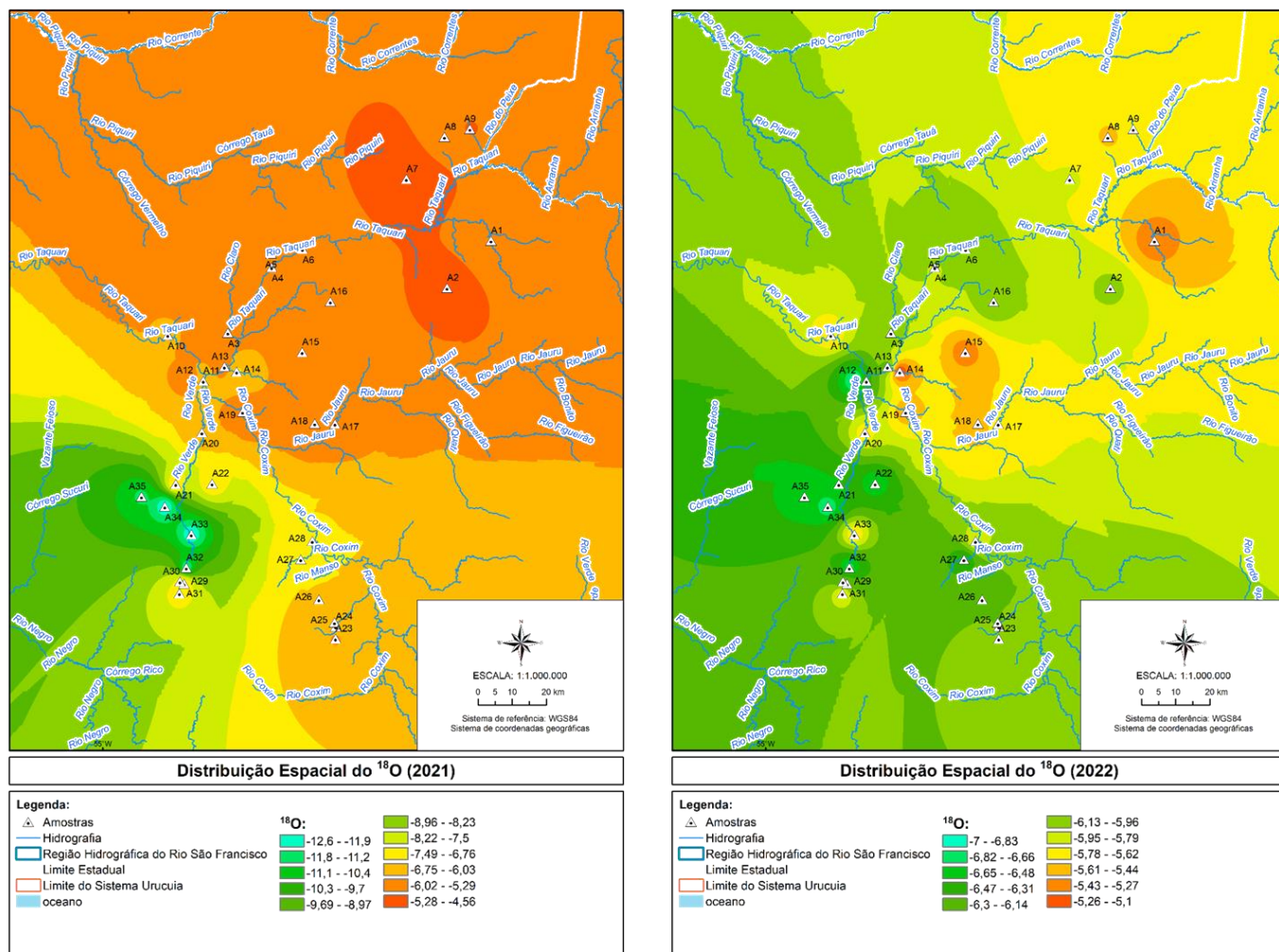


Figura 9. Distribuição Espacial de ^{18}O para o Rio Coxim

As seguintes conclusões preliminares podem ser extraídas dos respectivos mapas e resultados isotópicos:

Para o ano de 2023, estão previstas as seguintes atividades relacionadas a GNIR São Francisco:

- ✓ Confecção do Produto de Caracterização Isotópica da Bacia Coxins-Taquari e desenvolvimento do Manual de Monitoramento Isotópico do Rio Coxins-Taquari;
- ✓ Incorporação dos resultados no Atlas Isotópico Nacional.

2.3 PROJETOS DE PESQUISA

O Programa de Isotopia Aplicada a Hidrologia tem realizado enorme esforço em buscar parcerias e recursos financeiros para complementar aportes institucionais e com angariar oportunidades de pesquisa, inovação e aplicação de técnicas. Atualmente o Programa conta com um portfólio expressivo e contundente de pesquisas em andamento. Há uma orientação expressa na capacitação de colaboradores do SBG, assim como desenvolver resultados e técnicas que agreguem valor ao que o SBG realiza e que possam ser replicadas em todo o território nacional.

2.3.1 Contribuição ao Conhecimento dos Fluxos de Água na Sub bacia do Alto São Francisco Utilizando Isótopos Estáveis (H e O)

O presente projeto de pesquisa faz parte do Projeto GNIR de execução auspiciada pelo SBG e CEA-UNESP com recursos da AIEA. A componente relacionada as nascentes do Rio São Francisco, parte do estudo geral da Bacia do São Francisco, configura projeto de pesquisa de doutorado da aluna Marcela Aragão na UNESP de Rio Claro sob a orientação de Didier Gastmans (UNESP) e Roberto Kirchheim (SBG).

O Relatório parcial executivo elaborado para a AIEA é apresentado na íntegra no **Apêndice A.**

2.3.2 Caracterização Isotópica e Hidrodinâmica do SAG no Sul do Brasil

O presente projeto de pesquisa faz parte integrante do Coordinated Research Project (CRP) de Aplicação de Radioisótopos no Sistema Aquífero Guarani (SAG). Financiado pela AIEA e configura parte central do Projeto de Doutorado de Isadora Kuhn (SUREG-PA) junto ao IPH-UFRGS sob orientação de Pedro Reginato (IPH-UFRGS) e Roberto Kirchheim (SBG).

O Escopo básico deste projeto encontra-se na íntegra no **Apendice B**. O referido documento é complementado pelo plano de intercambio do tipo Sanduiche da pesquisadora junto a AIEA em Viena.

A Figura 10 identifica a localização das águas de SAG amostradas enquanto a Figura 11 ilustra a dinâmica de campo na toma de amostras isotópicas.

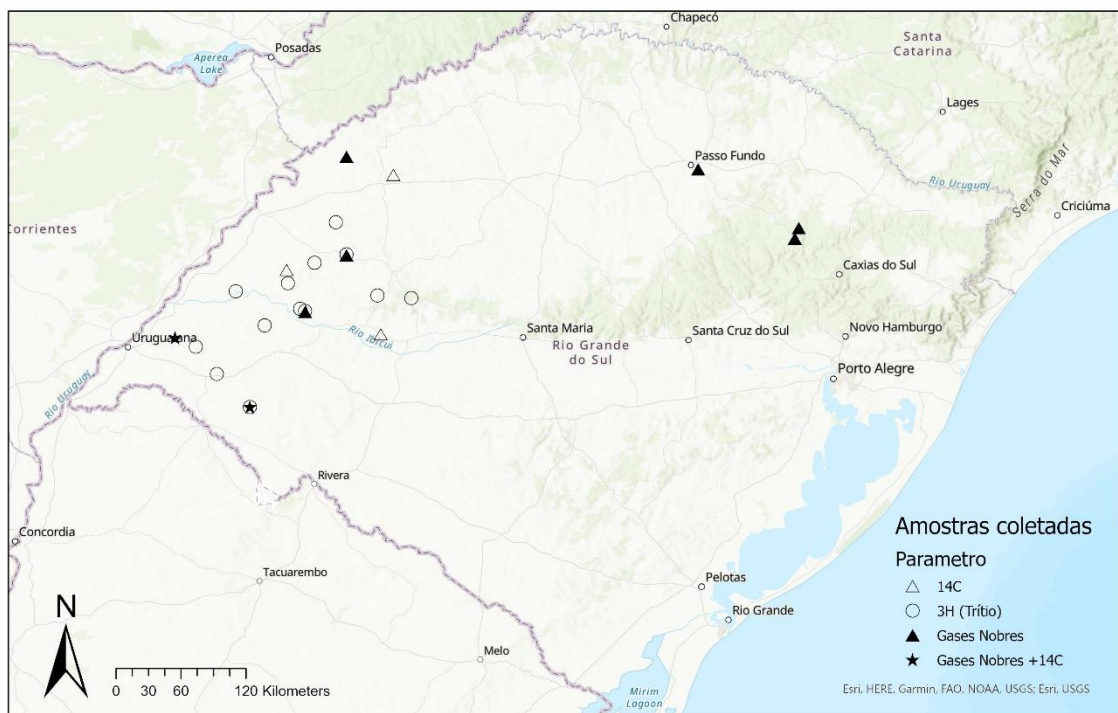


Figura 10. Mapa de Localização das Amostras Radioisótopos no SAG do RS.

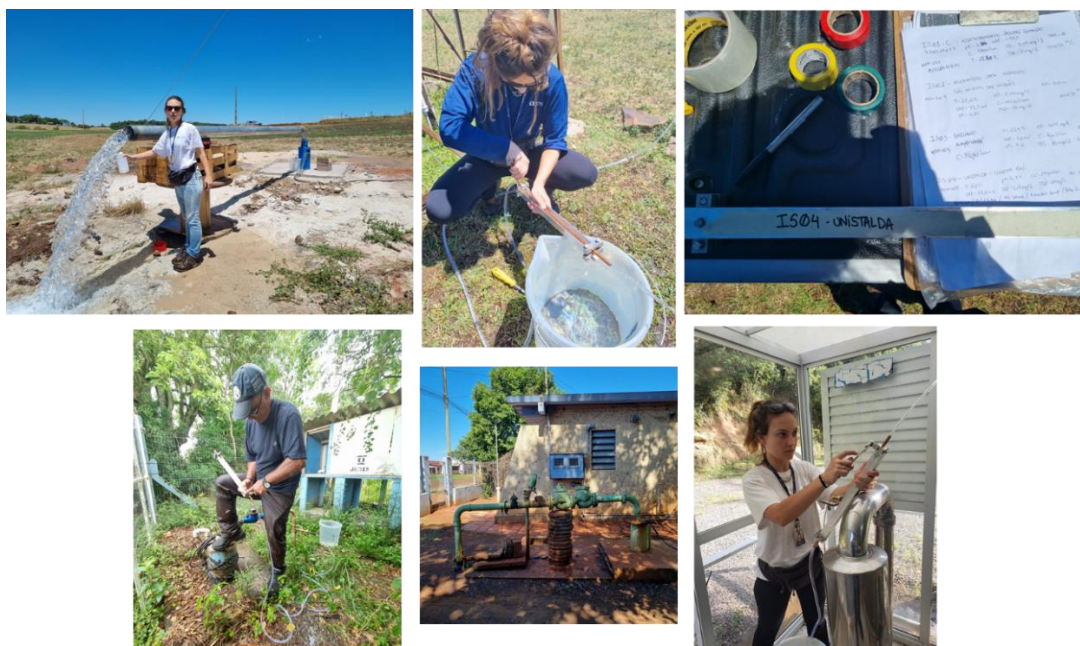


Figura 11. Dinâmica das Coletas Isotópicas de Campo.

2.3.3 Caracterização Isotópica e Hidrodinâmica do SAB no Sudeste do Brasil

O presente projeto de pesquisa é um detalhamento das informações isotópicas geradas para os poços de monitoramento do RIMAS no Sistema Aquífero Bauru e do monitoramento de água de chuva na mesma região. Este projeto é o escopo principal do Doutorado de Andrea Franzini (SUREG-SP), desenvolvido na UNESP de Rio Claro sob orientação de Didier Gastmans (UNESP) e Roberto Kirchheim (SBG). O projeto de pesquisa aprovado pela CTC do SBG encontra-se no **Apêndice C**.

2.3.4 Técnicas de Multitraçadores Isotópicos Aplicada a Compreensão de Áreas Úmidas

O presente projeto é um *Coordinated Research Project* (CRP), o qual foi adjudicado pela AIEA por mérito (em competição mundial) ao Programa de Isotopia do SBG. A iniciativa trata da avaliação isotópica dos impactos das mudanças climáticas e hidrológicas nas interações entre os ecossistemas de zonas úmidas e águas subterrâneas. Para tanto se utiliza de técnicas de Multitraçadores Isotópicos aplicadas ao entendimento da dinâmica hídrica de Zonas Úmidas de forte interação entre águas subterrâneas e superficiais. A proposta

submetida a AIEA denomina-se *Multitracing Techniques assesment on understanding the water dynamics in the Wetlands ("Pantaninho") of the Tietê River Basin, Brazil* e encontra-se na íntegra no **Apêndice E**. A execução deste projeto se inicia em 2023, sendo operado desde a GEHITE da SUREG-SP. O mesmo prevê o uso de técnicas isotópicas diversas, entre elas o uso do traçador Radônio e Gases Nobres. O equipamento RAD07 está sendo comprado via importação direta para ser usado de forma pioneira nesta região, antes de ser aplicado em outros projetos do SBG. Em junho de 2022, ocorreu a primeira reunião de lançamento do CRP na AIEA em Viena e o SBG se fez presente (Figura 12 e 13).



Figura 12. Representantes de Grupos de Pesquisa em Isotopia Aplicada a Wetlands.



Figura 13. Dinâmica da Reunião do CRP na AIEA em Viena

O presente projeto é um Coordinated Research Project (CRP), o qual foi adjudicado pela AIEA por mérito (em competição mundial) ao Centro de Estudos Ambientais da UNESP com parceria científica do Programa de Isotopia do SBG. A iniciativa trata da Variabilidade Isotópica da Chuva como forma de Avaliar Impactos de Mudanças Climáticas. O título da Pesquisa é *Multiscale Controls and Cloud Processes Related to Variations on Precipitation Isotopic Composition of Precipitation in Southeastern Region of Brazil*. Este projeto encontra-se em seu terceiro ano executivo e baseia-se no monitoramento isotópico intraeventos acoplado técnicas de radar na compreensão da dinâmica cinética de formação de nuvens. A pesquisa constitui elemento central na tese do aluno da UNESP Vinícius dos Santos. A Figura 14 ilustra o artigo científico recentemente publicado (2022) em revista internacional de prestígio. O **Apêndice E** fornece as informações sistematizadas em 2022.

• Original Paper •

Distinguishing the Regional Atmospheric Controls on Precipitation Isotopic Variability in the Central-Southeast Portion of Brazil

Vinícius dos SANTOS¹, Peter MARSHALL FLEMING², Luís HENRIQUE MANCINI³,
Stela DALVA SANTOS COTA², Grazielle Beatriz de LIMA¹,
Rafaela RODRIGUES GOMES¹, Roberto Eduardo KIRCHHEIM⁴,
Ricardo SANCHÉZ-MURILLO^{5,6}, and Didier GASTMANS¹

¹São Paulo State University (UNESP), Environmental Studies Center, Av. 24A, Bela Vista,
1515 – Bela Vista, 13.506-900, Rio Claro (SP), Brazil

²Center for the Development of the Nuclear Technology (CDTN – CNEN), Av. Presidente Antônio Carlos,
6.627, Campus da UFMG – Pampulha, 31270-90, Belo Horizonte (MG), Brazil

³Universidade de Brasília – UnB, Instituto de Geociências, Laboratório de Isótopos Estáveis,
Campus "Darcy Ribeiro", Asa Norte, 70.910-900, Brasília (DF), Brazil

⁴Hydrology and Territorial Management Directory (DHT), The Geological Survey of
Brazil (CPRM-SGB), São Paulo (SP), Brazil

⁵University of Texas at Arlington, Earth and Environmental Sciences Department,
500 Yates Street, Arlington, Texas, 76019, USA

⁶Stable Isotopes Research Group and Water Resources Management Laboratory,
Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

(Received 15 September 2021; revised 20 January 2022; accepted 15 February 2022)

ABSTRACT

Precipitation isotope ratios (O and H) record the history of water phase transitions and fractionation processes during moisture transport and rainfall formation. Here, we evaluated the isotopic composition of precipitation over the central-southeastern region of Brazil at different timescales. Monthly isotopic compositions were associated with classical effects (rainfall amount, seasonality, and continentality), demonstrating the importance of vapor recirculation processes and different regional atmospheric systems (South American Convergence Zone-SACZ and Cold Fronts-CF). While moisture recycling and regional atmospheric processes may also be observed on a daily timescale, classical effects such as the amount effect were not strongly correlated ($\delta^{18}\text{O}$ -precipitation rate $r \leq -0.37$). Daily variability revealed specific climatic features, such as $\delta^{18}\text{O}$ depleted values ($\sim -6\text{‰}$ to -8‰) during the wet season were associated with strong convective activity and large moisture availability. Daily isotopic analysis revealed the role of different moisture sources and transport effects. Isotope ratios combined with d -excess explain how atmospheric recirculation processes interact with convective activity during rainfall formation processes. Our findings provide a new understanding of rainfall sampling timescales and highlight the importance of water isotopes to decipher key hydrometeorological processes in a complex spatial and temporal context in central-southeastern Brazil.

Key words: precipitation, stable water isotopes, d -excess, moisture source and transport, southern Atlantic Ocean and Amazon

Citation: dos Santos, V., and Coauthors, 2022: Distinguishing the regional atmospheric controls on precipitation isotopic variability in the central-southeast portion of Brazil. *Adv. Atmos. Sci.*, **39**(10), 1693–1708, <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1367-0>.

Article Highlights

- A significant correlation was observed between monthly precipitation amounts and $\delta^{18}\text{O}$ values ($r \geq 0.60$).
- Strong daily $\delta^{18}\text{O}$ correlations ($r \geq 0.50$) were associated with regional meteorological features such as OLR.
- Air mass back trajectories and d -excess values ($>13\text{‰}$) showed the role of the Amazon Forest on moisture recirculation and availability.
- Our results indicate the major importance of convection activity ($r = 0.65 - \delta^{18}\text{O}$ -OLR) and moisture availability ($r = -0.66 - \delta^{18}\text{O}$ -Precipitable Water) controlling rainfall generation and the isotopic variability.

* Corresponding author: Didier GASTMANS
Email: didier.gastmans@unesp.br

Figura 14. Artigo em Coautoria em Revista de Excelência (Advances in Atmospheric Sciences, 2022).

2.3.5 Projeto de NTC (National Technical Cooperation) Uso de Radioisótopos para Determinação de Idades de Águas Subterrâneas

O presente projeto foi adjudicado como ganhador de recursos do mecanismo de Cooperação Técnica Nacional junto da AIEA em pleito coordenado pela CNEN-Brasil. O escopo da proposta pode ser apreciado no Quadro 4 abaixo; todo os anexos desenvolvidos pelas equipes do Programa de Isotopia do SBG encontram-se dispostos no **Apêndice F**. O escopo básico desta proposta é a aquisição com recursos da AIEA de um espectrômetro de massa de campo para determinação isotópica em aquíferas com águas antigas no Brasil. Trata-se do primeiro equipamento a ser usado no contexto das Américas, representando um passo a mais na vanguarda do conhecimento.

Quadro 4. Formulário padrão de Projeto

National Project Document Template¹

Country Name	Brasil
Priority No.	
Project Title	<i>Use of radioisotopes in the determination of groundwater ages</i>
Project Duration	<i>The project was designed to start in the first quarter of 2024 and last for 2 full years, ending in the last quarter of 2025.</i>
Field of Activity	<i>Please refer to the list of FoAs and select as appropriate.</i>
Sustainable Development Goal	<i>Please refer to the Country Programme Framework and the Reference Guide for Project Teams on linking IAEA TC projects with the SDGs.</i>
Counterpart Institution(s) (starting with the institution that will lead and host the project)	The Geological Survey of Brazil – SGB – Leader of the Project University of the São Paulo State – UNESP University of the State of Minas Gerais – UFMG University of Sao Paulo – USP University of the State of Rio Grande do Sul - UFRGS
Names and contact details of responsible Project Counterpart(s) (starting with the main CP)	Roberto Kirchheim – roberto.kirchheim@cprm.gov.br (Main CP) <i>Didier Gastmans</i> – Didier.gastmans@unesp.br <i>Paulo Galvão</i> – hidropaulo@gmail.com <i>Veridiana de Souza Martins</i> – veridian@usp.br <i>Pedro Antônio Roehe Reginato</i> – pedro.reginato@ufrgs.br
Project Description/Abstract (max 300 words)	<i>The Geological Survey of Brazil, with the support of research partners, has planned to use the equipment called field spectrometer for gases to carry out measurement campaigns in 04 regional aquifer systems in the national territory. The use of this technique allows estimating groundwater residence times. This information is considered essential for the management of groundwater resources and for this reason, it needs to be brought to the attention of state and national management bodies, as well as civil society and basin committees. In addition to a robust component of scientific capacity generation, through visits, expert missions and exchanges, the project has a close interaction with public policies. Its main objective is to guarantee the sustainability of underground reserves in a scenario of exponential use of resources.</i>

SECTION 1: PROJECT BACKGROUND AND JUSTIFICATION

Problem to be addressed	<i>The need to improve the management of water resources is a global agenda, directly associated with several of the global sustainability development goals (SDG's). The demands are growing, imposing constant challenges and requiring concrete responses. In the national territory, conflict situations have been frequently reported, as well as the effects of extreme climatological events. Groundwater represents for more than half of the Brazilian population and a good part of industrial and agricultural enterprises the solution to meet their demands. However, there are huge gaps in knowledge about the dynamics of their circulation, information that is essential for the effective and sustainable management of these resources. One of the most important variables concerns the residence time of these waters in the aquifer systems, that is, the age of the groundwater. It is precisely this variable that provides dynamic information about the systems, allowing for projections, zoning and modelling of future uses.</i>
--------------------------------	--

¹ All project documents must follow the editorial guidance provided on PCMF Reference Desk. The overall objective, project duration, budget, project description/abstract, problem to be addressed, stakeholders, partnerships, role of nuclear technology and the LFM up to outputs is published on GOVATOM.

	<p>The management of groundwater is subject to state jurisdiction through the State Water Resources Management Bodies, and the National Water Agency (ANA) is responsible for formulating national policies and guidelines. Brazil shares transboundary aquifers of enormous strategic importance, namely the Guarani Aquifer System-SAG (which has an international management agreement signed by the Brazilian Government) and the Amazon Aquifer System. In addition to the aforementioned systems, the country has a number of other important aquifers where groundwater age determination becomes essential.</p> <p>Brazil, through the Geological Survey of Brazil (through its Program for Isotopic Applications in Hydrology) in partnership with Research Excellence Centers (UNESP) has been conducting research in using radioisotope techniques for the dating of groundwater considered very old. (ages over 40,000 years). Since 2010, these institutions have been supported by the IAEA, through CRP's for the development and improvement of techniques (CRP Code F3006 CRP Title: Characterization of fossil groundwater systems using long-lived radionuclides). This is a pioneering effort on the world scenario that has generated significant results, such as the dating of the SAG waters, from recent waters to almost 1,000,000 years. (Annex I -Paper presented in UNESCO Conference 2021) The impact of this zoning on management is immensely relevant as it allows us to clearly state in which regions these resources can be considered finite fossils. These are high-cost techniques that depend on the analytical facilities that exist only in few places in the world, including the IAEA's own laboratories. The IAEA itself suggests using the latest portable field equipment for the determination of noble gases and isotopes, such as field mass spectrometers, with which one could avoid costly logistical and analytical costs and accelerate the transformations of concentrations into ages. This technique was developed by the IAEA and incorporated through formal training into the SGB (EVT 1805502 - Training Course on the Use of Noble Gases in Hydrological Studies, 05-09 November 2018 and EVT1905572: Training Course on the Use of Noble Gases in Hydrological Studies - Virtual, 11 to 14 October 2021).</p> <p>The SGB, through the Isotopy Program mentioned above, has the status of a Formal Collaboration Centre of the IAEA for the dissemination of isotopic practices in hydrology with a mission to propagate these practices within the Americas (Formal Agreement in Annex II). The present project is supported by the state-of-the-art know-how acquired by the SGB with the auspices of the IAEA in dating techniques. The purchase of the aforementioned field mass spectrometer allows the expansion of the use of these techniques for the benefit of other aquifer systems in the country, as well as the dissemination and training of the techniques in neighbouring countries. It will be the first equipment in operation in the Americas, which is consistent with the country's leading and leading role in isotopic applications in hydrology.</p>
<p>Stakeholders</p>	<p>The aquifers targeted by this project cross more than one national state and, therefore, this knowledge provided is of direct interest to the federal management body (National Water Agency-ANA), as well as to the State management bodies at the national level. The level of knowledge about groundwater is low within civil society, starting with the basin committees. The information generated by this project meets a demand from these committees and their representatives and will be fundamental to discipline and improve the discussions around the topic of groundwater.</p> <p>At the same time, in some cases these same aquifers are shared by more than one country and, therefore, this information is fundamental for shared management involving, in many cases, international institutions such as UNESCO UNDP and supranational organizations such as ACTO (Amazon Cooperation Treaty Organization).</p> <p>As it is a project based on synergistic partnerships with research institutions in the country, the actions developed during its execution will positively affect the strengthening of these research centres, generating opportunities for many researchers. See Annex III.</p>

Partnerships	<i>The SGB is the only science and technology institution in Brazil that has expertise in the use of this technique and, as a National Geological Service, it has the intrinsic mission of generating and disseminating geoscientific information in the country. In addition to making data publicly available, which is part of its governance policy, the SGB works in partnerships with numerous scientific institutions in the field of isotopic applications. Several research groups in the country, such as UNESP, USP, UFMG, UFRGS are partners in activities even promoted by the IAEA itself, such as the GNIP, GNIR networks and other research CRPs. The presence of a field mass spectrometer in the SGB Isotopic Applications Program represents the concrete possibility of supporting research to all interested research groups that demand this information. Part of the mission as a Collaborative Centre is the dissemination through training to partnerships of these practices at a national and continental level. See Annex IVa, IVb, IVc and IVd.</i>
Role of Nuclear Technology and IAEA	<i>The technique to be used in the estimation of residence times is based on the analytical determination of noble gases and their isotopes, commonly referred to as being very suitable for very old waters. Analytical determination is performed using mass spectrometers. The use of portable field spectrometers makes the entire process faster and less expensive, as all the transport and dispatch of aliquots from Brazil to the IAEA partner laboratories is avoided. These isotopic tracers are considered the most appropriate and irreplaceable in the function of determining residence times of very old waters. The IAEA was the main driver of the pioneering diffusion of this technique in Brazil and provided incremental resources, in addition to national counterpart resources, to achieve national expertise. The IAEA's role as a catalyst in this regard can be clearly stated, culminating in the selection of the SGB as a Collaborative Centre for the dissemination of these techniques. See Annex V.</i>

SECTION 2: PROJECT DESCRIPTION

Overall Objective	<i>By generating robust, pioneering and optimized information, SGB and partners aim to improve knowledge of selected aquifers in order to favour greater sustainability of the groundwater resources. By doing so, stakeholders and researchers will be trained and strengthening of the water resources management system will happen. See Annex VI</i>
Outcome (Project Specific Objective)	<i>Development of innovative radiogenic methodologies applied to groundwater. The information on water residence times (ages of the groundwater) are highly demanded for the understanding of the groundwater dynamics within regional aquifer systems allowing better management practices. See Annex VI</i>
Performance Indicator(s)	<i>Actual baseline starts from a current scenario where this age information simply does not exist for the aquifer systems considered. Through the use of the mentioned equipment, essential data for management will be generated. Their incorporation into the groundwater management structure at the national and state level becomes the main executive indicator. This incorporation will be supported by a series of documents, databases and training for managers, representatives of basin committees and associated researchers.</i>
Project Logical Framework Matrix (LFM)	<i>Logical Framework Matrix (Appendix A).</i>
Physical Infrastructure and Human Resources	<i>The Geological Survey of Brazil has offices and technical representations in all states of the country, including hydrogeologists, hydrologists, hydrology technicians who are duly trained and accustomed to conventional collection and measurement protocols. All logistical facilities for field cars and other field equipment are available and functional for any area of the country. Likewise, the SGB has a chemical analytical park</i>

	<i>for the determination of major and minor elements in waters accredited by INMETRO. It should be noted that the SGB carries out the official hydrochemical conferences and certifications of the country's mineral waters. The specific techniques involving radioisotopes and the use of the field mass spectrometer are the expertise of two technicians with a PhD in hydrogeology trained by the IAEA itself. The activities foreseen in this project will involve 30 technicians from the SGB, either in conducting field collections or in systematization, including participation in training courses.</i>		
Sustainability	<i>The sustainability of the project and its continuity derives from the institutional robustness of the SGB and its explicit mission to generate knowledge about the dynamics of groundwater in the country. The SGB has an Isotopic Applications Program, with its own cost center, which welcomes the initiatives of this project. Currently, SGB has technicians who were trained at the IAEA in the techniques and use of the referred equipment. This equipment was designed to be used in loco and, in addition to having a relatively low cost, it is easy to handle. The SGB is a reference institution that has more than 100 hydrogeologists capable of working in any aquifer system in the country. Technical training activities are usual and are part of the indicators of individual and collective goals of the SGB.</i>		
Safety and Regulatory Compliance	<i>The use of the aforementioned mass spectrometer does not pose a risk to health and only requires adequate transport and handling conditions, which are already commonplace and inherent to the other water collections carried out by the SGB in its multiple initiatives. Furthermore, the SGB has trained professionals to handle the systems and use the information to generate the desired results.</i>		
Cross-cutting issues: Environment	<i>The execution of this project does not pose any risk to the environment and does not entail any externalities.</i>		
Cross-cutting issues: Gender	<i>The gender issue affects the equitable composition of research teams, as well as the equal distribution of opportunities for fellowships and technical visits. Likewise, this parity is part of the strategy for composing the groups of beneficiaries of qualification and training events in general.</i>		
Funding and project budget estimate	<i>Provide an estimate of the total project costs and the funding expected from each stakeholder:</i>		
		Euro	Comment
	<i>Government cost-sharing including Counterpart Institution(s)</i>	146.000	<i>Salaries, travel, per diem and in kind contributions</i>
	<i>Other partners</i>		<i>Clearly specify partner and contribution to the project</i>
	<i>IAEA TCF:</i>		
	<i>FE/SV/TC/Meetings</i>	59.850	<i>05 Fellowships/10 Scientific Visits</i>
	<i>Experts</i>	10.500	<i>02 Experts</i>
	<i>Equipment</i>	64.000	<i>Field Spectrometer for Gases</i>
	<i>TOTAL</i>	<i>280.350</i>	

SECTION 3: IMPLEMENTATION ASPECTS

Implementation Strategy	<ul style="list-style-type: none"> <i>Describe the workplan. What steps will be taken to achieve the expected results?</i> <i>Include all activities required to achieve project outputs, not just activities implemented with IAEA inputs (eg local contributions such as field</i>
--------------------------------	--

	<p>work or sampling activities). Specify the required sequence of project milestones to ensure the correct implementation of the project.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Implementation Readiness: Provide comments on early planning and consultations to ensure timely delivery of equipment. Is there any infrastructure upfront work needed for any equipment request prior to delivery and installation? If so, describe/define who will act for the upfront work.²</i> • <i>Any risks to implementation associated with inputs should be included in the risk assessment (see section below).</i> • <i>Describe overall management roles and responsibilities, leadership, and practical arrangements.</i> • <i>Clearly indicate in this section if a source is being used and/or procured.</i>
Monitoring and Progress Reporting	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Describe the monitoring plan and mechanisms. How will the project collect and analyse data to submit mandatory TC-reports https://tcreports.iaea.org/</i> <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Project Progress Assessment Report (PPAR) annually</i> ○ <i>Project Achievement Report (PAR) at project end</i> • <i>Specify the means of verification used to track progress (ensure coherence with LFA), and describe if any national statistics, secondary sources or data triangulation can be used to report. Make use of relevant Agency systems and databases as sources for monitoring data.</i> • <i>Describe how project assumptions and risks will be monitored to ensure that they do not hamper project implementation. Refer to the risk management section below for mitigation actions to be taken if these occur.</i>
Lessons Learned	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Does this project build on any lessons learned from past experience and projects in this area?</i> • <i>Include lessons learned, good practices and relevant monitoring findings gathered from assessments, evaluations and monitoring tools to inform the design of the new project.</i>
Risk Management Risk Management E-Learning Course available	<ul style="list-style-type: none"> • <i>The project team is responsible for identifying, assessing, mitigating and monitoring risks throughout the project life cycle.</i> • <i>Describe potential risks that could affect or hamper overall project implementation, including all risks associated with inputs, as described in the implementation strategy above. Assess the probability of occurrence and the severity of their impact on the project outcome. Also identify mitigation measures to be implemented in case that these risks do materialize.</i> • <i>Consider a wide range of risks including strategic, political, environmental, financial, operational, organizational, stakeholder and regulatory risks. Examples are changes in national policies/priorities, institutional restructuring, reallocation of resources and/or budget reduction. The latter also includes the shift of a significant component of the project budget into a footnote-a/ component.</i> • <i>Ensure that the assumptions reflected in the LFA are noted here in the risk management section.</i>

SECTION 4: WORKPLAN

--	--

² [Checklist Counterpart Role and Responsibilities in the TC Procurement Process](#)

Project Workplan	<i>Complete the workplan (Appendix B) and indicate below additional relevant information, if any.</i>
-------------------------	---

2.3.6 Projeto de Pesquisa de Aplicação de Técnicas Isotópicas de Gases Nobres em Geologia Marinha

As técnicas de amostragem isotópica para gases nobres em águas subterrâneas e todo o conhecimento adquirido no desenvolvimento da Tese de Doutorado de Roberto Kirchheim foi utilizada nos estudos de geologia marinha no decorrer da Missão para Elevação de Rio Grande no Oceano Atlântico. Amostras de água saturadas em gases foram amostradas a profundidades de mais de 1500m a partir da superfície da lamina de água. A intenção é realizar análises isotópicas de gases nobres e com isso determinar assinaturas de processos crustais e ou mantélicos. A Figura 15 ilustra a dinâmica das coletas realizadas durante a missão marinha.





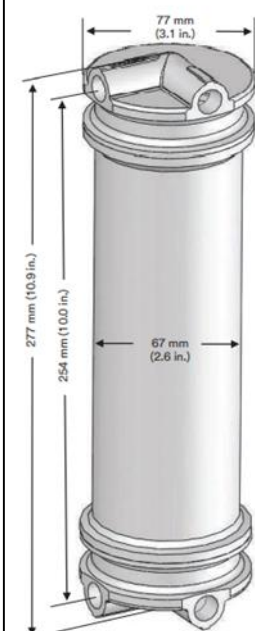
Figura 15. Coletas de Águas Saturadas em Gases no Fundo Marinho.

2.4 EQUIPAMENTOS

Durante o ano de 2022, importantes passos foram alcançados para conseguir edificar capacidades isotópicas analíticas mínimas. O Quadro 5 abaixo sumariza o estado da arte destas ações. Vale ressaltar que por trás de cada gestão de compra e ou aquisição de equipamento específico, reside todo um arsenal de informações e pesquisas de retaguarda, esforço considerado como produto de alto valor agregado no âmbito de pesquisa e inovação.

Quadro 5. Sumário das ações relacionadas ao aumento das capacidades analíticas

Ação	Descrição/Perspectivas	Características/Figura
------	------------------------	------------------------

<p>Assinatura do Contrato de Entrega do Espectrômetro de Massa para Estáveis em Água via Projeto Meta – Banco Mundial MME.</p>	<p>Perspectiva de Operação para 2023. Localização Lamin SUREG-SP. Espectrômetro de Massa do tipo Los Gatos. (Adquirido com recursos do MME-Banco Mundial). Fabricação AB, França.</p>	<p>Enhanced Performance Benchtop Triple Liquid Water Isotopic Analyzer</p> 
<p>Importação direta CNPQ de Medidor de Radônio</p>	<p>Perspectiva de Operação para 2023. Uso Pioneiro no CRP Wetlands. Equipamento RAD07 (Adquirido com recursos de investimento do CC Isotopia). Fabricação DurrIDGE exclusiva Inglaterra.</p>	
<p>Importação direta CNPQ de Membrana Contratora</p>	<p>Perspectiva de Operação para 2023. Peça fundamental para construção de Extrator de Gás em estudos isotópicos. (Adquirido com recursos de investimento do CC Isotopia). Fabricação 3M exclusiva nos USA.</p>	

<p>Aquisição de Espectrômetro de Massa de Campo para Gases Nobres – via Cooperação (doação) Nacional com AIEA</p>	<p>Primeiro Espectrômetro das Américas. Locado na SUREG-SP com uso previsto em 2024 para aquíferos no Brasil e países vizinhos. MiniRueddi marca Gasometrix fabricado na Suíça.</p>	
---	---	--

Fonte: Elaborado pelos Autores.

2.5 PRÓXIMOS PASSOS

Fica evidente a riqueza em termos de ações, articulações e execução do Programa de Isotopia. Muito dos próximos passos já foram demarcados no Quadro 1, referente ao Marco Lógico Geral do Centro Colaborativo e Programa de Isotopia, que aliás são absolutamente sinérgicos. Cada um dos projetos de pesquisa elencados possui ações que precisam ser realizadas no decorrer do ano de 2023. Muito além de enumerá-las, serão trazidas à tona aquelas atividades consideradas estratégicas e nevrálgicas para o sucesso e sustentabilidade do Programa.

1. Seguir assumindo postura de vanguarda e liderança nas ações isotópicas aplicadas a recursos hídricos no Brasil e no Continente (até pelo mandato que temos junto a AIEA como Centro Colaborativo);
2. Seguir nucleando a REDE GNIP no Brasil;
3. Organizar o primeiro Seminário Nacional e Continental sobre Redes de Monitoramento Isotópico;
4. Organizar o Seminário e Painel sobre Aplicações Isotópicas no Congresso Nacional de Recursos Hídricos, através da liderança do Grupo Temático de Águas Subterrâneas junto a ABRH;
5. Seguir realizando articulações políticas e técnicas com a CNEN, Missão Permanente do Brasil junto a AIEA;

6. Participar ativamente com representação e trabalhos no Simpósio de Isotopia da AIEA em Viena;
7. Estabelecer Acordos de Cooperação com Parceiros Latinos e Laboratórios Analíticos de excelência;
8. Disponibilizar todas as informações de GNIP e GNIR em sistema próprio via sítio WEB do SBG;
9. Publicar os cadernos técnicos das GNIP's e Publicar o Atlas Isotópico do Brasil.
10. Seguir engajando talentos do SBG e de fora do SBG para fortalecer a pesquisa em inovação no tema.
11. Dar mais vigor ao Programa em termos de envolvimento e comprometimento formal de colaboradores da DHT. Ter uma equipe dedicada mínima com atribuição de responsabilidades.

3 CONCLUSÕES

O Programa de Aplicações Isotópicas em Recursos Hídricos é uma realidade concreta e assume cada vez mais envergadura. Os benefícios são palpáveis em todos os sentidos, desde visibilidade institucional, passando por produção de informação primária de relevância e versatilidade extrema no contexto científico nacional e mundial, culminando com ritmo forte de produção acadêmica e oferta de capacitação. Os desafios, ao mesmo tempo, vão se tornando maiores fazendo com que o SBG, através de sua Diretoria DHT siga prestando o apoio devido. Fronteiras institucionais internas vão se tornando fluidas e projetos de isotopia gestados dentro da DHT são destacados como de caráter de inovação dentro da perspectiva do CGA. O SBG já detém status de instituição líder no país e no continente em assuntos isotópicos.

REFERÊNCIAS

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Climatological Normals (Climo) for climate and climate ship stations for the period 1932-1960, WMO/OMM No. 17, TP.52.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Weather Reporting, Volume A: Observing Stations, WMO/OMM No. 9, TP.4.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION in Co-operation with Environmental Science Services Administration USA, Monthly Climatic Data for the World, United States Government Printing Office, monthly editions.

LUCAS, L. L., UNTERWEGER, M. P., Comprehensible Review and Critical of the Half-life of Tritium. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 105-4 (2000), 541-549.

CRAIG, H., Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters, Science 113 (1961) 1833.

GONFIANTINI, R., Standard for stable isotope measurements in natural compounds, Nature (London) 271 (1978) 534-536.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation, Technical Reports Series No. 331, IAEA, Vienna (1992) 781.

TAYLOR, C.B., Stable Isotope Composition of Monthly Precipitation Samples Collected in New Zealand and Rarotonga, Physical Science Rep. 3, Dept. of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, New Zealand (1990) 93.

ROZANSKI, K., ARAGUAS ARAGUAS, L., GONFIANTINI, R., Isotope Patterns in Modern Global Precipitation, Geophysical Monograph 78. In: Climate Change in Continental Isotope Records, American Geophysical Union (1993) 1-36.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Environmental Isotope Data No. 1-10: World Survey of Isotope Concentration in Precipitation.

APÊNDICE A – Relatório para AIEA

1. SUMMARY OF WORK DEVELOPED DURING THE THIRD YEAR

There were two field campaigns to the São Francisco River, in January (wet season) and July (dry season) of the current year. Approximately 100 rain, river and groundwater samples were collected by the local researchers, including a doctoral student, and by the hydrological team of the Geological Survey of Brazil (SGB-CPRM, in Portuguese). A rain collector, recently included in the Global Network Isotope of Isotopes in Precipitation (GNIP), was installed at the highest São Francisco River, in the Serra da Canastra National Park (Figure 1), and has been monthly sampled by the local crew of the park. So far, the hydrochemical and isotopic results of São Francisco 1 Subbasin (highest São Francisco) were obtained. The samples were analyzed at the Environmental Studies Center and Stable Isotopes Center, both at the São Paulo State University.

2. DETAILS

The São Francisco River Basin is one of the greatest in Brazil. It extends over 639.219 km², which represents 8% of the Brazilian territory, and provides water for the multiple usages of 15 million inhabitants over 505 municipalities. The 2.863 km length São Francisco River connects the Southeastern to the Northeastern Brazil, both densely populated. In the last decade, the São Francisco River Basin has been affected by decrease of precipitation and water flow rates. Precipitation decreasing combined to the raising demands of industry, irrigation, energy generation and population supplies, includes the interbasin Transfer of the São Francisco River to the dry Brazilian Semiarid, overpressure the system and jeopardize future generations.



Figure 1 – GNIP Station at Serra da Canastra National Park (São Roque de Minas, Minas Gerais).

São Francisco 1 Subbasin (SF1) comprises the headwaters of the river. SF1 comprises 29 municipalities and 260,698 inhabitants, 87.6% of those living in the urban area, according to the latest census (IBGE, 2010). The Köppen-Geiger climate is Cwa and Cwb, dry-winter humid subtropical climate and dry-winter subtropical highland climate (PEEL et al. 2007). Both are

monsoonal influenced, with most year precipitation concentrated during the austral spring and summer (October to March) (Figure 2).

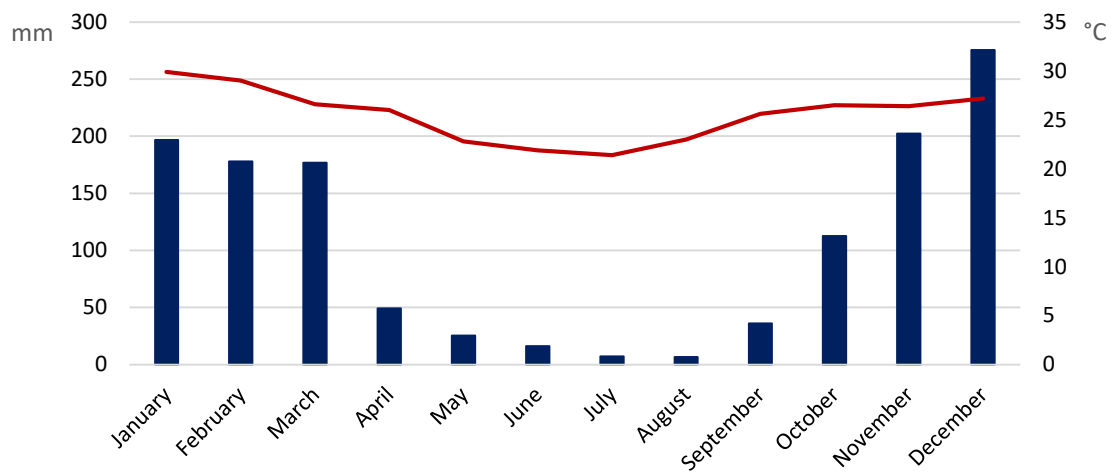


Figure 2 – Monthly mean precipitation (mm; blue rectangles) versus temperature (°C, red line) at the Belo Horizonte GNIP Station, from 2008 to 2018 (IAEA/WMO, 2021).

Stream samples were preferentially collected in the major roads (Figures 3 and 4). Groundwater samples are from wells of the Sanitation Company of the State of Minas Gerais (COPASA; Figure 5).

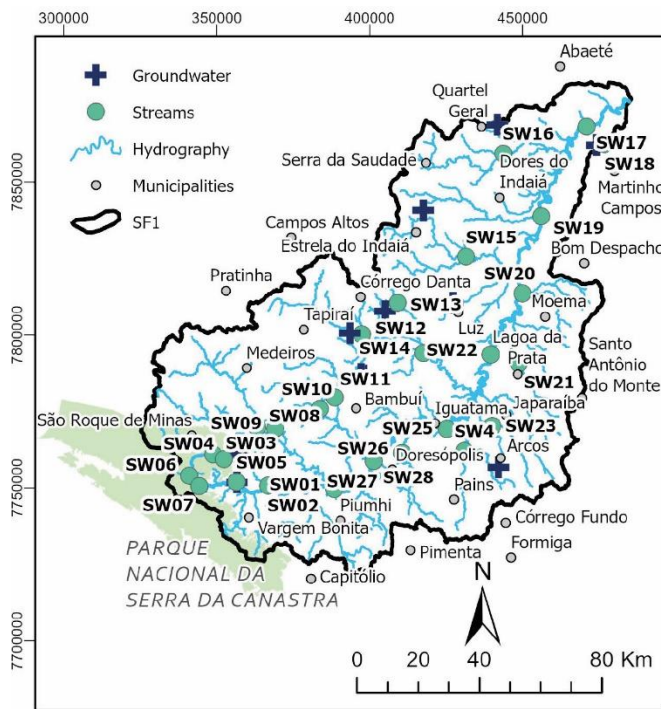


Figure 3 – Superficial water samples locations at SF1.

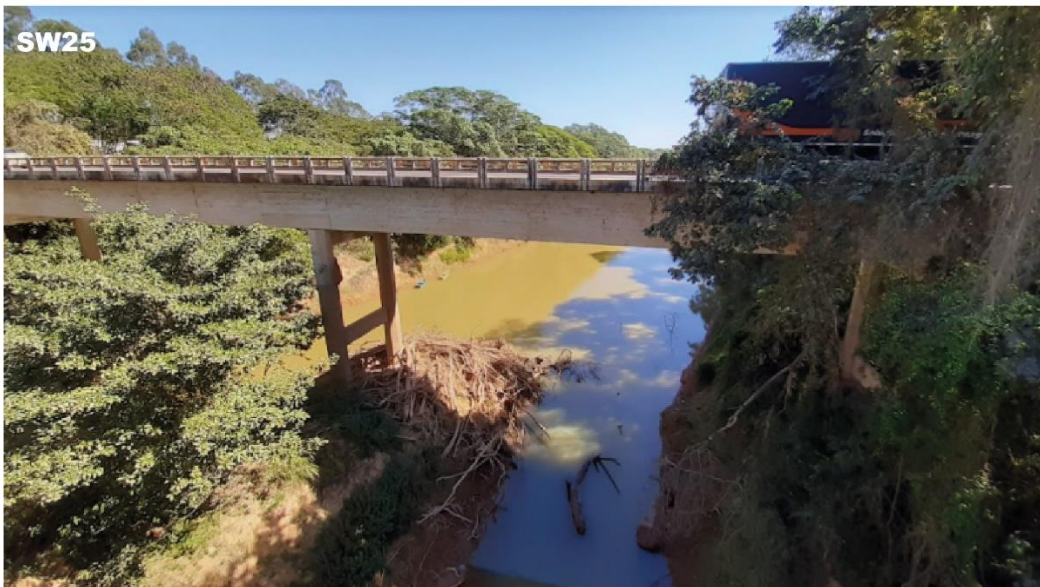


Figure 4 – Sampling points of superficial waters at SF1.

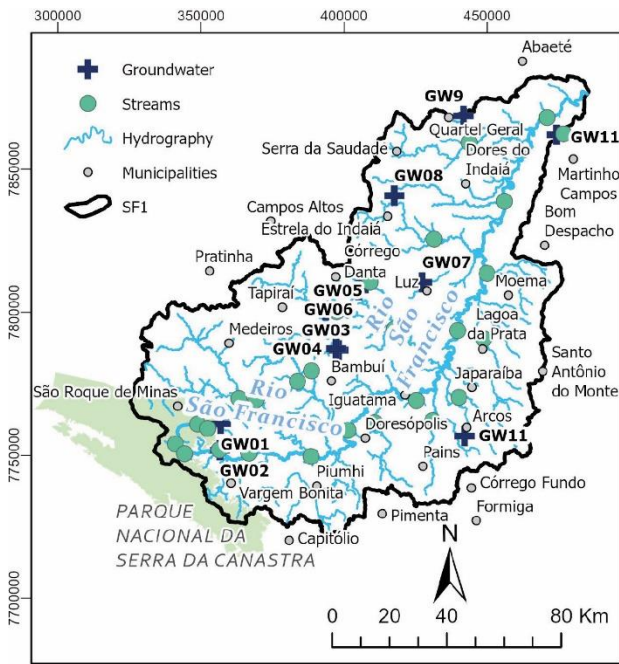


Figure 5 – Groundwater samples locations.

According to the Piper Diagram (PIPER, 1944), most groundwater and superficial water samples are Bicarbonates or Carbonates with predominance of Calcium ions (Figure 6).

Diagramme de Piper

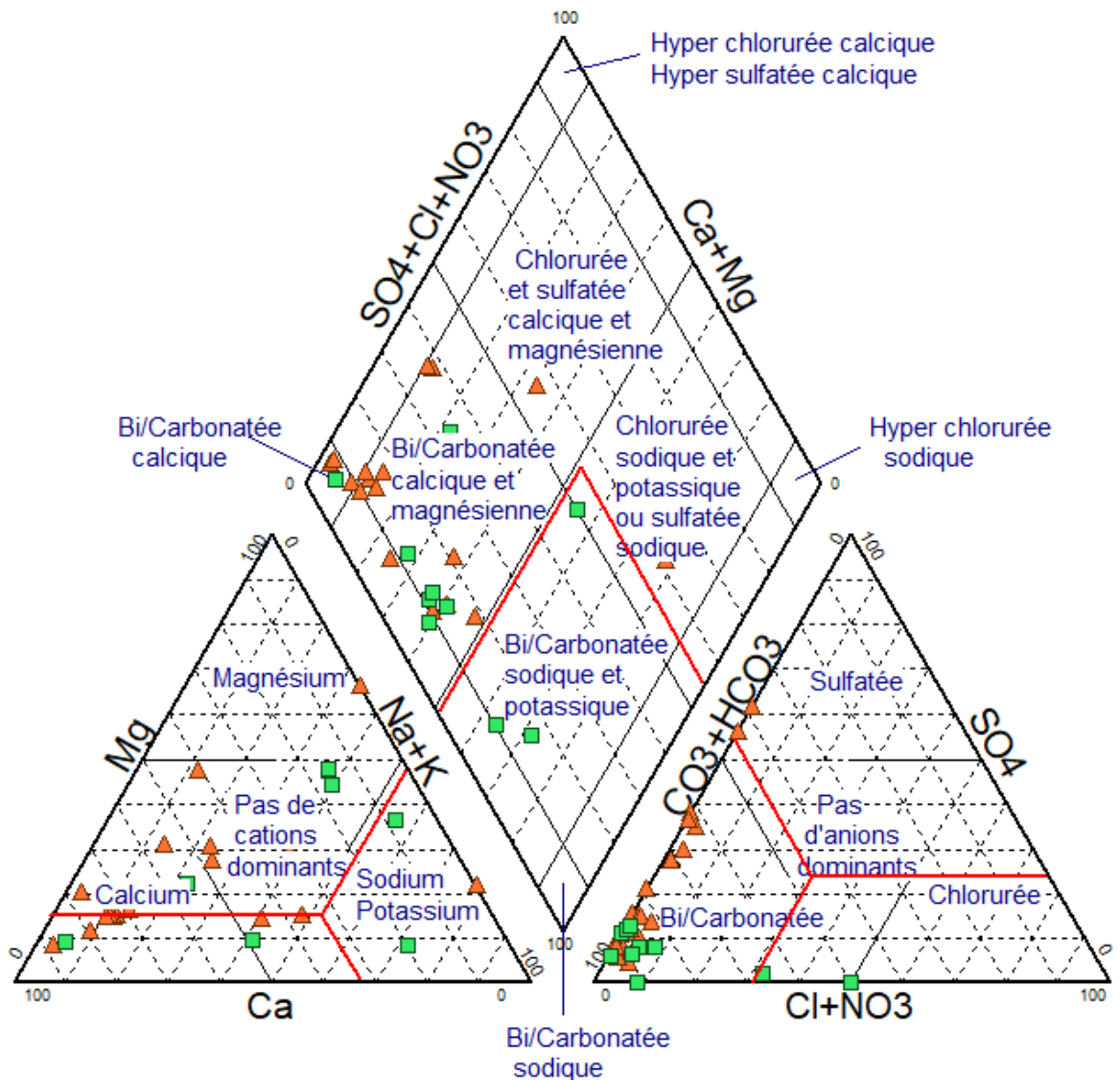


Figure 6 – Piper Diagram for groundwater (green squares) and superficial water samples (orange triangles).

Monthly precipitation isotopes samples collected from July of 2021 to July of 2022 in the Serra da Canastra Station (SCN) produced a Local Meteoric Wire Line (LMWL) as follows (Figure 7).

A ten-year time series (January of 2008 to December of 2018) of monthly precipitation isotopes samples from Belo Horizonte Station (BH) (IAEA/WMO, 2021) produces the following LMWL (Figure 8):

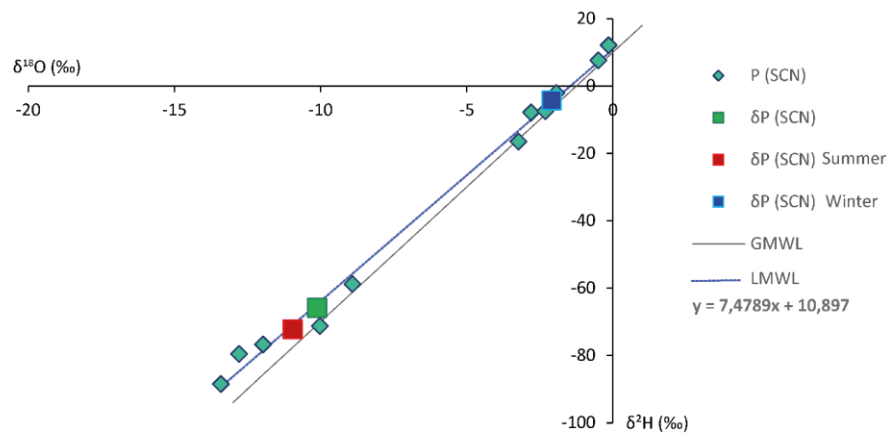


Figure 7 – $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in precipitation in Serra da Canastra Station (SCN). P = average precipitation; δP = weighted average annual precipitation; LMWL: $\delta^2\text{H} = 7,4789 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10,897$; Global Meteoric Wire Line (GMWL): $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ (CRAIG, 1961).

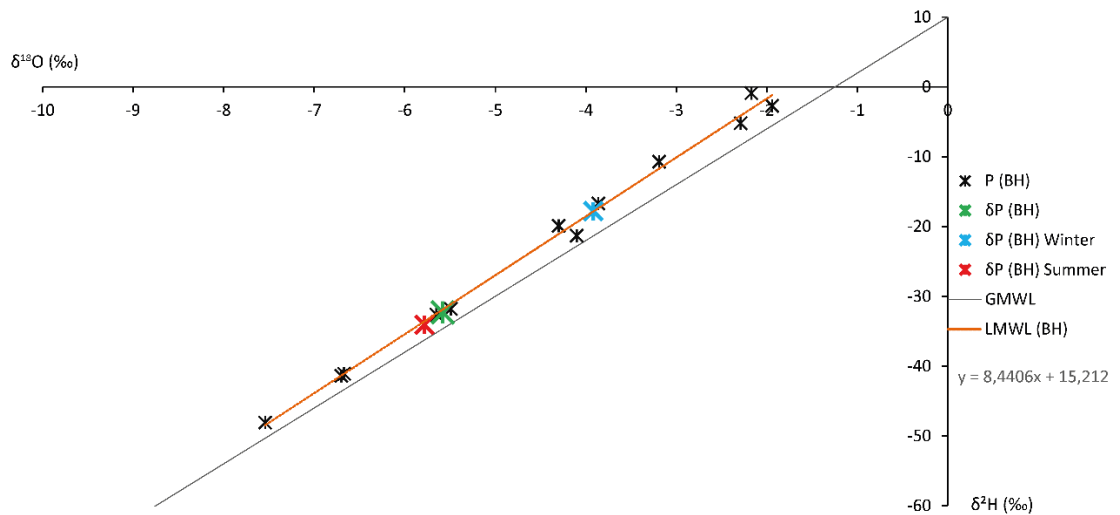


Figure 8 – $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in precipitation in Belo Horizonte Station (BH) (IAEA/WMO, 2021). P = average precipitation; δP = weighted average annual precipitation; LMWL: $\delta^2\text{H} = 8,4406 \cdot \delta^{18}\text{O} + 15,212$; GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ (CRAIG, 1961).

Comparing both precipitation results, SCN exhibits a very strong depletion in the summer weighted average precipitation. This phenomenon occurred due to the “amount effect” of very high precipitation rates registered in Southeastern Brazil in the summer of 2022. Because of the referred anomaly, groundwater and superficial water samples are compared to BH Station (IAEA/WMO, 2021) precipitation isotopic signature.

The groundwater samples of three field campaigns (winter of 21, summer of 22 and winter of 22) have depleted isotopic signature compared to the weighted average annual precipitation of BH Station (IAEA/WMO, 2021) (Figure 9).

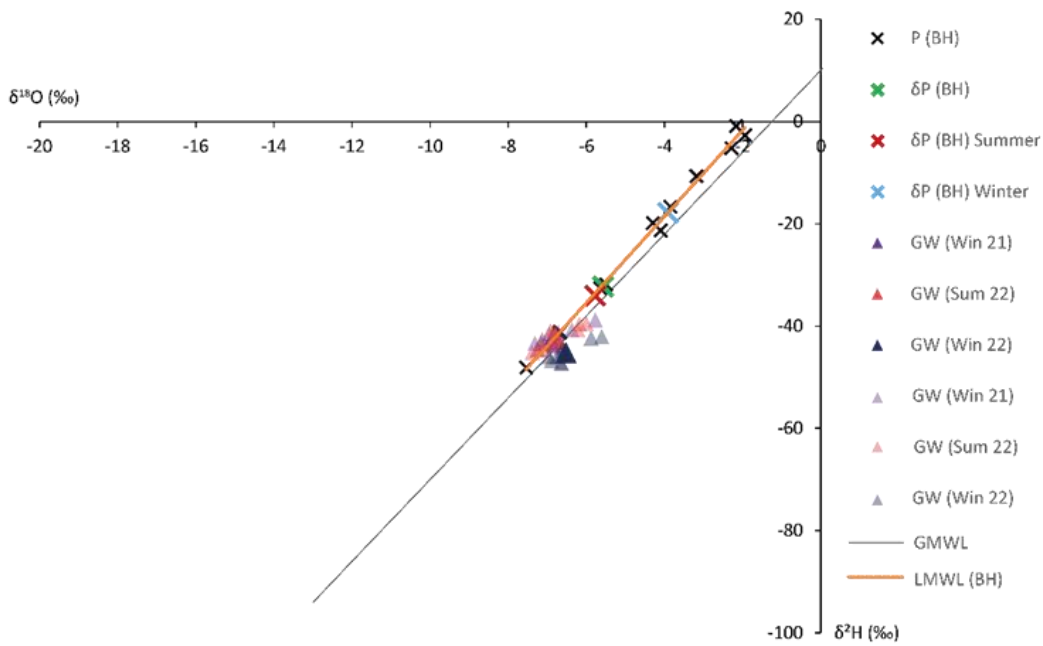


Figure 9- $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in groundwater (GW) samples. P (BH) = average precipitation in BH Station (IAEA/WMO, 2021); δP (BH) = weighted average annual precipitation; Filled triangles = mean groundwater values; Transparent triangles = discrete values; Win = Winter; Sum = Summer; LMWL: $\delta^2\text{H} = 8,4406 \cdot \delta^{18}\text{O} + 15,212$; GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ (CRAIG, 1961).

The superficial water samples of three field campaigns (winter of 21, summer of 22 and winter of 22) have depleted isotopic signature compared to the weighted average annual precipitation of BH Station (IAEA/WMO, 2021) (Figure 10).

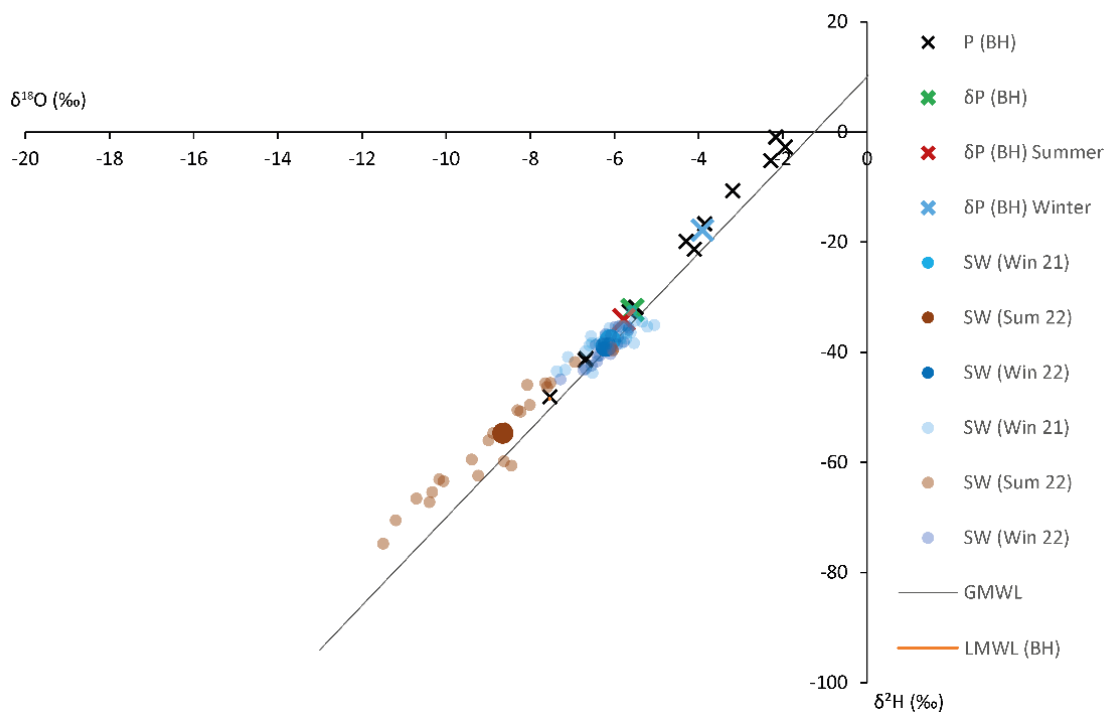


Figure 10 - $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in superficial water (SW) samples. P (BH) = average precipitation in BH Station (IAEA/WMO, 2021); δP (BH) = weighted average annual precipitation; Filled circles = mean superficial water values; Transparent circles = discrete values; Win = Winter; Sum = Summer; LMWL: $\delta^2\text{H} = 8,4406 * \delta^{18}\text{O} + 15,212$; GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$ (CRAIG, 1961).

Comparing both groundwater and superficial water results, except for the superficial water values in the summer of 2022, the groundwater is more depleted than the superficial waters (Figure 11).

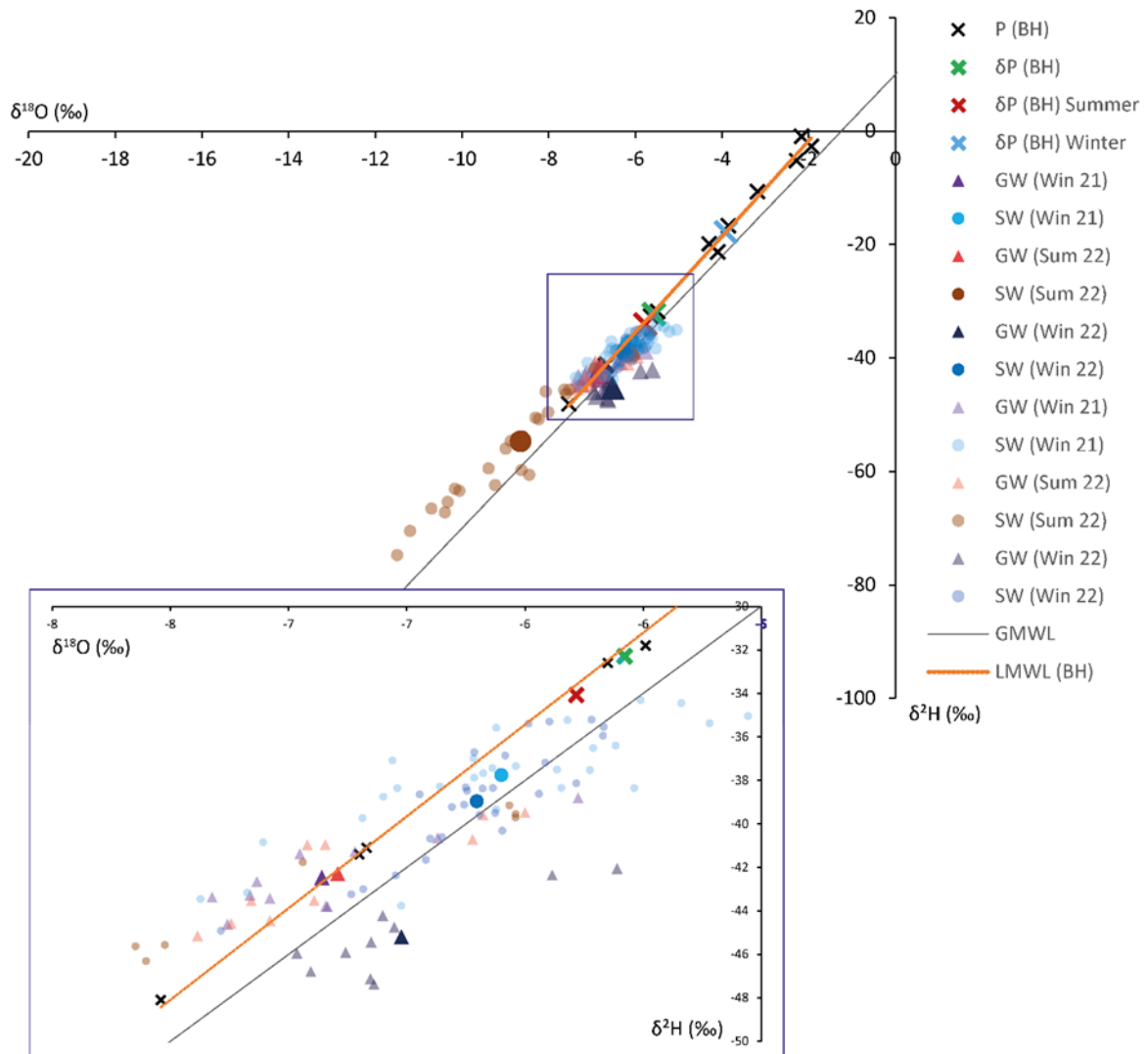


Figure 11 - $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in groundwater (GW) and superficial water (SW) samples. P (BH) = average precipitation in BH Station (IAEA/WMO, 2021); δP (BH) = weighted average annual precipitation; Filled triangles/circles = mean groundwater/superficial water values; Transparent triangles/circles = discrete values; Win = Winter; Sum = Summer; LMWL: $\delta^2\text{H} = 8,4406 * \delta^{18}\text{O} + 15,212$; GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$ (CRAIG, 1961).

3. OUTLOOK

For 2023, the following activities are scheduled: (1) Data analyses and interpretation of remaining samples collected in 2022; (2) Wet season field work (January of 2023); (3) Data analyses and interpretation of new samples; (4) Preparation of manuscript for publication.

4. REFERENCES

CRAIG, Harmon. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, v. 133, n. 3465, p. 1702-1703, 1961.

IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. 2021. Accessible at: <https://nucleus.iaea.org/wiser>. Access at Dec. 4, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., and MCMAHON, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, 2007. Accessible at: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>. Access in May 05, 21.

PIPER, Arthur. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*. 25 (6): 914–928, 1944. Available at [doi:10.1029/TR025i006p00914](https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914). Access in Dec. 29, 2021.

APÊNDICE B – Projeto de Pesquisa Doutorado (Aprovado CTC e em execução)

Título: Análise E Identificação de Fatores Condicionantes de Fluxo e Recarga no Sistema Aquífero Guarani na Região Oeste e Centro-Oeste do Rio Grande do Sul

Resumo: O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um dos principais aquíferos porosos conhecidos mundialmente e parcela expressiva se encontra em território brasileiro. Alguns estudos já demonstraram a influência de estruturas geológicas e heterogeneidades estruturais na dinâmica da água subterrânea deste sistema, sendo esta reconhecidamente mais expressiva nas áreas meridionais do sistema aquífero, que também compõe importante área de afloramento. O presente trabalho se propõe a aprofundar o conhecimento do SAG na Região Oeste e Centro-Oeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS), que compõe o bloco oeste e parte do bloco central definido por Machado (2005) e sofre influência de estruturas como o Arco de Rio Grande e o Sistema de Falhas Jaguari-Mata e engloba grande heterogeneidade litológica, incluindo unidades estratigráficas de ocorrência exclusiva no RS. A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) possui, através da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), 25 poços de monitoramento na área de estudo. Compõe o acervo séries históricas de dados de nível da água de até dez anos, mais de 90 análises químicas e análises isotópicas. Os dados confirmam a elevada complexidade hidrogeológica nas áreas de afloramento do SAG no RS, com a existência de padrões distintos de resposta dos níveis da água à precipitação pluviométrica e de características isotópicas e revelando a existência de condições locais de descarga e semi confinamento. Esta proposta apresenta como diferencial dos estudos já realizados a escala de maior detalhe e a abordagem integrada da arquitetura do aquífero e o fluxo e recarga da água subterrânea, permitindo uma compreensão integrada da estruturação e dinâmica do aquífero. A metodologia está dividida em seis etapas e compreenderá: (1) revisão bibliográfica e levantamento de dados geológicos, hidrogeológicos do meio físico; (2) caracterização das unidades hidroestratigráficas, incluindo área de abrangência, continuidade e condições topo-estruturais e campanha de campo para validação e complementação das informações; (3) definição das áreas potenciais de recarga de água subterrânea utilizando o método AHP, que se dá através do cruzamento de dados de variáveis ambientais, ferramentas de geoprocessamento e sistemas de informações geográficas (SIG), associadas a análise multicritério; (4) estimativa de recarga utilizando o método de Variação do Nível da Água e comparação com os registros históricos de precipitação pluviométrica; (5) Avaliação e interpretação de dados hidroquímicos e isotópicos e (6) integração dos dados e elaboração do modelo hidrogeológico

conceitual. Espera-se detalhar a estruturação e dinâmica do SAG na região oeste e centro-oeste do RS, considerando a influência das estruturas geológicas e heterogeneidades hidroestratigráfica na recarga e fluxo subterrâneo, possibilitando o detalhamento de contextos locais e a contribuição individual das unidades aquíferas, em escala de trabalho ainda não utilizada em estudos integrativos na região.

INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um aquífero transfronteiriço que abrange uma área 1,2 milhões de km², estendendo-se pelo Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina e representando uma das mais importantes reservas de água subterrânea mundiais. No Brasil, as maiores áreas de afloramento estão localizadas no estado de São Paulo (17.376 Km²), Goiás (12.257 Km²), Mato Grosso do Sul (31.299 Km²) e Rio Grande do Sul (13.402 Km²) (Borghetti, 2004). O fluxo da água subterrânea é controlado pelo arcabouço tectono-estratigráfico da Bacia do Paraná sendo que as estruturas geológicas dividem o aquífero em quatro grandes compartimentos e a variação espaço-temporal dos ambientes deposicionais confere características hidrogeológicas distintas entre eles. O compartimento Sul está separado do Norte pela estrutura denominada Arco de Rio Grande, que segundo Gastmans et al. (2017) impõe uma descontinuidade ao fluxo e compõe uma importante zona de recarga. A área aflorante do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul se diferencia substancialmente das áreas análogas na região sudeste e centro oeste do país, onde as unidades que compõem o aquífero são mais homogêneas e menos afetadas por falhamentos, além da existência de unidades estratigráficas que ocorrem exclusivamente nesta região da bacia. Machado (2005), tratando da influência dos grandes sistemas de falhas na estruturação do SAG no Rio Grande do Sul, propôs a existência de quatro compartimentos estruturais, definindo tendências gerais de escoamento subterrâneo e um empilhamento estratigráfico distinto entre os compartimentos. Soares (2008) caracterizou o arcabouço estratigráfico do SAG através de estratigrafia de sequências e detalhou sua estruturação no RS. A autora reconhece a importância das estruturas geológicas na compartimentação do aquífero, mas propõe um empilhamento estratigráfico distinto daquele proposto anteriormente. A Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS – SBG/CPRM) conta com 25 poços de monitoramento (PM) na área de estudo, localizados sob diferentes contextos geológicos estruturais, sendo 19 PM localizados à oeste e 06 PM à leste do Sistema de Falhas Jaguari Mata, com 03 PM na área de influência das estruturas. As séries históricas de monitoramento de nível da água chegam a dez anos, com mais de 90 análises químicas e 52 análises de isótopos estáveis (18O e Deutério), incluindo análises multi-nível. Os dados obtidos nos dez anos de monitoramento da

RIMAS apontam para uma elevada complexidade hidrogeológica nas áreas de afloramento do SAG no Rio Grande do Sul, com a existência de padrões distintos no comportamento hidráulico dos poços de monitoramento em resposta às precipitações pluviométricas, evidentes gradientes espaciais de isótopos estáveis e distintos padrões de evolução química (KUHN et al., 2018), sugerindo a existência de zonas de descarga e condições localizadas de semiconfinamento (WÜRTH, 2014). Este projeto de pesquisa se propõe a abranger a região Oeste e o Centro Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, no compartimento Oeste e parte do compartimento Central-Missões propostos por Machado (2005). Trata-se de uma das maiores áreas contínuas de recarga do aquífero no Brasil e a maior área aflorante do SAG no RS, onde o aquífero possui grande importância para o abastecimento público. É relevante sua posição em região de fronteira nacional, onde o conhecimento do aquífero se torna imperioso para uma boa gestão e estabelecimento de políticas transnacionais. A relevância acadêmica da área se dá pela singular complexidade da região, com a existência de diferentes contextos geológicos-estruturais, onde pode-se destacar a presença do sistema de falhas Jaguari-Mata e do Arco de Rio Grande, a existência de diferentes graus de confinamento pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e de unidades estratigráficas de ocorrência exclusiva, cuja posição e função no sistema aquífero é controversa. Este cenário permitirá o detalhamento e comparação das dinâmicas do fluxo subterrâneo e processos de recarga em diferentes condições. Estudos realizados até o momento aplicaram escalas regionais, englobando toda a área de afloramento do SAG no RS. Tampouco foram realizados estudos voltados a comparação da estruturação do aquífero e os mecanismos de recarga da água subterrânea. Esta proposta apresenta como diferencial, além da escala de estudo, uma abordagem dinâmica, através da integração entre a arquitetura do aquífero e o fluxo e recarga da água subterrânea, que não foi realizada em estudos integrativos na região.

OBJETIVO

- ✓ Identificar e analisar a compartimentação hidroestratigráfica do SAG na fronteira oeste e centro-oeste do Rio Grande do Sul, a fim de definir os fatores condicionantes do fluxo e recarga da água subterrânea, propondo um modelo conceitual para o aquífero na região. Os objetivos específicos são:
- ✓ Identificar as áreas potenciais de recarga;
- ✓ Estimar a recarga de água subterrânea através da análise de Variação do Nível da Água dos poços de monitoramento da RIMAS;
- ✓ Comparar os dados obtidos na estimativa de recarga com os dados de precipitação pluviométrica das estações de monitoramento da RIMAS e da Rede

Hidrometeorológica Nacional (RHN), considerando a possível influência de fenômenos climáticos;

- ✓ Caracterizar as unidades geológicas que compõe o aquífero, definindo espessuras, extensão e área de ocorrência através dos dados obtidos na perfilagem geofísica e nos perfis de poços,
- ✓ Caracterizar a influência das heterogeneidades estruturais no aquífero;
- ✓ Caracterização hidroquímica e isotópica dessas águas subterrâneas, determinando padrões relacionados às heterogeneidades litológicas e ao fluxo da água subterrânea e interpretar origem e tempo de residência;
- ✓ Construir um modelo conceitual de circulação e fluxo da água subterrânea do SAG na região da fronteira oeste e centro-oeste do RS.

JUSTIFICATIVAS CORPORATIVAS

O SAG é, atualmente, o aquífero que mais possui informações no Brasil e nas Américas, sendo o aquífero regional mais conhecido e citado em documentos de órgãos internacionais como Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), estrando dentre os aquíferos regionais mais estudado em publicações científicas. O valor internacional da área de estudo se comprova pelo desenvolvimento do denominado Proyecto Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sist. Acuífero Guaraní (Projeto SAG). Foi o maior projeto multinacional de águas subterrâneas, financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) e Banco Mundial. Foi um projeto pioneiro de financiamento por instituições de desenvolvimento social mundiais voltado à hidrogeologia e seu êxito culminou na criação de um acordo internacional denominado Programa Estratégico de Acción para la Protección y uso Sostenible, que visa o manejo conjunto do Sistema Aquífero Guaraní pelos quatro Estados Partes. O acordo internacional está vigente e foi assinado por Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, sendo o único tratado multilateral que se propõe a regular águas subterrâneas transfronteiriças e tem servido de referência para gestão de outros aquíferos transfronteiriços no mundo. O êxito do Projeto SAG levou também à criação do Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (CeReGAS), um programa estratégico da UNESCO que se propõe a “articular as capacidades nacionais e regionais a nível público e/ou privado para a gestão sustentável dos aquíferos e a proteção do recurso hídrico”. Há perspectiva de assinatura do Projeto SAG II pela UNESCO, em parceria com o Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF). Se concretizado, este projeto será financiado pelo GEF, com previsão de dotação de 2,5 milhões de USD. Neste caso, o SBG como instituição de

pesquisa, com projetos consolidados sobre o SAG e profissionais especializados, tem condições plenas de aplicação. A relevância internacional do tema Água potável e saneamento é notória também pela sua inserção como o Objetivo Número 06 de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas e é de grande mérito o alinhamento dos Programas/Objetivos e Metas do Plano Plurianual (PPA) do Serviço Geológico do Brasil (SBG) de 2016 e 2019 aos Objetivos e Metas dos ODS. No contexto nacional, o PPA 2020-2023 prevê a Ação Orçamentária 2397, que consiste em “Levantamentos Hidrogeológicos, Estudos integrados em recursos hídricos para gestão e aumento da oferta hídrica”, enfatizando a relevância estratégica do tema e o alinhamento do plano plurianual às demandas internacionais por aumento de oferta e qualidade hídrica. O SBG afirma seu papel de instituição de pesquisa responsável pela ampliação do conhecimento hídrico do país quando reconhece no Plano Estratégico 2021-2025 a importância da água como insumo estratégico e afirma que “a busca por alternativas para a colaboração com o aumento da oferta hídrica é algo crucial e deverá estar primordialmente em foco, colocando o SGB/CPRM numa condição singular para a definição de futuras políticas para gestão dos recursos hídricos no país” (Plano Estratégico 2021-2025 SBG, p. 7) Neste sentido, insere o objetivo de valor público “Contribuir para o aumento da oferta hídrica do país [...] bem como realizar pesquisas e estudos hidrogeológicos para subsidiar a gestão e o aproveitamento racional dos recursos hídricos”. O plano, dentro das Prioridades para o Ciclo 2021- 2025, ressalta a importância da manutenção e contínuo aperfeiçoamento dos monitoramentos hídricos (RIMAS e RHN), enfatizando a importância da ampliação do conhecimento hidrogeológico e da geração de produtos integrativos entre as águas superficiais e águas subterrâneas, dando subsídio à gestão e aproveitamento das águas. Isto posto, este plano de trabalho engendra uma via para o desenvolvimento das ações relacionadas à ampliação do conhecimento sobre os recursos hídricos nacionais, pautadas tanto no PPA quanto no Plano Estratégico, em região de especial interesse por se tratar de área transfronteiriça. Além disso, possibilitará aplicação dos dados gerados pelo SGB, com retorno técnico-científico e grande contribuição aos projetos aos quais está vinculado. Pode ser inserido em pelo menos três linhas de pesquisa das sete áreas prioritárias definidas pela Câmara Técnica Científica (CTC): (1) Hidrologia Aplicada, (2) Técnicas específicas com potencial de agregar valor aos produtos em desenvolvimento e (3) Complementação e aprofundamento técnico em áreas geográficas consideradas prioritárias. Ressalta-se a importância estratégica do SBG seguir focando esforços para o aprofundamento do conhecimento geocientífico onde já teve iniciativas, atualizando os produtos institucionais à luz dos avanços científicos. Além do SAG ser objeto de monitoramento por três equipes regionais (atualmente o SAG é monitorado nos estados

de RS, PR, SP, MS e GO pelas Unidades Regionais de Porto Alegre, São Paulo e Goiânia), dois pesquisadores tiveram o SAG como tema de suas teses de doutorado (Machado, 2005 e Kirchheim, 2020), ambos com apoio institucional. Não obstante a imensurável contribuição científica destes trabalhos, o conhecimento acerca do SAG certamente não se esgotou. Além do detalhamento e atualização destes estudos, este projeto apresenta a oportunidade de aplicação dos dados obtidos nos 10 anos de monitoramento da RIMAS ao conhecimento gerado institucionalmente. A construção de um modelo conceitual do arcabouço do aquífero e de fluxo e recarga da água subterrânea na área de monitoramento melhorará a compreensão acerca do SAG, possibilitando o desenvolvimento de produtos e uma melhor gestão do projeto RIMAS. No que concerne a RIMAS, este Plano de Trabalho também se justifica nos seguintes aspectos:

- ✓ O aprofundamento do conhecimento sobre a estruturação e dinâmica do aquífero possibilitará a elaboração de melhores estratégias de expansão e gestão do projeto;
- ✓ Devido à carência de conhecimento detalhado sobre a estruturação e estratificação do aquífero na região, há dificuldades na interpretação dos piezogramas e dados químicos. A definição de um modelo hidrogeológico conceitual para o aquífero possibilitará uma compreensão sobre distintos padrões de variação do nível da água e de características químicas evidentes entre os poços, favorecendo a elaboração de relatórios técnicos e científicos de qualidade;
- ✓ Por mais de uma ocasião a equipe do projeto foi questionada a respeito das unidades que estão sendo monitoradas, inclusive por órgãos externos (ANA). Os principais questionamentos se fundamentam nas divergências existentes no meio científico a respeito da posição estratigráfica e papel que as formações geológicas de ocorrência exclusiva no RS desempenham no aquífero. É importante que a equipe do projeto se ampare em evidências científicas para respaldar a argumentação acerca do monitoramento das referidas unidades;
- ✓ Desenvolvimento de metodologia para estimação de parâmetros do aquífero que são fundamentais para uma melhor precisão na estimativa de recarga (detalhamento no item 6);
- ✓ Elaboração de roteiros específicos para aplicação na RIMAS (detalhamento no item 6) Este plano de trabalho também prevê o desenvolvimento de parte do projeto “Técnicas com multi-traçadores para datação de tempo de residência de água subterrânea de juvenis a muito antigas” no compartimento sul do Sistema Aquífero Guarani. Este projeto está lotado no Programa Nacional de Aplicações

Isotópicas na Hidrologia e a partir dele está sendo assinada parceria com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), no qual a proponente compõe a equipe científica. O projeto subsidiará as análises isotópicas de isótopos estáveis ^{18}O e Deutério, gases nobres ^{81}Kr e ^4He e datações por ^{14}C , além da aquisição de Espectrômetro de Massa portátil. Estas análises possibilitarão a determinação dos tempos de residência e de linhas de fluxo subterrâneo do SAG, com o detalhamento da tese de doutorado desenvolvida em escala nacional pelo Pesquisador em Geociências Roberto Kirchheim.

- ✓ É relevante também a sobreposição de áreas de interesse com o Projeto Bacia do Paraná, executado pela equipe do Departamento de Geologia e Recursos Minerais (DGM) e cuja coordenação técnica está sendo desempenhada pelo Pesquisador em Geociências Bruno Ludovico Horn, lotado na mesma Superintendência Regional que a proponente (Porto Alegre) e com o qual já foi estabelecido contato. O projeto conta com a participação de 15 pesquisadores de diferentes divisões técnicas da DGM e dispõe de orçamento próprio. Tem como um dos objetivos a “definição do modelo tridimensional das unidades estratigráficas, além do arcabouço estrutural da bacia, com vistas ao entendimento tectono-sedimentar”. Aqui, destaca-se a lacuna científica a respeito do arcabouço da bacia, cuja melhor compreensão é fundamental para a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual do SAG. Este tema reforça as características multidisciplinares do SBG, criando oportunidade para fortalecimento das relações entre as diferentes áreas da empresa, além da otimização de recursos financeiros e humanos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Será realizado levantamento de dados do meio físico, campanha de campo, definição das áreas potenciais e estimativa de recarga de água subterrânea e a análise de dados hidroquímicos e isotópicos. A integração dos dados possibilitará a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual para o SAG na região. As etapas estão apresentadas no fluxograma da Figura 1 e descritas a seguir.

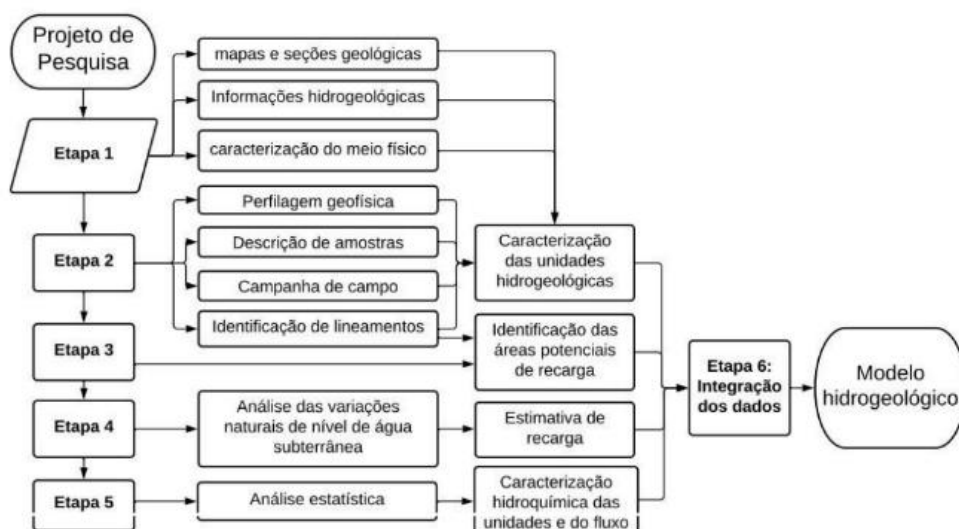


Figura 1. Fluxograma Executivo.

Etapa 1: Levantamento de dados sobre o meio físico. Serão levantados mapas, seções geológicas, perfis de sondagem, dados geofísicos e hidrogeológicos, ensaios de bombeamento, análises químicas, imagens de satélite e informações sobre a geologia e hidrogeologia da Bacia do Paraná e do SAG. A busca será realizada junto às bases de dados do SBG/CPRM, ANA, Instituições de Ensino e Pesquisa, Companhias de Abastecimento e Perfuração, Petrobrás/ANP, USGS e INPE. Compõe o acervo da RIMAS séries históricas de dados horários de nível da água de até dez anos, mais de 90 análises químicas (incluindo análises multinível), análises de isótopos estáveis ^{18}O e Deutério, informações de posicionamento e altimetria realizado com DGPS (Differential Global Positioning System). Serão consultadas as estações da RIMAS e da RHN para dados de precipitação pluviométrica.

Etapa 2: Caracterização das unidades hidrogeológicas. Compreende a descrição, identificação de área de abrangência, continuidade e condições topoestruturais das unidades hidrogeológicas. Será realizada perfilagem geofísica gama e de indução eletromagnética nos 25 poços de monitoramento da RIMAS, utilizando equipamento pertencente ao projeto e que está lotado na SUREG-SP. Métodos geoeletricos (Sondagem Elétrica Vertical e Tomografia Elétrica) serão aplicados na área de estudo através de parceria a ser formalizada com a Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, que possui o ferramental necessário e dispõe de um Pesquisador da área de Geofísica na SUREG-PA, com quem já foi estabelecido contato para análise de viabilidade. Os dados gerados serão utilizados na identificação da continuidade e espessura das camadas e para o cálculo de parâmetros do aquífero como porosidade e

resistividade da água da formação. Nesta etapa buscar-se-á desenvolver uma metodologia para caracterização do rendimento específico (S_y) do aquífero através dos dados geoeletricos, este dado será aplicado na Etapa 4. Amostras coletadas quando da perfuração dos poços serão analisadas para validação dos dados obtidos da geofísica. Os lineamentos morfoestruturais serão caracterizados em escala de observação de 1:100.000 em termos de orientação, comprimento e densidade através da interpretação de produtos de sensoriamento remoto e de modelos digitais de elevação do terreno, utilizando o sensor Advanced Land Observing Satellite (ALOS), que possui resolução espacial de 12,5 metros. Para verificação do controle estrutural sobre as propriedades hidrogeológicas, será elaborado um mapa no Software ArcGIS com informações estruturais e localização dos poços tubulares da região. Serão elaboradas seções geológicas que possibilitarão a avaliação da geometria, continuidade e espessura das unidades hidroestratigráficas. Amparadas nos dados de posicionamento geográfico e altimetria já obtidos pela RIMAS, estas informações possibilitarão a caracterização das ocorrências do topo do SAG, distinção de áreas em condições livre e confinada, identificação da espessura das camadas e janelas de afloramento, bem como a influência das estruturas geológicas. A correlação dos poços lateralmente permitirá a elaboração de blocos diagramas que possibilitarão a visualização tridimensional das principais estruturas e continuidade das camadas. Nesta etapa será realizada uma campanha de campo para validação e complementação da informação e coleta de amostras para análises isotópicas (Etapa 5), que estão previstas pelo Programa Nacional de Isotopia.

Etapa 3: Definição das áreas potenciais de recarga utilizando a técnica Analytical Hierarchical Process (AHP) Consiste na definição de áreas favoráveis para recarga de água subterrânea através do cruzamento de dados de variáveis ambientais, ferramentas de geoprocessamento e sistemas de informações geográficas (SIG), associadas a análise multicritério (AHP). Os fatores a serem considerados são declividade, forma do terreno, densidades de lineamentos e drenagem, tipo, uso e cobertura de solos. A caracterização destes fatores será realizada a partir de produtos de sensoriamento remoto, com análise de modelos digitais de elevação do sensor ALOS. As informações sobre os lineamentos serão obtidas na Etapa 2. Informações sobre tipos e uso de solos serão extraídas da bibliografia (EMBRAPA, 2017; STRECK, 2018) e serão utilizados como balizadores para o uso do Mapa Global de Ocupação da Superfície com resolução espacial de 10 metros publicado pela ESRI em 2020. Todos os dados serão trabalhados em ambiente SIG, utilizando o software ArcGIS.

Etapa 4: Estimativa de recarga utilizando o método de Variação do Nível da Água (VNA) O método se baseia na variação da espessura da zona saturada e rendimento específico do aquífero, considerando que os demais componentes do balanço hídrico subterrâneo são tidos como nulos durante o período de recarga. O rendimento específico é um parâmetro chave na aplicação do método VNA e consiste no volume de água descarregado por um aquífero livre por unidade de área superficial por decréscimo unitário do nível d'água (carga hidráulica) (KRUSEMAN & RIDDER, 2000), sendo dado por uma relação entre a porosidade total e a retenção específica do aquífero. Serão utilizados dados de nível da água de 25 poços de monitoramento da RIMAS na área de estudo, dos quais 19 estão localizados à oeste e 06 à leste do Sistema de Falhas Jaguari Mata, sendo que 03 estão sob influência das estruturas. Como mencionado no item 4.1., buscar-se-á desenvolver uma metodologia compatível com a realidade institucional para a determinação dos valores de rendimento específico através dos resultados obtidos nos levantamentos geoeletricos. Estes dados serão validados pela comparação com dados da bibliografia, estando disponível uma compilação de valores médios de S_y para diferentes materiais. Os dados de precipitação pluviométricas serão utilizados para avaliar a correlação entre o volume precipitado e as respostas de variações de nível de água, buscando identificar padrões de respostas da variação do nível da água à precipitação e a possível influência de fenômenos climáticos nos mecanismos de recarga de água subterrânea.

Etapa 5: Avaliação de dados hidroquímicos e isotópicos. Essa etapa consistirá na caracterização das águas e do fluxo subterrâneo através da interpretação de análises pré-existentes realizadas pela CPRM através da RIMAS, que possui mais de 90 análises químicas completas (cátions, ânions, físico-químicas) dos poços de monitoramento no SAG, compreendendo duas campanhas de amostragem multi-nível com análises de isótopos estáveis ^{18}O e Deutério. Ao longo do desenvolvimento da tese serão realizadas novas análises químicas através do projeto RIMAS e análises de isótopos estáveis ^{18}O e Deutério, de ^{14}C e gases nobres (^{81}Kr e 4He) através do Projeto intitulado "Técnicas com multi-traçadores para datação de tempo de residência de água subterrânea de juvenis a muito antigas", do Programa Nacional de Isotopia. A parceria estabelecida com a IAEA fornecerá os recipientes para coleta, envio e análise das amostras. Teores de elementos maiores serão utilizados na classificação química das águas subterrâneas em diagramas hidrogeoquímicos e índices de concentrações relativas de íons na identificação do fluxo da água, baseando-se nos padrões de evolução química natural. Os dados isotópicos serão analisados em diagramas de $\delta^{18}O$ vs δ^2H , com a comparação da reta de distribuição local, Reta Meteorica Global e as idades obtidas por ^{14}C e gases

nobres para a determinação do tempo de residência das águas subterrâneas. Análises estatísticas de agrupamentos hierárquicos dos dados químicos auxiliarão na distinção das unidades aquíferas e fluxo subterrâneo.

Etapa 6: Integração dos dados – criação de um modelo hidrogeológico conceitual do aquífero na região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul Consiste na comparação e correlação dos dados compilados e gerados. As áreas potenciais de recarga serão comparadas com as estimativas de recarga, com padrões de resposta do nível da água à precipitação e as características das unidades hidroestratigráficas na perfilagem geofísica. Serão correlacionadas as características hidroquímicas das águas, posição em relação a recarga do aquífero e arcabouço geológico-estrutural, que possibilitará a definição de linhas de fluxo subterrâneo. A avaliação detalhada e comparação dos 25 poços de monitoramento da RIMAS no SAG possibilitará uma visão geral do aquífero. Mapas temáticos e seções hidrogeológicas elaborados no ArcGIS (potenciométricos, hidroquímicos, hidrogeológicos) darão subsídio para a elaboração do modelo conceitual do arcabouço e fluxo do SAG na região oeste e centro-oeste do RS, que será apresentado na forma de blocos diagramas de maneira a permitir uma visualização tridimensional do aquífero.

5. Resultados Esperados Detalhar a estruturação e dinâmica do SAG na região oeste e centro-oeste do RS, considerando a influência das estruturas e estratigrafia do aquífero na recarga e fluxo subterrâneo, tendo como diferencial dos estudos já realizados a integração da abordagem da arquitetura e dinâmica do sistema aquífero, em escala de maior detalhe. O estudo possibilitará o detalhamento de contextos locais e a contribuição individual das unidades aquíferas, em escala de trabalho ainda não utilizada em estudos integrativos na região.

No âmbito institucional, espera-se a ampliação do conhecimento do aquífero monitorado, com o detalhamento de contextos locais e a contribuição individual das unidades aquíferas ao comportamento freático dos PM da RIMAS.

1. Desenvolvimento de metodologia para estimativa dos valores de rendimento específico que sejam compatíveis com a realidade institucional, o que dará maior precisão aos dados obtidos na estimação de recarga;
2. Elaboração de roteiro para a estimação da recarga utilizando o método VNA: principal escopo da RIMAS é o monitoramento do nível da água, informação essencial para aplicação de estudos de recarga, que por sua vez constitui ferramenta fundamental na gestão dos recursos hídricos. O método VNA é aplicável para as séries de dados da RIMAS em todos os aquíferos monitorados e a elaboração do roteiro, aliado a treinamentos de curto prazo, poderão aumentar a produção técnica do projeto;

3. Elaboração de roteiro para definição de áreas de recarga através do método AHP: entende-se que a escolha de áreas para locação de poços é de importância estratégica na expansão e manutenção da RIMAS, levando a uma melhor gestão de recursos e melhores resultados. O roteiro servirá como guia para que as demais equipes do projeto possam construir mapas regionais. O conhecimento sobre distribuição espacial das áreas de recarga e descarga possibilitarão que as equipes da RIMAS façam uma escolha mais criteriosa na locação das perfurações, além de auxiliar na interpretação dos dados do monitoramento;
4. Interpretação e publicação dos dados de química e isotopia da RIMAS que constitui um acervo rico, mas cuja aplicação e publicação é esparsa e com baixo impacto científico;
5. Execução de parte do projeto denominado “Técnicas com multi-traçadores para datação de tempo de residência de água subterrânea de juvenis a muito antigas”, dentro do Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia, com realização de análises de isótopos estáveis (^{18}O e Deutério), gases nobres (^{81}Kr e 4He) e ^{14}C em parceria com IAEA e a definição de linhas de fluxo e tempos de residência das águas;
6. Continuidade à ampliação do conhecimento do SAG, já iniciada por pesquisadores do SGB;
7. Integração com outras áreas da empresa, como o Projeto Bacia do Paraná, que está sendo desenvolvido pela DGM e com a Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, reforçando o carácter multidisciplinar do SGB;
8. Contribuir para o cumprimento dos objetivos do Plano Estratégico 2021-2025.

COMPARTILHAMENTO DO CONHECIMENTO

Os conhecimentos adquiridos serão compartilhados institucionalmente de através de quatro modalidades distintas: geração de produto de uso coletivo, elaboração de roteiros, treinamentos e apresentação dos resultados. Cada item está especificado a seguir:

1. Geração de produto de uso coletivo: desenvolvimento de metodologia para obtenção do Sy. O valor de Sy aplicado no método VNA apresenta grande impacto na precisão da estimativa de recarga. Muitos trabalhos baseiam-se em compilação de valores médios de Sy para diferentes materiais, disponível na bibliografia. Não há definição de um método específico para a obtenção dos valores deste parâmetro, podendo ser obtido por testes de bombeamento, ensaios de laboratório, testes de infiltração e métodos geofísicos. Buscar-se-á desenvolver uma metodologia compatível com a realidade

institucional para a determinação deste parâmetro nos aquíferos monitorados pela RIMAS. Esta etapa se dará ao longo do segundo ano do estudo.

2. Elaboração de 03 roteiros específicos para aplicação na RIMAS voltados à orientação das equipes do projeto: (1) estimativa da recarga utilizando o método VNA; (2) definição de áreas potenciais de recarga utilizando a técnica AHP e (3) determinação dos valores de rendimento específico dos aquíferos monitorados. A elaboração destes roteiros se dará em seguida à defesa da tese e sua divulgação interna se dará até 12 meses após a conclusão da tese.

3. Treinamentos para aplicação das metodologias de VNA, AHP e da estimação do Sy. O prazo para aplicação dos treinamentos deverá ser determinado em conjunto com a diretoria e coordenação nacional do projeto, uma vez que será necessária a mobilização das equipes.

4. Apresentação oral dos resultados e conclusões obtidos na tese. Ocorrerá no primeiro semestre após conclusão do estudo, a modalidade e público da apresentação será definida institucionalmente.

VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA

A viabilidade do presente plano de pesquisa é justificada pela vinculação com o projeto RIMAS, no qual a proponente atua como coordenadora regional, e com o projeto “Técnicas com multi-traçadores para datação de tempo de residência de água subterrânea de juvenis a muito antigas”, do Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia, ambos da DHT. Desta forma, este projeto de pesquisa não acarreta em custos adicionais à instituição, utilizando e integrando as ferramentas analíticas já previstas para ambos os projetos para a criação do modelo hidrogeológico conceitual do arcabouço e fluxo do aquífero. A RIMAS possui um banco de dados hidrogeológicos consistente, com informações pluviométricas, análises químicas e isotópicas e séries históricas de variação do nível da água de até 10 anos, que constitui as informações primordiais a serem utilizadas neste estudo. Campanhas de campo, perfilagens geofísicas e análises químicas já fazem parte do escopo do projeto, estando incluídas no planejamento do mesmo em curto e médio prazo o SBG/CPRM dispõe do ferramental necessário para a realização das mesmas. O projeto “Técnicas com multi-traçadores para datação de tempo de residência de água subterrânea de juvenis a muito antigas” possibilitará análises de gases nobres, isótopos estáveis ^{18}O e Deutério e datação com ^{14}C . A cooperação com a IAEA terá recurso financeiro de 70 milhões de euros que serão aplicados em materiais para coleta, análises, envio de amostras e aquisição de Espectrômetro de Massa portátil. Recursos para as coletas estão previstos pelo Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia.

REFERÊNCIAS

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul. 1 ed. Curitiba, 2004. CPRM-SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas. Rio de Janeiro. Disponível em: DIETRICH, S.; CARRERA, J.; WEINZETTEL, P.; SIERRA, L. Estimation of specific yield and its variability by electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, v. 54, p. 8653–8673. 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1029/2018WR022938> EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Uso da terra no Rio Grande do Sul. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2018. 18 p. GASTMANS, D.; ANDRES, M.; KIRCHHEIM, R.; VIVES, L.; RODRIGUEZ, L.; VEROSLAVSKY, G.; MARQUES, J. M.; CHAMBEL, A. Hypothesis of Groundwater Flow Through Geological Structures in Guarani Aquifer System (GAS) Using Chemical and Isotopic Data. *Procedia Earth and Planetary Science*. v. 17, p. 136 – 139. 2017. HEALY, W. R.; COOK, P. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. v. 10. p. 91–109. 2002. KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. 2 ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Amsterdam, Holanda. 372p. 2000 KUHN, I. A; TROIAN, G.; KIRCHHEIM, R. K.; BARBOSA, G. L. Variações isotópicas e comportamento freático nos poços da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas no Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XX. Sociedade Brasileira de Geologia. 2018 MACHADO, J. L. F. Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. 2005. 130 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. PIRILO, C. B. Gestão de águas subterrâneas transfronteiriças: o caso do Sistema Aquífero Guarani. 2009. 170 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Humana) - Programa de PósGraduação em Geografia Humana. Universidade de São Paulo, São Paulo. SOARES, A. P. Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guarani: controles estratigráficos e estruturais. 2007. 196 f. Tese (Doutorado em Ciências). Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. Solos do Rio Grande do Sul. 3. ed. Porto Alegre: Editora Palotti, 2018. 251 p. WÜRTH, S. F. 2014. Estimativa de Recarga do Aquífero Guarani na Bacia do Rio Ibicuí (RS), com base na aplicação do método de Variação dos Níveis de Água. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. TIZRO, T. K. VOUDOURIS, Y. BASAMI. 2012. Estimation

of porosity and specific yield by application of geoelectrical method – A case study in western Iran. Journal of Hydrology. v. 454– 455. p. 160–172. 2012

PLANO DE SANDWICHE NA AIEA

Pesquisadora Isadora Aumond Kuhn

Destino: Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), Viena, Áustria

I. Introdução

O presente plano é parte integrante do doutorado sanduíche, a ser realizado pela Pesquisadora em Geociências Isadora Aumond Kuhn na Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), em Viena. Terá como duração o prazo de 12 meses, entre abril de 2023 e março de 2024. Esta etapa é de extrema relevância para o desenvolvimento da tese pois visa aprofundar a qualificação da pesquisadora nos temas de aplicações isotópicas no ciclo hidrológico e identificar os principais métodos de pesquisa e estratégias adotados pela IAEA. A Seção de Hidrologia Isotópica da IAEA, contrapartes técnicos do Acordo que o SGB assinou com a AIEA, planeja e implementa atividades técnicas no âmbito do Programa de Recursos Hídricos, incluindo os Projetos de Pesquisa Coordenados (CRP's), publicações científicas, geração e publicação de dados, como as redes de monitoramento isotópicas (GNIP e GNIR), programas de cooperação técnica e cursos de treinamento. Possui um laboratório de Isótopos na Hidrologia, que oferece aos estados membros (incluindo o Brasil) suporte analítico e serviços, estabelecimento e modernização de laboratórios e controle de qualidade. Todo este arsenal técnico e metodológico, através de iniciativas de capacitação, como a mencionada aqui, acaba sendo incorporado às práticas do SGB em hidrologia e hidrogeologia.

II. Objetivos

O doutorado sanduíche visa ampliar a qualificação da pesquisadora nos temas de aplicações isotópicas no ciclo hidrológico e metodologias de análise isotópica. Visa também identificar os principais métodos de pesquisa e estratégias adotados pela IAEA e ampliar as capacidades técnicas e o atual protagonismo do SGB no cenário nacional e internacional. Os objetivos específicos são os seguintes:

1. Aperfeiçoamento de conhecimentos sobre aplicações isotópicas na hidrologia e expandir o ferramental metodológico técnico do SGB nesta área;
2. Acompanhamento das análises das amostras de água subterrânea coletadas (no âmbito da tese em curso) no Sistema Aquífero Guarani (SAG) para determinação de suas idades através de isótopos de gases nobres (^4He e ^{81}Kr), ^{14}C e ^3H (trítio);

3. Aprendizagem das técnicas de modelagem matemática dos dados e geração de idades;
4. Discussão dos dados da tese com pesquisadores da IAEA e elaboração de artigos científicos;
5. Ter acesso ao equipamento de medição portátil de gases nobres e participar da elaboração do protocolo de uso do mesmo, junto à equipe da IAEA (SGB aprovou projeto para aquisição do referido equipamento para o biênio 2024-2025);
6. Fortalecimento dos vínculos institucionais com a IAEA, junto da qual o SGB atua como Centro Colaborativo;
7. Participação na Assembleia Geral da União Europeia de Geociências (EGU) entre os dias 23 e 28 de abril de 2023, em Viena;
8. Participação no curso Introductory Training Course on Data Processing and Interpretation Applied to Isotope Hydrology Studies oferecido pela IAEA na Sede em Viena, entre 2 e 26 de maio de 2023;
9. Participação e coorganização do International Symposium on Isotope Hydrology, maior evento científico mundial sobre o tema, promovido pela IAEA entre os dias 3 a 7 de julho de 2023, em Viena;
10. Realização de visitas científicas (representando o Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia) a instituições de pesquisa e laboratórios de referência na Europa, facilitando o estabelecimento de novas parcerias estratégicas para análises e produção científica. Cita-se o Serviço Geológico da Hungria, o Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology – EAWAG na Suíça e Laboratório de Física Nuclear Ambiental da Universidade de Heidelberg na Alemanha;
11. Participação no 50º Congresso Internacional da Associação Internacional de Hidrogeólogos (IAH) – África do Sul – 17 a 23 de setembro de 2023;
12. Participação no curso Use of the Noble Gases in Hydrological Studies: Part 2 na sede da IAEA em Viena, entre 09 e 13 de outubro de 2023;
13. Participação no Second Research Coordination Meeting on Isotopic Assessment of the Impacts of Climatic and Hydrological Changes on Wetland–Groundwater Ecosystem Interaction – Grécia – 16 a 19 de outubro de 2023;

III. Justificativa

O doutorado sanduíche justifica-se pela importância crescente do tema no âmbito nacional e internacional das aplicações isotópicas no ciclo hidrológico, bem como os esforços empreendidos pelo SGB, através do Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia, que tem concedido ao SGB posição de destaque geocientífico.

1. O SGB tem acordos de cooperação técnica em andamento com a IAEA, como a implementação e operação nacional das redes globais de isótopos na precipitação (GNIP) e em rios (GNIR); os acordos de cooperação técnica sobre Wetlands (Avaliação de técnicas de multitraçamento no entendimento da dinâmica hídrica no Pantaninho da Bacia do Rio Tietê, Brasil) e sobre o Sistema Aquífero Guarani (Projeto Técnicas com multitraçadores para datação de tempo de residência de águas subterrânea de juvenis a muito antigas). A cooperação com a IAEA oferece importantes oportunidades ao SGB, financiando análises isotópicas e oferecendo qualificação técnica através de treinamentos;
2. O SGB teve aprovado recursos financeiros para o Projeto denominado de Uso de radioisótopos na determinação de idades de águas subterrâneas, cujo objetivo é adquirir e usar o espectrômetro portátil de massa de gases. Diante disso, trata-se de uma oportunidade para a pesquisadora ter acesso a semelhante equipamento e receber capacitação no seu uso, atuar na elaboração dos seus protocolos de uso e, assim, possibilitar a transferência de know-how ao SGB na forma de cursos de treinamento e palestras para os demais pesquisadores;
3. O projeto de doutorado está vinculado ao Programa Nacional de Aplicação Isotópica em Hidrologia e à Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS). O intercâmbio trará benefícios a ambos projetos institucionais, sem mencionar o valor agregado à própria tese, que prevê a produção científica de relevância internacional;
4. A pesquisadora tem mais de dez anos de experiência em aplicação isotópica em estudos hidrológicos e recebeu treinamento na IAEA no ano de 2022 em curso sobre uso de gases nobres (Training Course on the Use of the Noble Gases in Hydrological Studies). Tal formação qualificou a pesquisadora para as coletas e análises que serão realizadas, além de possibilitar a interação com a equipe de pesquisadores e introdução à dinâmica de trabalho na IAEA, sendo um fator facilitador para o sucesso da etapa de doutorado sanduíche. Os cursos a serem assistidos estão especificados no cronograma;
5. Os conhecimentos obtidos serão multiplicados através de palestras e cursos de curta duração, a serem oferecidos aos demais pesquisadores da Hidrogeologia do SGB.

APÊNDICE C – Projeto de Pesquisa Doutorado (Aprovado CTC e em execução)

Título: Controles climáticos sobre a recarga das águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru revelados por isótopos estáveis (H e O)

Resumo

A principal fonte de recarga dos aquíferos livres são as águas meteóricas e a alteração no comportamento do regime de chuvas poderá afetar diretamente o nível de água desses mananciais. O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, SAB tem caráter sedimentar, livre a localmente semi-confinado, ocorre nos Estados São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e também parte o Paraguai. No Estado de São Paulo tem grande importância ocupando um pouco mais de 40% do território e responsável pelo abastecimento público total ou parcial de 70% dos municípios sotopostos a ele. Os isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio são traçadores ideais por constituírem a molécula da água. Estudar as variações temporais e espaciais das assinaturas isotópicas de águas pluviométricas e subterrâneas representa importante ferramenta para identificação de suas origens auxiliando no entendimento da dinâmica de suas interações no contexto da circulação da água pelo ciclo hidrológico. Entender as origens dos fenômenos climáticos que são relevantes para a recarga do SAB, principalmente no Estado de São Paulo que cada vez mais apresenta conflitos pelo uso da água e áreas com stress hídrico poderá subsidiar a implementação de políticas públicas e o uso racional dos recursos hídricos subterrâneos que têm nas chuvas a única fonte de reposição de água.

Introdução e Justificativa

Os prognósticos sobre mudanças climáticas indicam que as áreas tropicais serão severamente afetadas, causando modificações na disponibilidade hídrica e diminuições nos regimes de chuvas na região sudeste do Brasil devido ao desmatamento da região Amazônica. (IPCC, 2013). O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, SAB tem caráter livre, ocupa uma parte expressiva da região sudeste, principalmente o Estado de São Paulo, e partes das regiões centro-oeste e o noroeste do Paraná. Além de importante manancial de água subterrânea para abastecimento público e privado, ele encontra-se sob a área de atuação de fenômenos climáticos de grande escala como a Zona de Convergência do Atlântico Sul e Frentes Frias. Estudar as variações temporais e espaciais das assinaturas isotópicas de águas pluviométricas e subterrâneas representa importante ferramenta para identificação de suas origens auxiliando no entendimento da dinâmica de suas interações no contexto da circulação da água pelo ciclo hidrológico e também nos

processos de recarga dos aquíferos. A aplicação conjunta de técnicas que permitem quantificar a recarga e de hidrologia isotópica permitem compreender a movimentação da água tanto em termos quantitativos quanto em termos dos processos relacionados à origem e infiltração da água nessas regiões. As estimativas de recarga e variações nas reservas renováveis em aquíferos livres, enquanto isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio são excelentes traçadores das transformações físicas sofridas pela água ao longo de sua movimentação no ciclo hidrológico e podem fornecer informações importantes em relação a sua história ao longo do ciclo hidrológico.

Objetivos

O objetivo é avaliar as variações isotópicas de oxigênio e deutério sazonais de águas meteóricas e subterrâneas na área de ocorrência do SAB, ao longo de uma linha de orientação aproximada N-S, a partir de poços de monitoramento da Rede RIMAS, poços de usuários particulares e estações coletoras de chuva nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná a fim de correlacionar os fenômenos climáticos mais relevantes para a recarga do aquífero e delimitar suas áreas de influência.

Hipótese a ser defendida na Tese

Parte-se da hipótese que processos climáticos regionais exercem influência na recarga dos aquíferos livres da região sudeste, dentre eles o ZCAS e FF, como parcialmente demonstrado por Santos, 2018. Essas influências podem se expressar tanto em variações temporais quanto espaciais na forma e intensidade com que a recarga se processa. Através da correlação das assinaturas isotópicas dos eventos de chuva e das águas freáticas é possível estabelecer nexos causais, ou seja, a relação entre chuva e recarga efetiva. Como decorrência dessas hipóteses as principais perguntas norteadoras dessa pesquisa são:

- Quais são os principais eventos climáticos atuantes na região e seus impactos sobre a recarga efetiva do Sistema Aquífero Bauru?
- Existem diferenças nas concentrações isotópicas dos eventos acima descritos e como elas se comportam temporal e espacialmente?
- Como a variação isotópica da precipitação se reflete na composição isotópica da água subterrânea do Aquífero Bauru?

Revisão da Literatura Básica Sistema Aquífero Bauru

O Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, SAB, tem caráter livre, de extensão regional, abrange os Estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás e também parte do Paraguai. Recobre uma área total de 370.000 km². No Estado de São Paulo o SAB

representa uma das principais fontes de exploração de água, suas litologias recobrem a porção oeste do estado, ocorrendo em um pouco mais de 40% do território, aproximadamente 100.000 km² e é responsável pelo abastecimento público total ou parcial de 70% dos municípios sobrepostos a ele. O Grupo Bauru é constituído por sedimentos continentais, siliciclásticos: arenitos, arenitos argilosos, localmente carbonatados, siltitos, lamitos e argilitos com ocorrências localizadas de conglomerados e calcários (Paula e Silva, 2003). Possui uma extensão de aproximadamente 370.000 km² e ocorre nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul e Goiás. Quase a metade de sua extensão está sobre o Planalto Ocidental do Estado de São Paulo. (Paula e Silva, 2003). Estratigraficamente está sotoposto por discordância erosiva aos basaltos da formação Serra Geral e localmente sobre os sedimentos das formações Botucatu e Pirambóia como descritos por (Suguio et al., 1977; Paula e Silva & Cavaguti, 1992, 1994; Paula e Silva, 2003). A Figura 1 apresenta a área de ocorrência do SAB nos Estados brasileiros. Hidrogeologicamente constitui um aquífero sedimentar de extensão regional com caráter livre a semi-confinado de grande importância para o abastecimento de cidades de pequeno a médio porte. (Paula e Silva, 2003). Por se tratar de aquífero freático a recarga é efeito direto da precipitação sobre toda sua extensão e as áreas de descargas são os grandes rios e toda sua malha de afluentes. O aquífero exerce papel de reservatório regulador do fluxo de base da malha fluvial.



Figura 1. Área de ocorrência do SAB no Brasil.

Fenômenos climáticos

Na região sudeste o maior volume de chuvas se dá no verão sendo provocada principalmente pela atuação do fenômeno meteorológico denominado Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS. A ZCAS trata-se de um fenômeno climático

intrasazonal onde uma faixa de umidade se estende desde a região sul da Amazônia até a região Sudeste do país sendo responsável por níveis elevados de chuvas entres os meses de novembro até abril. A ZCAS possui papel fundamental na distribuição de chuvas nas regiões sudeste e centro oeste do Brasil e as variações de sua formação ou a sua ausência podem afetar diretamente os níveis de água nos aquíferos livres e consequentemente a disponibilidade hídrica de uma região. (SANTOS et al., 2018) Resumidamente, GASTMANS & SANTOS, 2019, apresentam a dinâmica regional dos principais fenômenos climáticos que atuam na área de estudo. A intensidade da ZCAS depende do posicionamento da Zona de Convergência Intertropical, ZCIT, que é faixa de nebulosidade trazida por ventos alísios das regiões da linha do equador e que se desloca entre os hemisférios conforme as estações do ano. O aumento da umidade varia de acordo com o aumento da temperatura no oceano Atlântico na região equatorial. No verão a ZIT provoca chuvas no Norte e Nordeste do país e provoca aumento de nebulosidade da Massa Equatorial Continental - mEc. Essa, por sua vez se desloca transportando umidade da região amazônica para a região sudeste. Durante o inverno a atuação da ZCIT é mais efetiva no Hemisfério Norte e a mEc fica enfraquecida atuando apenas na região amazônica. Na região Sudeste durante o inverno ocorre diminuição das chuvas que são geradas pelo avanço das massas polares e frentes frias vindas do Sul.

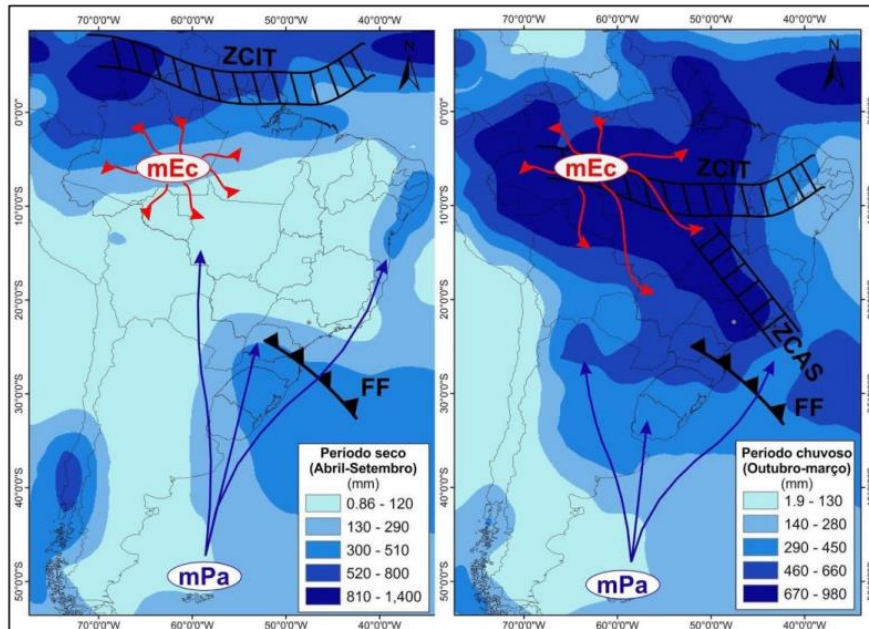


Figura 2. Principais feições climáticas atuando sobre a América do Sul e a distribuição dos volumes de chuva (à esquerda, a estação seca, e à direita a estação chuvosa). ZCIT: Zona de Convergência Intertropical; ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul; FF: Frentes Frias; mPa: Massa Polar Atlântica; mEc: Massa Equatorial Continental. Extraído de Gastmans e Santos 2019.

Isótopos Ambientais e Sua Aplicação em Estudos Hidrogeológicos

O estudo da composição isotópica da precipitação pluviométrica tem se tornado usual como instrumento na compreensão do ciclo hidrológico. A propriedade física dos isótopos de se fracionar devido às variações de temperatura e pressão atmosférica permite estabelecer associações entre a origem de massas de vapor e as condições climáticas e de precipitação. (FRITZ & FONTES, 1980; CLARK & FRITZ, 1997; CLARK & ARAVENA, 2005). Os primeiros estudos isotópicos em águas de chuvas foram possíveis através da criação de uma rede de monitoramento pela IAEA, Agência Internacional de Energia Atômica em parceria com a Organização Meteorológica Mundial, WMO. A GNIP, Global Network of Isotopes in Precipitation, opera desde 1961 coletando mensalmente dados de isótopos ambientais, oxigênio (^{18}O), deutério (^2H) e trítio (^3H), subsidiando importantes estudos nas áreas de hidrometeorologia, hidrologia, climatologia e oceanografia. (ROZANSKI et al., 1993).

No Brasil havia estações operando entre as décadas de 60 e 80 e com a descontinuidade da rede o uso da isotopia como ferramenta para estudos ambientais também ficou latente. A partir de 2008 graças a alguns esforços individuais para manter um monitoramento sistemático três instituições mantêm estações GNIP: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN, em Belo Horizonte, em 2013 a Universidade Estadual Paulista, UNESP em Rio Claro e a Universidade de São Paulo, USP em São Paulo. Em 2018 um acordo entre Agência Nacional de Águas, ANA e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM alavancou a operação da rede com abrangência nacional, instalando 8 GNIPS em locais antes monitorados. Ocorreu também acordo entre a AIEA e CPRM para a instalação de um Centro Colaborativo para América Latina e a implementação efetiva, por parte da CPRM, de um programa de estudos isotópicos abrangendo as demais fases do ciclo hidrológico. Essas iniciativas convergem para a diversificação do uso da isotopia como ferramenta em aplicações ambientais.

Composição isotópica em precipitação em áreas tropicais

A composição isotópica média das águas dos oceanos é o referencial de partida para todas as comparações sobre as variações de composição isotópica da água no ciclo hidrológico. É o zero da régua. (Dansgaard, 1964; Mook, 2000). Em comparação com as águas dos oceanos, as águas meteóricas e as superficiais são mais empobrecidas, sendo o vapor atmosférico empobrecido cerca de 10‰ na média em relação ao ^{18}O (Mook, 2000). Em regiões de clima temperado e polares as relações entre a composição isotópica da chuva e a temperatura estão bem estabelecidas e representam bons

indicadores para reconstituições climáticas (Bowen, 2008), mas nas regiões tropicais não são observadas correlações diretas (Aggarwal et al, 2016, Rozanski et al, 1992). A relação inversa entre a quantidade de chuva e a composição isotópica denominada amount effect era atribuída às variações dos regimes pluviométricos semelhante ao regime de monções. (Rozanski et al., 1993). Entretanto em estudos de eventos frequentes ou em avaliação diária da composição isotópica da precipitação não se observam o amount effect. (Aggarwal et al., 2012; Kurita, 2013; Kurita et al., 2009). Essas variações têm sido associadas às diferentes proporções de precipitações convectivas ou estratiformes. (Aggarwal et al., 2016)

Composição Isotópica em Águas Subterrâneas

A compreensão da relação das concentrações isotópicas da água subterrânea e das chuvas por meio da recarga representa grande desafio aos hidrogeólogos no mundo todo, uma vez que apenas uma pequena fração da precipitação é incorporada aos aquíferos. O comportamento das variações nas precipitações como atenuação do sinal isotópico ou variações sazonais são essenciais para a compreensão da interação entre águas superficiais e subterrâneas. (Batista et al., 2018; Clark & Fritz, 1997). A compreensão sobre processos como a movimentação da água através da zona não saturada, o que favorece atenuação do sinal isotópico e proporciona possíveis misturas de águas (Clark & Fritz, 1997) é dependente da temperatura e pode ser utilizado como modelo na elaboração de balanços hídricos no solo, fornecendo estimativas de recarga em aquíferos livres (Koeniger et al., 2016). Trabalhos de Jasechko et al., 2014; Jasechko & Taylor, 2015; Sánchez-Murillo & Birkel, 2016 demonstraram a possibilidade da avaliação de dados isotópicos de precipitação e águas subterrâneas em áreas tropicais apresentando prevalência de recarga ao longo dos períodos mais chuvosos e o sinal isotópico da precipitação geralmente mais empobrecido associado ao *amount effect*.

Estudo Preliminar

Em 2018 a equipe da CPRM de São Paulo apresentou no XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XIX CABAS, o trabalho intitulado “Possíveis influências da Zona de Convergência do Atlântico Sul no comportamento freático isotópico das águas subterrâneas do SAB e SAG (RIMAS) na região sudeste do Brasil”, Silva et al., 2018. O estudo avaliou dados de apenas uma campanha de amostragem de água subterrânea e demonstrou que as razões isotópicas encontradas na água subterrânea são muito similares as das chuvas, evidenciando a origem meteórica das águas subterrâneas e que existe uma diferença entre as águas dos poços dos Estados do Paraná, Mato Grosso Sul e São Paulo como se pode ver no gráfico da Figura 3. Para as amostras do SAG os valores

de 18O variaram entre -5,21‰ e -7,2‰ e de 2H entre -30,1‰ e -46,2‰. Para as amostras do SAB os valores foram de -4,60‰ a -7,33‰ para 18O e de -26,0‰ a -48,7‰ para o 2H.

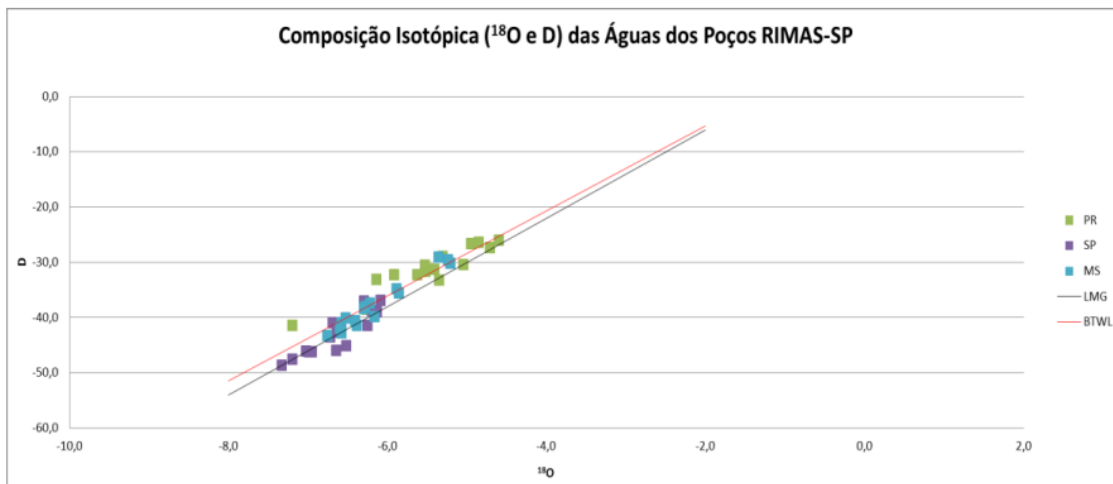


Figura 3. Gráfico de dispersão que expressa a razão entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para os poços RIMAS juntamente com a linha meteorológica global (LMG). Extraído de Silva et al., 2018.

Os mapas de dispersão do D e 18O também demonstraram que existem diferenças entre as razões isotópicas das águas subterrâneas nos Estados de São Paulo e parte do Mato Grosso do Sul, com os de noroeste do Paraná e sul do Mato Grosso do Sul, Figura 4.

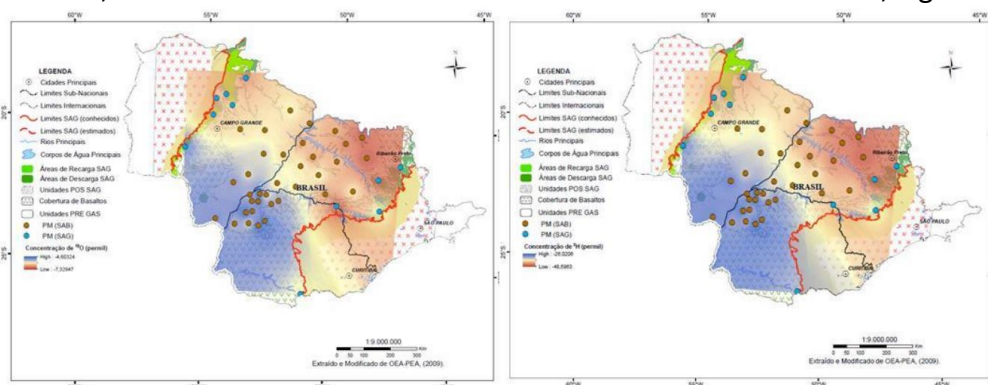


Figura 4. Distribuição espacial das concentrações de 18O e 2H na área de estudo.

Existe uma diferença no comportamento dos níveis freáticos, assim como nas razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, independente do aquífero seguindo um gradiente de direção NE-SW. A distribuição espacial das assinaturas isotópicas evidencia a existência de uma faixa separando os poços com comportamento freático e assinaturas isotópicas distintas. Os poços da RIMAS localizados a sul, na área azul da figura 4 mostram-se mais enriquecidos isotopicamente e apresentam comportamento freático mais estável que os poços agrupados acima da mesma.

Plano de Trabalho e Cronograma de sua execução

Etapa 1 - Selecionar poços da rede RIMAS/CPRM na área de ocorrência do SAB preferencialmente no Estado de São Paulo e alguns pontos de controle nos Estados contíguos, considerando a capacidade operacional de visita mensal para coleta das amostras e a existência nas proximidades de estações hidrometeorológicas. Para a conclusão dessa etapa foi realizada uma campanha de campo em março de 2020 com a intenção de encontrar poços particulares nas proximidades de poços da RIMAS, assim foram selecionados os pontos conforme a Tabela 1 abaixo. As estações hidrometeorológicas selecionadas encontram-se nas proximidades de cada poço de monitoramento, apresentam séries históricas e capacidade de fornecer consistentemente e com boa frequência os parâmetros de interesse para esse estudo.

Coordenadas (GGMMSS)	MUNICÍPIO	CÓD RIMAS	ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA
-	Uberaba- MG	-	INMET – UFMG
202104/501009	Meridiano- SP	3500034019	CPRM
211850/505547	Valparaíso- SP	3500027323	INMET
214030/512303	Flora Rica – SP	3500029466	CIAGRO – Adamantina
215705/504042	Bastos – SP	3500027887	CIAGRO Tupã
221840/521442	Teodoro Sampaio-SP	3500029468	CIAGRO – Mirante do Paranapanema
224646/523922	Terra Rica – PR	3500034025	Inst. Águas do PR
232158/530843	Tapira – PR	3500027571	Inst. Águas do PR

Tabela 1. Municípios selecionados onde há poços particulares e de monitoramento próximos.

Para a coleta de águas pluviométricas foram instalados os coletores do tipo Palmex nos municípios de Uberaba-MG e Terra Rica-PR em março de 2020 e contaremos com as amostras de um coletor idêntico existente na UNESP de Tupã, compondo assim três pontos de monitoramento isotópico das águas de chuva um a NE, um na porção central do aquífero e outro mais a SW do SAB. A Figura 5 apresenta fotos da instalação do coletor Palmex dentro do cercado do poço de monitoramento da RIMAS em frente ao parque Três Morrinhos, Terra Rica – PR.



Figura 5. Instalação do coletor de chuva ao lado do poço da RIMAS em Terra Rica - PR

O mapa de pontos de coleta de águas subterrânea e pluviométricas é apresentado na Figura 6, pois conta com explicações complementares no capítulo Materiais e Métodos.

Etapa 2 – Monitoramento. Deu-se início em março de 2020 a amostragem de água subterrânea provenientes dos poços particulares mensalmente, devido à facilidade de coleta e armazenamento das amostras. Os proprietários se dispuseram a colher uma alíquota de água na boca do poço de acordo com o demonstrado na ocasião da visita e acondicionarem as amostras em um local abrigado de luz e calor até que possamos realizar uma visita para recolhê-las. Como na semana seguinte a primeira campanha de campo em março foi instituído *lockdown* na cidade de São Paulo e sucessivas ações ao longo do ano para conter a pandemia de Covid-19 impossibilitaram a campanha de amostragem da RIMAS bem como as campanhas para a obtenção dos dados de variação de nível d'água. Apesar dos dados de nível d'água ficarem armazenados por um longo tempo nos equipamentos instalados dentro dos poços, o longo tempo em que esses poços ficam sem manutenção aumentam os riscos de perda de dados por depreciação dos equipamentos e até mesmo depredação dos poços. As amostras de chuva começaram a ser coletadas à partir de março nos três pontos graças à colaboração dos professores José Cláudio da UFMG que tem coletado amostras tanto de água subterrânea como de chuva; Do prof. Dr. Rodrigo Manzione da UNESP de Tupã que opera o coletor de lá e do sr. Cláudio que é zelador do parque Três Morrinhos em Terra Rica que também coleta amostras de água subterrânea e chuva. Essa etapa terá continuidade nos anos seguintes e durante as amostragens nos poços de monitoramento (RIMAS) serão realizadas determinações de parâmetros físico-químicos in-situ (pH, EC e T) uma vez que as amostras são obtidas por meio de equipamentos que se utilizam do método low-flow. As amostras coletadas serão preparadas e encaminhadas para o laboratório. A determinação das razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$

serão determinadas pelo método de ICPAES, espectrometria de emissão atômica por plasma induzido e os resultados serão expresso em relação ao padrão VSMOW. Para obtenção de quantidade de dados suficiente para a interpretação proposta nesse estudo será necessários mais de dois anos de monitoramento.

Etapa 3 – Determinação Analítica, Sistematização e Interpretação de Resultados. A amostragem para determinação isotópica de $\delta^{18}O$ e δ^2H seguirá o protocolo de amostragem da AIEA (Sample Procedures for Isotope Hydrology). Os valores obtidos expressos com notação delta (δ) representam a proporção de uma espécie em relação ao padrão internacional, VSMOW, utilizando-se as relações isotópicas do hidrogênio, $2H/1H$ e do oxigênio $18O/16O$. Como esses valores são numericamente muito pequenos, por convenção, são multiplicados por mil, passando a notação dos mesmos sempre acompanhadas do símbolo ‰, partes por mil, (Martinelli, 2009). Para o oxigênio, essa razão isotópica pode ser expressa da seguinte forma:

$$\delta^{18}O_{amostra} = \left(\frac{m \left(\frac{18O}{16O} \right)_{amostra}}{m \left(\frac{18O}{16O} \right)_{referencia}} \right) \times 1000 \text{ ‰}_{VSMOW}$$

Serão utilizadas ferramentas estatísticas para avaliação da qualidade dos resultados e para a separação de classes e assinaturas isotópicas, sendo os resultados reportados como ‰ relacionados a VSMOW, padrão Vienna Standar Mean Ocean Water, gerando correlações regionais e globais. As primeiras amostras serão encaminhadas ao laboratório em fevereiro de 2021 o que possibilitará em breve ter resultados analíticos para serem avaliados.

Etapa 4 – Avaliação integrada dos resultados e desenvolvimento de modelo conceitual regional. Avaliação e integração de todos os resultados obtidos corroborando ou refutando as hipóteses apresentadas.

Etapa 5 – Redação final da Tese. Confecção da redação final da tese em consonância as normas da UNESP e CPRM, defesa pública e cumprimento das exigências legais para obtenção do grau pretendido.

Estratégia Executiva

Para a viabilização dessa proposta de pesquisa parto da premissa que a CPRM dispõe de infraestrutura e de informações primárias, as quais por ser pesquisadora terão acesso, como os dados da rede de monitoramento e os dados de atlas hidrometeorológico entre outros. O embasamento técnico que apresento, pois atuo na área de hidrogeologia da CPRM desde 2007, atualmente supervisiono os projetos de hidrogeologia e gestão

territorial que são executados na superintendência de São Paulo como a rede de monitoramento de água subterrânea, o sistema de informações hidrogeológicas, o programa de isotopia e a cartografia hidrogeológica. Como executora já atuei na rede RIMAS até 2012; Executei diversos mapas hidrogeológicos em diferentes escalas, realizei instalação de estações GNIP, ministrei treinamentos internos sobre isotopia básica; Na linha de pesquisa sobre gestão de recursos hídricos, participo da elaboração dos Estudos Hidrogeológicos das Regiões Metropolitanas de São Luís e Manaus; Na linha de pesquisa sobre recargas estamos iniciando projetos de delimitação preferencial de áreas de recargas dos aquíferos livres e definição de metodologia para elaboração de balanços hídricos. A presente proposta de pesquisa está vinculada ao Programa Nacional de Aplicações Isotópicas da CPRM iniciado em 2015 pelo qual a CPRM se efetivou como Centro Colaborativo da AIEA na área de aplicação de isótopos em hidrologia na América Latina. Neste caso, o estabelecimento das causas entre os eventos de precipitação e os resultados de recarga no Sudeste do país, através do monitoramento isotópico, foi considerado relevante ao Programa de Aplicações Isotópicas, estando esse projeto de doutoramento oficializado no programa de capacitação da Câmara Técnico Científica da CPRM.

Material e Métodos

As circulações atmosféricas geradas pelos fenômenos climáticos que pretendemos observar em linhas gerais se deslocam da zona da linha do equador em direção aos trópicos e vindos do círculo polar antártico em direção aos trópicos conforme ilustrado na Figura 2. Desse modo, determinou-se uma transecta de direção aproximada NNE/SSW no centro do Sistema Aquífero Bauru e ao longo desta selecionamos pontos a serem monitorados, como demonstrados na Figura 5. A coleta de amostras de água subterrânea se dará de duas formas para que seja possível obter uma cobertura territorial maior, bem como uma frequência maior de amostragem que possibilite avaliar a variação isotópica. Nas proximidades dos poços da RIMAS foram selecionados poços tubulares de propriedades particulares onde serão coletadas amostras mensalmente. Esse arranjo possibilitou a obtenção de dados diante da atual situação por que passamos com restrições de mobilidade, de recursos e crise sanitária mundial. Os poços da Rede Integrada de Monitoramento de Água Subterrânea, RIMAS, no Sistema Aquífero Bauru foram todos perfurados pela equipe de operação da CPRM tendo sua documentação construtiva completa de acordo com a norma ABNT NBR 12244. Constituem poços revestidos PVC de 4", profundidades inferiores a 80m, seção filtrante 12 contínua também de 4" e encontram-se equipados com sensores de nível que coletam informações de pressão e coluna d'água a cada hora. A RIMAS coleta anualmente amostras de água para análise de cátions, ânions e isótopos H e O pelo

método low-flow e também realiza a medição de parâmetros como temperatura, pH e condutividade elétrica. Nesses poços registram-se por meio de sensores dedicados as variações de nível d'água em intervalo de tempo horário. Os procedimentos de coleta e de amostras de chuva com vista à determinação do seu conteúdo isotópico são os recomendados pela IAEA (<http://www.iaea.org/water>), de maneira a garantir a obtenção de dados confiáveis. Para a coleta das amostras de chuva serão utilizados três coletores passivos, do tipo PALMEX (Gröning et al., 2012), cujo desenho previne a evaporação sem a necessidade de utilização de óleo mineral. Os coletores estarão localizados em Uberaba-MG (ponto mais ao norte-nordeste da transecta), Tupã-SP (região central da área) e Terra Rica-PR. Após a coleta todas as amostras serão preparadas e armazenadas em frascos de vidro ambas de 30 ml evitando o fracionamento isotópico e serão encaminhadas ao laboratório. As análises serão realizadas pelo método de Espectrometria Laser de Cavidade Oca (Cavity Ring Laser Spectroscopy) e os resultados expressos em relação ao padrão VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Para o tratamento dos dados e confecção de mapas serão utilizados softwares comerciais como Microsoft Office e ArcGis, os quais são de utilização padrão pela CPRM.

Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS

A Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, RIMAS, é constituída por poços piezométricos implantados e operados pela CPRM nos principais aquíferos livres e porosos brasileiros. Seu objetivo é acompanhar as alterações espaciais e temporais na qualidade e quantidade das águas subterrâneas construindo séries históricas que subsidiarão estudos bem como a gestão integrada dos recursos hídricos, dando suporte às estratégias e políticas de uso, proteção e conservação dos recursos hídricos subterrâneos. O monitoramento quantitativo é feito através de medidores de nível automáticos para medição horária do nível estático e plataformas automáticas de coleta de dados (PCDs), para aquisição dos dados pluviométricos a cada 15 min. O monitoramento qualitativo é realizado anualmente através da análise dos parâmetros químicos e físico-químicos estabelecidos pela resolução CONAMA 396/2008. Na ausência de estações PCDs instaladas junto aos poços são utilizados dados da rede hidrometeorológica nacional. A área de atuação da Superintendência Regional de São Paulo corresponde aos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Nessa área a RIMAS possui 49 poços de monitoramento em operação, sendo 36 no SAB (13 SP, 10 MS, 13 PR). No Estado de Minas Gerais, a RIMAS possui mais 23 poços no SAB. A Figura 6 apresenta a área de ocorrência do Sistema Aquífero Bauru, os municípios onde existem poços de monitoramento da RIMAS, as localidades selecionadas onde serão

coletadas as amostras de água subterrânea tanto em poços particulares como da RIMAS e os locais onde estão instalados os coletores de águas pluviométricas.

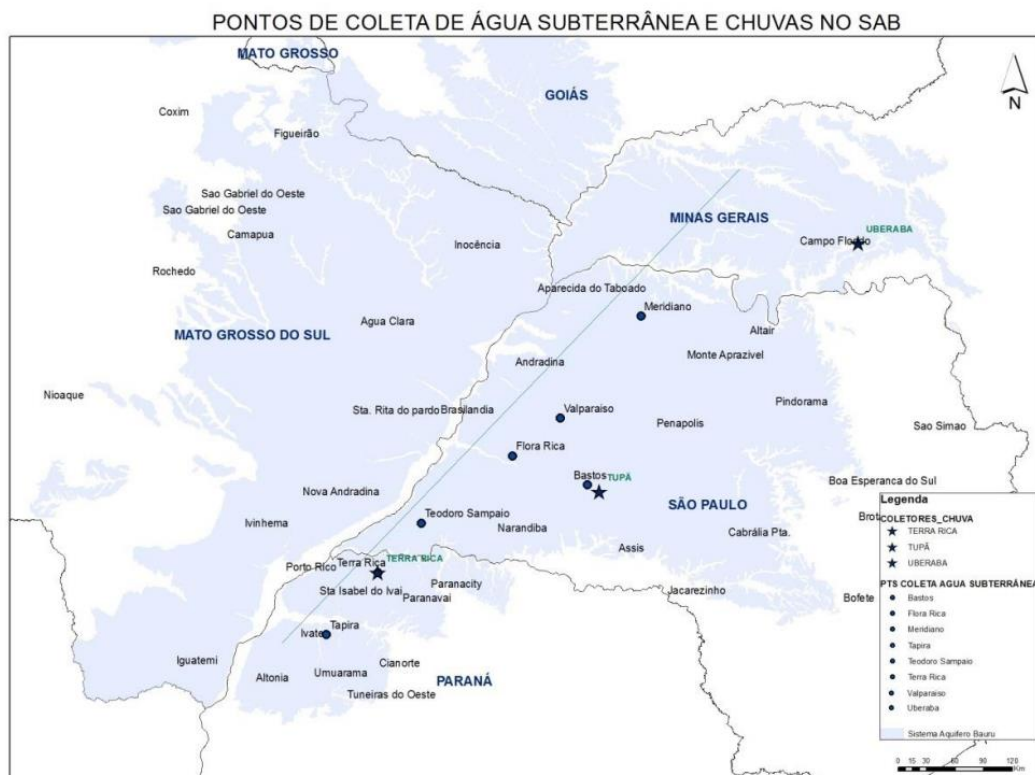


Figura 6 – Localização dos poços da RIMAS que monitoram o SAB e pontos selecionados para o monitoramento isotópico nesse projeto.

Bibliografia Fundamental

Para o desenvolvimento desse projeto se fará necessário o estudo prévio entre outras das seguintes obras:

APHA, AWWA, and WEF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed. American Public Health Association, Washington, D.C.

Berner, R. A.; Berner, E. K. Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles. Princeton University Press, New Jersey, 2012.

Bowen, G.J., 2008. Spatial analysis of the intra-annual variation of precipitation isotope ratios and its climatological corollaries. J. Geophys. Res. Atmos. 113, 1–10.

<https://doi.org/10.1029/2007JD009295>

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. Applied Hydrology, 1st ed. McGraw Hill, New York.

Clark, I. D.; Aravena, R., 2005. Environmental Isotopes in Ground Water Resource and Contaminant Hydrogeology. San Diego: NGWA, NGWA COURSE #394 - January 25-26, 103p.

Clark, I. D.; Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology, Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1997. 325p. 14

- Coelho, C.A.S., Cardoso, D.H.F., Firpo, M.A.F., 2016. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* 125, 769–784. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>
- Conroy, J.L., Cobb, K.M., Noone, D., 2013. Comparison of precipitation isotope variability across the tropical Pacific in observations and SWING2 model simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 5867–5892. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50412>
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* (80). 133, 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dall’Olio, A. 1976. A composição Isotópica das Precipitações do Brasil: Modelos Isotérmicos e a Influência da Evapotranspiração na Bacia Amazônica. Piracicaba. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Phys. Lab. II, H. C. Orsted Institute, University of Copenhagen.*
- Dos Santos, V., & Gastmans, D., 2017. Composição química da água de chuva em Rio Claro (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 37(2), 45-60.
- Dos Santos, V. 2015. Monitoramento da Composição Isotópica e Físico-Química da Água de Chuva no Município de Rio Claro (SP). Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP-Rio Claro. 51p.
- Dos Santos, V., 2018. Variações na Composição Isotópica da Precipitação na Porção Central do Estado de São Paulo e sua Relação com Sistemas Climáticos. UNESP.
- Fritz, P.; Fontes, J.Ch. (Ed.), 1980. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Amsterdam: Inter
- FERNANDES, L.A. & COIMBRA, A.M., 1994. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo. V.24 (n. 3). p.164 – 176.
- FÚLFARO, V.J. & PERINOTTO, J.A.J., 1996. A Bacia Bauru: estado da arte. *SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL*, 4, Águas de São Pedro. Boletim... p. 297-303.
- Gastmans, D., Chang, H.K., Hutcheon, I., 2010. Stable isotopes (H-2, O-18 and C-13) in groundwaters from the northwestern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil). *Hydrogeology Journal*, 18 (6), 1497-1513.
- Gastmans D. et al., 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Bol Geol Minero* 123(3): 249-265.
- Gastmans, D., Hutcheon, I., Menegário, A.A., Chang, H.K., 2016. Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). *J. Hydrol.* 535. 15

Gastmans, D. et al., 2017. Controls over spatial and seasonal variations on isotopic composition of the precipitation along the central and eastern portion of Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*.

Gastmans, D., Mira, A., Kirchheim, R., Vives, L., Rodríguez, L., Veroslavsky, G., 2017. Hypothesis of Groundwater Flow through Geological Structures in Guarani Aquifer System (GAS) using Chemical and Isotopic Data. *Procedia Earth Planet. Sci.* 17, 136–139.

Govender, Y., Cuevas, E., Sternberg, L.D.S., Jury, M.R., 2013. Temporal variation in stable isotopic composition of rainfall and groundwater in a tropical dry forest in the northeastern Caribbean. *Earth Interact.* 17, 1–20.

Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeol. J.* 10, 91–109.

Kurita, N., 2013. Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118p.

Koeniger, P., Gaj, M., Beyer, M., Himmelsbach, T., 2016. Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations. *Hydrol. Process.* 30, 2817–2834.

Mendonça, F. e Danni-Oliveira, I. M., 2007. *Climatologia: Noções básicas e climas do Brasil*. Oficina de Textos: São Paulo, 2007.

Mook, W., 2000. *Environmental Isotopes in the hydrological Cycle: Principles and Applications*. IAEA. Mook, W. G. (Ed.), 2002. *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Munksgaard, N. C.; Wurster, C. M.; Bass, A and Bird, M. I., 2012. Extreme short-term stable isotope variability revealed by continuous rainwater analysis. *Hydrol. Process.* 26, 3630–3634.

PAULA E SILVA, F., 2003. *Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP. Tese de Doutorado. Rio Claro. 166.

Rozanski, K.; Araguás-Araguás, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotope Patterns in Modern Global Precipitation, *Geophysical Monograph* 78. In: *Climate Change in Continental Isotope Records*, American Geophysical Union, 1-36.

Rozanski, K.; Araguás-Araguás, L., 1995 *Spatial and Temporal Variability of Stable Isotope Composition of Precipitation Over the South American Continent*. Isotope Hydrology Section, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. 24 (3): 379-390.

Sánchez-Murillo, R., et al., 2017. Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16. *Hydrol. Process.* 31, 956–967.

SANTOS, G., et al., 2018. Possíveis influências da Zona de Convergência do Atlântico Sul no comportamento freático e isotópico das águas subterrâneas do SAB e SAG (RIMAS) na região sudeste do Brasil. *Águas Subterrâneas*.

Sracek, O., Hirata, R., 2002. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeol. J.* 10, 643–655.

STRADIOTO, M. R., CHANG, H.G., 2015. Composição Isotópica— $\delta^{18}\text{O}$ e δD —das águas do Sistema Aquífero Bauru no estado de São Paulo. *Geosciences. Geociências*, v. 34, n. 3, p. 411- 422, 2015.

Vuille, M., Werner, M., 2005. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: observations and model results. *Climate Dynamics* (2005) 25: 401-413

APÊNDICE D – Projeto de Pesquisa CRP de Aplicações Isotópicas em Áreas Úmidas

Tema Geral da Pesquisa: Avaliação isotópica dos impactos das mudanças climáticas e hidrológicas nas interações entre os ecossistemas de zonas úmidas e águas subterrâneas.

Tema Específico da Pesquisa: Técnicas de Multitraçadores Isotópicos aplicadas ao entendimento da dinâmica hídrica de Zonas Úmidas de forte interação entre águas subterrâneas e superficiais.

Título da Pesquisa: *Multitracing Techniques assesment on understanding the water dynamics in the Wetlands ("Pantaninho") of the Tietê River Basin, Brazil*

Síntese Geral da Proposta: Esta proposta visa compreender a dinâmica local de recarga e descarga do SAG (Sistema Aquífero Guarani) e sua relação específica com áreas úmidas, neste caso em fase piloto, áreas associadas à Bacia do Rio Tietê no Estado de São Paulo. Ambos os corpos d'água estão localizados em regiões de afloramento das principais unidades aquíferas do SAG. Tradicionalmente vistas como áreas potenciais de recarga, à medida que novos estudos estão sendo desenvolvidos, essas áreas apresentam importantes comportamentos de descarga e uma relação de manutenção de ecossistemas aquáticos, até então amplamente subestimada. Avaliar o papel das águas subterrâneas SAG na formação e manutenção destes dois sistemas de zonas húmidas contíguas e assim destacar o papel dos serviços ecossistêmicos desempenhados pelas águas subterrâneas constituem os objetivos da proposta. Portanto, a proposta envolve a combinação e aplicação de técnicas de multitraçadores envolvendo isótopos estáveis, técnicas de radônio, gases nobres, além de técnicas de datação utilizando ^3H , ^3H - ^3He e ^4He . O SAG no Brasil e, especificamente no Estado de São Paulo, tem sido amplamente estudado por meio de técnicas isotópicas, mas sempre em escala regional. Nesse sentido, o presente estudo representa um desafio e uma possibilidade concreta de testar essas metodologias e desenvolver capacidades locais nacionais e continentais. A Figura 1 apresenta a localização das áreas alvo deste projeto.



Figura 1. Localização da área alvo.

Contexto Científico: Reconhecido como um dos mais importantes aquíferos regionais transfronteiriços do mundo, o SAG tem sido alvo de extensos esforços de pesquisa. O potencial do aquífero para fornecer grandes quantidades de água para uso doméstico, agrícola e industrial é bem conhecido e serviu como fator chave de motivação para entender seu modelo de circulação. No entanto, apesar dos enormes volumes de águas subterrâneas armazenadas no SAG, suas taxas de recarga são consideradas baixas. As demandas gerais estão aumentando significativamente e já foram registrados grandes rebaixamentos e perdas de pressão. É um cenário semelhante vivenciado por outros aquíferos continentais regionais ao redor do mundo. As abordagens isotópicas começaram no início da década de 1970, graças à cooperação internacional, coincidindo com o advento das técnicas isotópicas no Brasil. As áreas de recarga foram reconhecidas pela primeira vez por meio de medições piezométricas de carga, seguidas pelo desenvolvimento de redes de fluxo regionais.

As avaliações isotópicas provaram ser úteis na construção de modelos conceituais de fluxo, principalmente definindo o tamanho e a compartimentação do aquífero; direção e magnitudes de linhas de fluxo podem ser testadas e comparadas com dados de aquíferos obtidos de abordagens hidráulicas; as áreas de afloramento de aquíferos em termos de comportamento de recarga e/ou descarga podem ser mais bem definidas; As informações isotópicas, uma vez interpretadas de forma integrada, são consideradas

cruciais para estimativas de armazenamento, balanço hídrico, estimativa de taxas de renovação e, portanto, melhor definição de estratégias sustentáveis de gestão da água. A datação da idade das águas subterrâneas usando 4He e radionuclídeos de vida longa ofereceu restrições adicionais para o modelo conceitual de fluxo de águas subterrâneas. Como resultado, as taxas mais baixas de recarga de águas subterrâneas para o GAS foram estimadas em pelo menos uma ordem de magnitude menor do que o considerado anteriormente.

Esse entendimento da dinâmica regional do GAS precisa ser complementado por estudos de escala mais detalhada em áreas estratégicas, começando pelo entendimento das funções de recarga e descarga de algumas áreas de afloramentos de GAS. O estudo de Santarosa et al. (2021) estimaram a variabilidade espacial e temporal das recargas que ocorrem na faixa de afloramento do GAS do Estado de São Paulo. Este é um estudo que traz avanços conceituais, mas mesmo assim, dado seu caráter regional, não fornece respostas sobre o modelo conceitual pelo qual se processam as recargas e/ou descargas. O presente trabalho aguça o foco em uma área de áreas úmidas assentadas em áreas de afloramento do GAS no Estado de São Paulo.

As áreas úmidas consideradas fazem parte de uma área de conservação ambiental no Estado de São Paulo com políticas claras para a conservação dos remanescentes de ecossistemas naturais e para ampliar os serviços ambientais e as condições ecológicas para a manutenção da fauna. Análogo ao estudo realizado por Lucia et al, 2021 no Pantanal de Esteros del Ibera na Argentina, o objetivo aqui é investigar as origens, dinâmicas e interfaces com as águas do GAS através do uso de técnicas de multitraçadores, precedidas mais de avaliações detalhadas do ponto de vista do quadro geológico e hidrológico da área. É um alvo emblemático do ponto de vista conceitual do SAG cujo entendimento certamente trará não apenas uma nova visão da dinâmica específica válida para o próprio sítio, mas também constituirá referência para novas interpretações em todas as áreas de afloramento do SAG. A Figura 2 apresenta o contexto hidrogeológico da área.

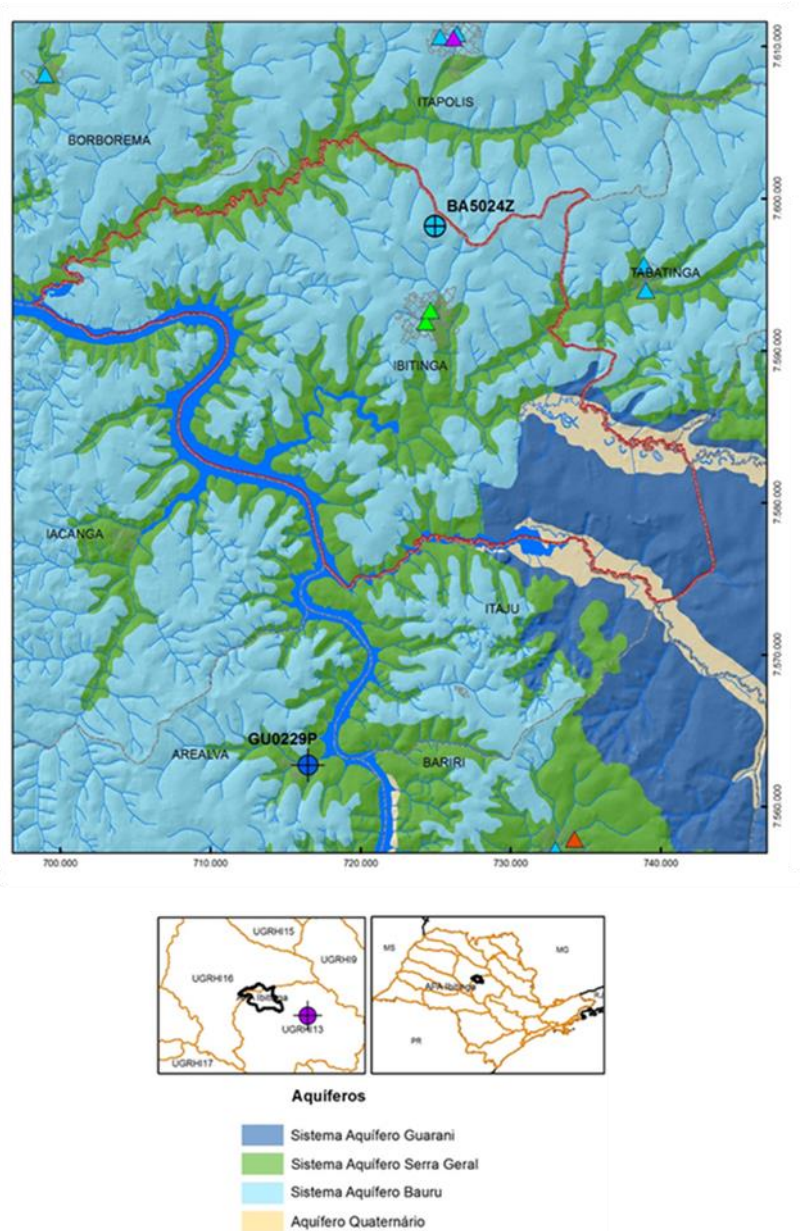


Figura 2. Contexto Hidrogeológico da Área.

As zonas húmidas e os aquíferos não podem ser interpretados como entidades estanques e independentes. Existe uma conectividade entre eles, o que é justamente essencial para a manutenção da qualidade e quantidade de água em ambos. A dinâmica dessa conectividade precisa ser compreendida, como base para a proteção dessas áreas úmidas, bem como para a sustentabilidade dos sistemas de águas subterrâneas. É necessária uma avaliação quantitativa do balanço de entradas e saídas, ou seja, os processos hidrológicos em ação, incluindo origem da água, caminhos percorridos pela água, tempos de residência, influência da evapotranspiração. São informações essenciais para que os tomadores de decisão possam avaliar os impactos atuais e futuros relacionados às intervenções antrópicas e/ou decorrentes das mudanças climáticas. O uso combinado de isótopos ambientais estáveis (chuvas, corpos superficiais e águas

subterrâneas) e radioativos com metodologias hidrogeológicas tradicionais (detecção remota, mapeamento geológico, geofísica, testes hidráulicos e campanhas hidroquímicas) responde às questões essenciais aqui levantadas e demandadas.

Objetivo Geral: Este estudo procurará compreender a dinâmica funcional das zonas húmidas e a sua relação com as águas subterrâneas (em particular, as águas do SAG), definindo modelos conceituais específicos de recarga/descarga. Esse entendimento é considerado essencial para avaliar os impactos devido a mudanças nos padrões de uso da água e da terra e/ou mudanças climáticas futuras. Nesse sentido, buscaremos compreender o papel ecossistêmico das áreas úmidas e subterrâneas (proteção contra secas e enchentes, manutenção da flora e fauna, amortização e fixação de contaminantes agroquímicos). De um ponto de vista específico, o estudo testará, promoverá e orientará sobre a aplicabilidade e eficiência de uma série de técnicas isotópicas para esse tipo de cenário, em particular, para as diversas áreas similares no âmbito do GAS na América do Sul continente e outros aquíferos semelhantes. A partir da determinação das fontes, interações e caminhos de fluxo dos sistemas de águas subterrâneas que suportam os principais tipos de zonas úmidas, será possível desenvolver diretrizes de boas práticas na integração de isótopos ambientais e outros indicadores na avaliação de processos hidrológicos para a gestão eficiente dos recursos hídricos nos sistemas de águas subterrâneas e zonas húmidas dependentes. A Figura 3 ilustra atividades metodológicas previstas nesta pesquisa.

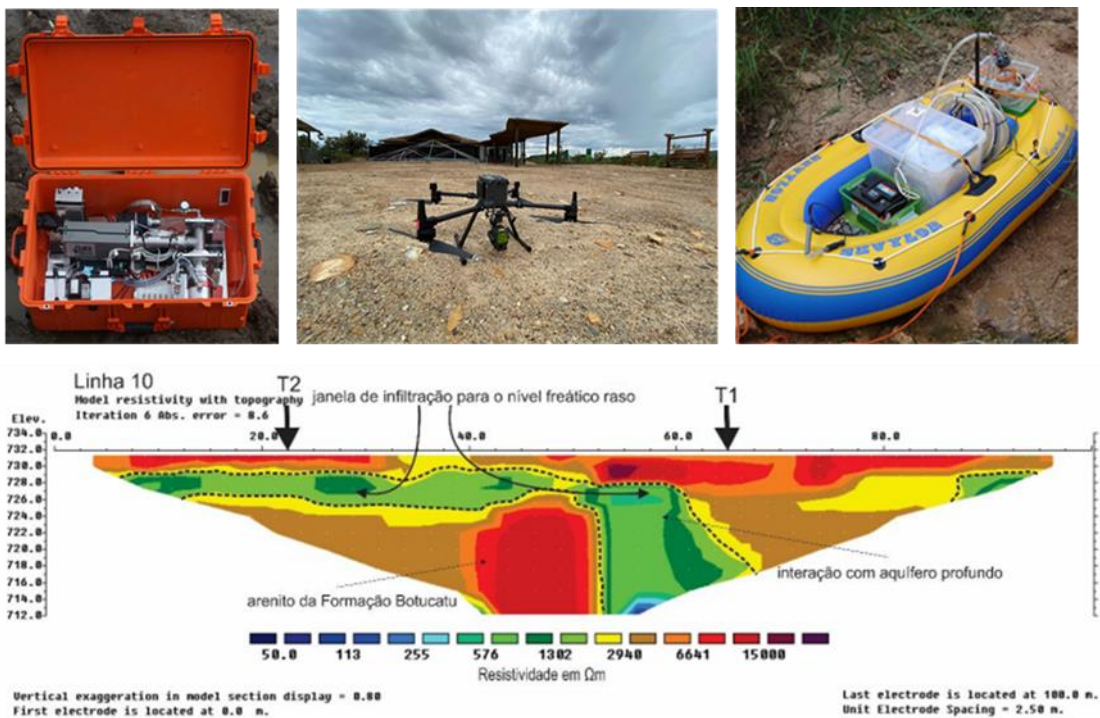


Figura 3. Abordagens Metodológicas Previstas na Pesquisa (Espectrômetro de Massa para Gases, Drones com Radar, Botes para Detectores de Radônio e Geofísica).

Atividades Programadas: O Plano de Trabalho proposto para este Projeto consiste nas seguintes fases:

Atividade 1: Reconhecimento e avaliação do enquadramento geológico e hidrológico;

Atividade 2: Geração de mapas de base cartográfica e abordagens de Sensoriamento Remoto;

Atividade 3: Avaliação Geofísica

Atividade 4: Seleção de isótopos estáveis, estações de amostragem de 3H, 3H-3He e Gases Nobres (chuvas, águas superficiais e subterrâneas) e transectas de radônio;

Atividade 5: (Estação chuvosa) Campanhas de Campo para Isótopos e Hidroquímica;

Atividade 6: Campanha de Campo para Transectas de Radônio;

Atividade 7: Força-tarefa analítica e Avaliação de resultados preliminares;

Atividade 8: (Estação Seca) Campanha de Campo para Isótopos e Hidroquímica;

Atividade 9: Campanha de Campo para Transectas de Radônio;

Atividade 10: Força-tarefa analítica e Avaliação dos resultados totais;

Atividade 11: Sistematização de dados e desenvolvimento de relatório;

Atividade 12: Elaboração de documentos e workshops para capacitação e fortalecimento institucional;

Resultados Esperados:

Resultado 1: Mapa Base e Conjunto de Dados GIS;

Resultado 2: 80 amostras analisadas para isótopos estáveis, 20 para 3H e 3H-3He e Gases Nobres (considerando as duas campanhas);

Resultado 3: 40 amostras analisadas para hidrogeoquímica;

Resultado 4: 04 perfis geoeletricos de 4km com modelo conceitual geológico 3D;

Resultado 5: 8 Transectas para Radônio (considerando as duas campanhas) perfazendo 4km de levantamento;

Resultado 6: Avaliação do conjunto de dados e desenvolvimento do relatório final

Resultado 7: Modelo conceitual para a conexão zona úmida-aquífero

Resultado 8: Manual de instrução e Nota Técnica do SGB para abordagem da relação água superficial e subterrânea

Resultado 9: Seminários de Capacitação com instituições intervenientes

Resultado 10: Desenvolvimento de artigos para publicação em revistas de prestígio

Aspectos Executivos: O SGB é formalmente reconhecido pela AIEA como Centro Colaborativo para a execução e difusão de aplicações isotópicas em hidrologia. Por meio de seu programa nacional de aplicações isotópicas em hidrologia, o SGB vem desempenhando um papel de liderança em hidrologia isotópica no país e no continente. Dentre as diversas iniciativas em andamento, destacam-se: (i) A execução do Contrato

de Estudos Isotópicos Complementares nos Compartimentos Sul, Oeste e Leste do Sistema Aquífero Guarani (Brasil) - Datação de Águas Subterrâneas em Percursos Definidos o CRP F30063 - Caracterização de sistemas de águas subterrâneas fósseis usando radionuclídeos de vida longa, que resultou na tese de doutorado (Gases Nobres Aplicados ao Sistema Aquífero Guarani por Kirchheim, 2021; (ii) Realização do CRP em andamento (F30063 - Fortalecimento de campo e laboratório capacidades no Brasil para o uso de radionuclídeos de longa vida como parte dos estudos hidrogeológicos em andamento no Sistema Aquífero Guarani) para complementar a análise de gases nobres e radioisótopos no Brasil; (iii) Participação ativa na condução do CRP para a implementação piloto do GNIR em 03 bacias hidrográficas do Brasil (iv) Condução da Rede GNIP no Brasil A UNESP-CEA (Centro de Estudos Ambientais), através do pesquisador Gastmans, vem coordenando o Contrato (Controles Multiescala e Processos de Nuvem Relacionados às Variações na Composição Isotópica da Precipitação na Região Sudeste do Brasil) sob o CRP Variabilidade Isotópica da Chuva para Avaliação dos Impactos das Mudanças Climáticas) e participando dos outros CRP's mencionados como uma instituição associada. Existem várias pesquisas acadêmicas sobre o tema isótopos com resultados acadêmicos expressivos em termos de publicações. O Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG-SP), através do pesquisador Esaki, vem coordenando o CRP (Estudo isotópico do Sistema Aquífero Tubarão na porção leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo, Brasil sob CRP F33023 – Uso de Radionuclídeos Longa Vida para Datação de Águas Subterrâneas Muito Antigas) e atuação na descrição geológica e hidrogeológica da região em estudo e da Unidade de Conservação de Ibitinga. O Instituto Florestal (IF-SP) do Estado de São Paulo é responsável pelas ações de manejo e proteção da respectiva Unidade de Conservação em que ambos os mangues estão localizados. Pesquisadores do IF vão participar da equipe de execução do projeto.

O projeto de pesquisa em questão será coordenado por pesquisadores do SGB associados ao Programa de Aplicações Isotópicas na Hidrologia e executado a partir da Unidade Regional do SGB em São Paulo. Toda a infraestrutura logística e de recursos humanos será operada pela referida Unidade Regional. Participam ativamente desta iniciativa os seguintes quadros do SGB: 05 hidrogeólogos, 02 engenheiros, 02 técnicos, 02 geofísicos e 01 oportunidade de estágio. Associados à execução deste projeto, estarão em curso 02 oportunidades de bolsa de iniciação científica, 02 oportunidades de mestrado e 01 oportunidade de doutorado, as quais serão tramitadas junto ao CTC e Diretoria DHT do SGB.

APÊNDICE E – Projeto de Pesquisa CRP Variabilidade Isotópica da Precipitação

Tema Geral da Pesquisa: Variabilidade Isotópica da Chuva como forma de Avaliar Impactos de Mudanças Climáticas.

Título da Pesquisa: Multiscale Controls and Cloud Processes Related to Variations on Precipitation Isotopic Composition of Precipitation in Southeastern Region of Brazil.

1. SUMMARY OF WORK DEVELOPED

The variability of the isotopic composition of rainfall in tropical areas has been associated with several effects of climatic regional processes, such as variations in the source of vapor/humidity of rainfall (Jouzel et al., 2013), reevaporation during transport of air masses and rainfall (Novello et al., 2012; Risi et al., 2010), monsoon systems (Ishizaki et al., 2012; Ren et al., 2017), influence of El Niño-Southern Oscillation (dos Santos et al., 2019; Moerman et al., 2013), and the processes of the rainfall type formation (convective x stratiform) (Aggarwal et al., 2012; Lacour et al., 2018; Torri et al., 2017). Regional climatic controls over isotopic composition in central region of São Paulo State (dos Santos et al., 2019; V. Dos Santos et al., 2019) and the Southeastern part of Brazil (Santos et al., 2022), were analyzed and the results showed the relation between monthly isotopic composition and classical effects (amount precipitation $r > 0.60$, seasonality and continentality), the role of recirculation processes associate with atmospheric systems, South American Convergence Zone (SACZ) during the wet season (October-March), and Cold Front in the dry season (April-September). On daily isotopic composition, classical effects are less visible, and convective activity and different moisture sources (Amazon and the Atlantic Ocean) are the main parameters that influence depleted $\delta^{18}O$ values (~ -6 to -8) during the wet season. The comparison between two strong (1997- 1998 versus 2014-2016) El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on daily isotopic records was also associated with atmospheric large-scale processes and moisture transport, particularly the recycling of transpiration fluxes from the Amazon region contribute to greater moisture content and higher d-excess values during the dry season in 1997-98 (V. Santos et al., 2019). This project is based on monthly, daily, weekly long-term monitoring (2013-2022) as well as intraevent (minute to hour) on isotopic composition of precipitation, combined with meteorological data (ground, Micro Rain Radar (MRR), Reanalysis data, Hysplit model and GOES satellite) for analyzing the regional and local processes. The main findings regarding the differences observed between convective and stratiform events sampled are synthesized in the table presented below.

Main features	Convective (Cv)	Stratiform (St)
High-frequency events	8	13
Samples analyzed	90	170
$\delta^{18}O$ avg	-6.68	-5.62
δ^2H avg	-36.5	-29.4
<i>d</i> -excess avg	16.9	15.4
LMWL	$\delta^2H = 8.27 \cdot \delta^{18}O + 18.81$	$\delta^2H = 7.56 \cdot \delta^{18}O + 13.04$
Range of $\delta^{18}O$ values	-15.22 to -1.52	-14.37 to 2.56
Classification	40 pixel with Brightness Temp. GOES-16 <-38°C; Rain intensity 10mm/hour; near surface Z >=38dBZ; No bright band MRR	Bright band detected in MRR, difference of 4dBZ (Z) between heights and 2m.s-1 (vertical velocity), 2mm.min-1 (Rain rate), 2g.m-3(Liquid water content)
Reflectivity near surface (Z avg)	38.1 dBZ	27.1 dBZ
Rain intensity avg	13.85 mm.h-1	4.65 mm.h-1
Isotopes Interpretations	Day-night differences	Life cycle of St rainfall events
Similarities	Evaporation sub-cloud during low rain rate (mm.min-1) and relative humidity (%); moisture source and transport and atmospheric systems context	

The recent inauguration of the operation of the network for monitoring isotopes in precipitation in Brazil (Franzini et al. 2019), currently comprising 22 GNIP stations, with the Geological Service of Brazil with the support of the IAEA as inducing institutions is relevant and will produce information capable of meeting the needs of various hydrological and hydrogeological studies. According to Gastmans et al. 2021 is undoubtedly an important step, but it is necessary to evolve in lines of investigation considered essential: (i) in determining the types of rain, including a detailed analysis of extreme events and cyclones; (ii) studies on the residence time of Amazonian vapor in the atmosphere and its relationship with deforestation and the isotopic composition of vapor and rain; and (iii) precipitation studies on the Northeast region (mainly in the semiarid region) and South of the country, in view of the limits of the action of Amazonian humidity. The same authors emphasize the determination of the local meteoric straight lines for these regions can contribute more effectively in the comparison with the other reservoirs, improving the understanding of the aquifer recharge processes. The systematization of information on the isotopic composition of precipitation and groundwater also opens precedents for expanding studies on the isotopic composition of surface waters.

2. DETAILS

The daily isotopic composition of precipitation in Rio Claro is related to specific climatic features, such as convective activity or organized deep convection that is occurred over São Paulo State during the wet season. These climatic processes interact with Amazon flux vapor and SACZ during the summer producing stratiform and convective precipitation. During winter, Atlantic Ocean vapor and CF, produce lower precipitation. These atmospheric systems and the rainfall type have been analyzing by intra-event collect, MRR vertical profile information, reanalysis data, Hysplit trajectories and GOES

imagery satelital data. Intra-events allow assessment of the gradual or abrupt changes in the microphysical, local, meteorological, and synoptic parameters influencing rain formation (Celle-Jeanton et al., 2004). Intra-event precipitation samples were manual collected on an inclined metal roof, at 5-10-30 minutes intervals, depending on the rain intensity. After sampling, each rain sample was filtered using a 0.45 mm cellulose acetate syringe filter and immediately stored in 30 ml amber bottle. Air bubbles were avoided inside the bottle to prevent isotopic fractionation. Stable isotope compositions were measured by Cavity Ring Laser Spectroscopy, at the laboratory of Hydrogeology and Hydrochemistry of the Department of Applied Geology. The MRR generate information every 1s, as reflectivity (Z), falling speed (w), rainfall rate (RR) and liquid water of content (LWC). It has the height resolution of 31 steps: It was tests different measurements to each 150m, 200m, 300m and 350m along vertical heights of the surface to up 4650m, 6200m, 9300m and 10.850m. Coupled with MRR there has a compact meteorological station for comparison of rainfall rate and ground information (temperature, relative humidity, and atmospheric pressure) for relating isotopic analyses. From 2019/September to 2021/April was collected 29 intra-event and 455 samples. The intra-event choices for isotopic analysis were based on the intensity of the rain, the number of samples, meteorological conditions, atmospheric systems, and rainfall type. The classification of rainfall types was based on visualized and delimitation of melting layer (bright band - BB) in MRR vertical profiles (from surface to atmosphere) (Endries et al., 2018; Mehta et al., 2020), and GOES-16 satellite imagery (from atmosphere to surface) (Ribeiro et al., 2019). Stratiform rainfall was visualized by the identification of BB in MRR imagery (Figure 1), with delimitation computed by the difference of Z (around 4dBZ), w (2m.s-1) and RR (2mm.min-1) between heights, according to Mehta et al. (2020). In general, the vertical profile in Convective rainfall featured high reflectivity values near the surface (Z >38 dBZ), what were observed in MRR plots for convective events here (Figure 1); however, this information is not sufficient to confirm the occurrence of convective rainfall. For this reason, the convective nuclei were identified using GOES-16 imagery and determined as a contiguous area of at least 40 pixels with 10.35- μ m brightness temperature (Tb) lower than 235K (-38°C) according to Ribeiro et al. (2019). Cv rainfall was defined by (i) convective nuclei observed in GOES-16 imagery, (ii) no BB detected, (iii) Z > 38dBZ near-surface and (iv) at least a rainfall intensity of 10mm.h-1.

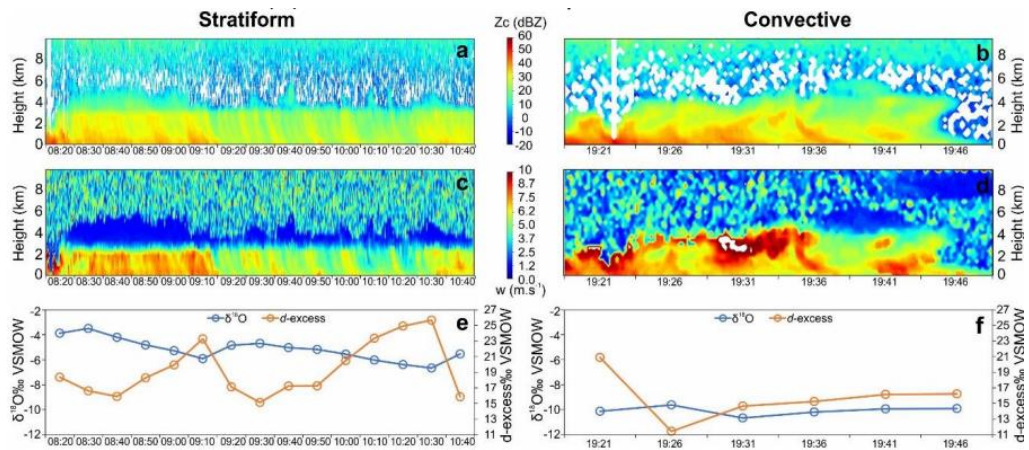


Figure 1 Temporal plot for a stratiform versus convective event of reflectivity (a, b), vertical velocity (c, d), $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess (e, f). Cv and St isotopic composition of rainfall are shown in Figure 2 and their descriptive statistics in Table 1.

The isotope scatter showed the isotopic variations for Cv (Fig.1 a), St (Fig. 1b) and differences in Local Meteoric Water Lines (LMWL). Cv-St boxplots and Table 1 illustrate an interesting comparison between rainfall types. $\delta^{18}\text{O}$ arithmetic mean and median values were different. While the $\delta^{18}\text{O}$ mean are depleted for Cv than St rainfall, the observed median is the opposite.

Table 1 – Descriptive statistical for Cv and St isotopic composition of rainfall

Rainfall types	Isotopes	min	max	median	mean	asymmetry
Cv	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-15.22	-1.52	-4.79	-6.68	-0.68
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	-101.8	7.6	-26.6	-36.5	-0.45
	d-excess (‰)	1.2	28.0	17.6	16.9	-0.48
St	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-14.37	2.56	-6.43	-5.62	0.17
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	-98.8	24.5	-31.5	-29.4	0.02
	d-excess (‰)	-0.4	29.3	15.3	15.4	-0.38

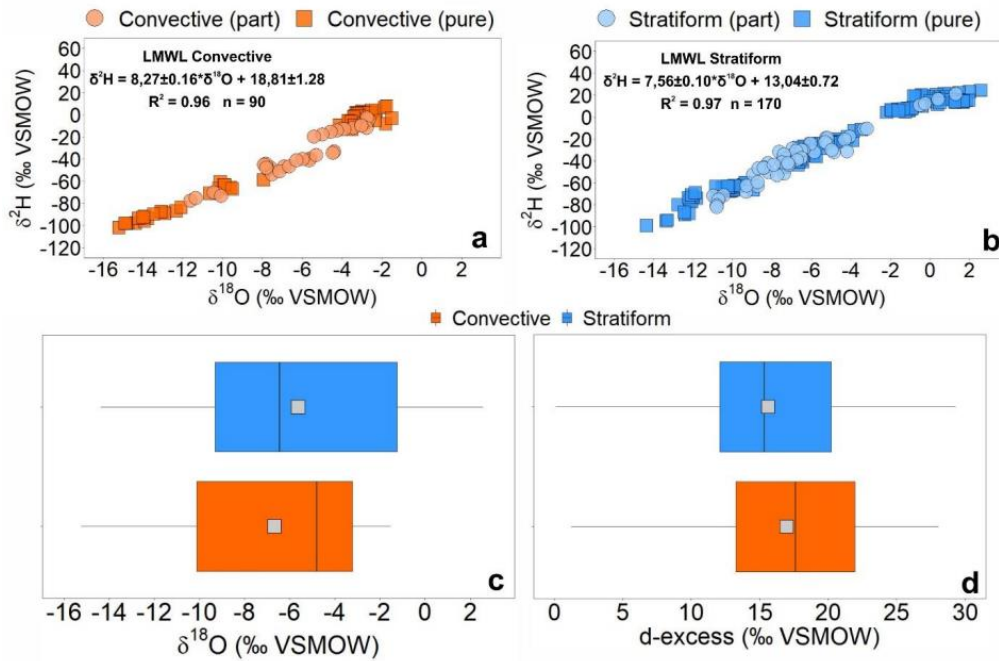


Figure 2 Isotopic composition of Convective (Cv - orange) and Stratiform (St - blue) rainfall in scatters between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ (a, b), box plots for $\delta^{18}\text{O}$ (c) and d-excess (d). Pure (only one rainfall type) and part (events of transitions between Cv and St), see methods for details. Gray squares are mean values.

Another important observation related to de Cv rains is the marked diurnal differences in the isotopic composition of Cv rainfall were observed during the austral summer (red boxplot in Figure 3), between daytime for median $\delta^{18}\text{O}$ -7‰ values and night-time $\delta^{18}\text{O}$ -13‰. Less depleted $\delta^{18}\text{O}$ (-4‰ ~ -11‰ – Fig. 3a) values during daytime were observed in conjunction with low d-excess (1‰ ~ 18‰, median 8‰ - Fig. 3c) and low rainfall rate (median 1mm – Fig. 3e). While more depleted values for $\delta^{18}\text{O}$ (-7‰ ~ -15‰) and higher d-excess (4‰ ~ 21‰, median 16‰) were observed at night-time during events that featured higher rainfall rate (median 2mm). Rainfall types

Isotopes	min	max	median	mean	asymmetry
Cv $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-15.22	-1.52	-4.79	-6.68	-0.68
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-101.8	7.6	-26.6	-36.5	-0.45
d-excess (‰)	1.2	28.0	17.6	16.9	-0.48
St $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-14.37	2.56	-6.43	-5.62	0.17
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-98.8	24.5	-31.5	-29.4	0.02
d-excess (‰)	-0.4	29.3	15.3	15.4	-0.38

Similar $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 3b) and rainfall (Figure 3f) values were observed in Autumn (median 3.1‰ and 0.9mm) and Spring (3.2‰ and 1.2mm), respectively, while d-excess values were quite different, median 16‰ (autumn) and 22‰ (spring) (Figure 3d).

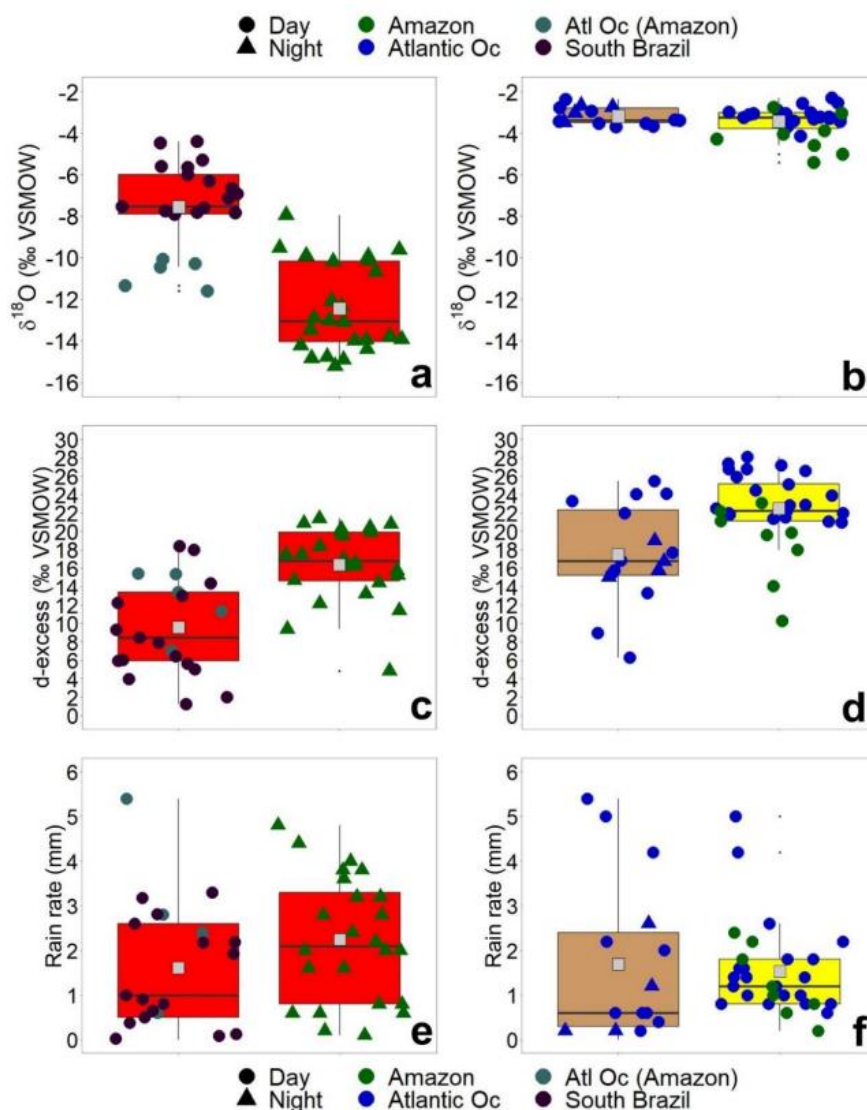


Figure 3 Box plots of $\delta^{18}\text{O}$ (a, b), d-excess (c, d) and rain rate by AWS (e, f) for day (circle) and night (triangle) in summer (red), autumn (light brown) and spring (yellow), related to HYSPLIT origin, Amazon, Atlantic Ocean with pathway over Amazon - Atl Oc (Amazon), Atlantic Ocean (Atlantic Oc) and South Brazil. Gray squares are mean values.

Differences in Cv rainfall during seasons also were observed in origin of HYSPLIT back trajectories (colours of symbols in Fig. 3): i) Amazon, trajectories from Amazon Forest; ii) Atl. Oc. (Amazon), trajectories originated from Atlantic Ocean with pathway over Amazon Forest; iii) Atlantic Oc., from Atlantic Ocean; iv) and South Brazil, from Southern Brazil portion. In summer, Cv events during daytime had trajectories from Atl. Oc. (Amazon) and South, while at night-time predominantly from Amazon. Atlantic Oc. was dominant during autumn and observed in spring with trajectories from Amazon.

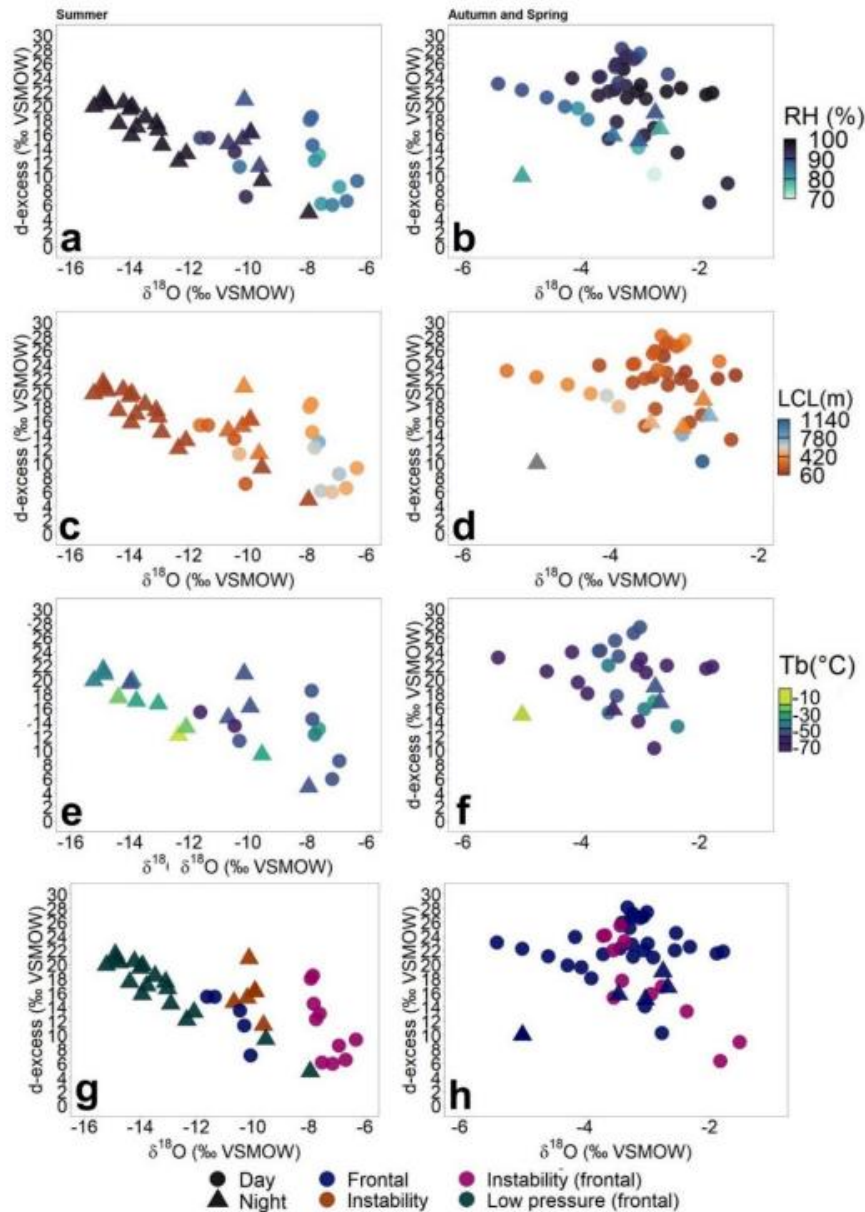


Figure 4 Scatter plots of d-excess vs $\delta^{18}\text{O}$ day and night data for summer, autumn and spring seasons, in related to RH (a, b), LCL (c, d), Tb (e, f) and atmospheric systems (g, h). RH - ground level relative humidity recorded by automatic weather station (AWS); LCL - lifting condensation level computed from AWS RH and Temperature data; Tb - brightness cloud temperature derived from GOES-16 satellite images.

Figure 4 illustrate the meteorological variables of better relations with $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess for summer. During daytime, less depleted $\delta^{18}\text{O}$ and lower d-excess values correspond to low RH (Fig. 4a), high LCL (Fig. 4c) and low Tb (Fig. 4e), while during nighttime, more depleted $\delta^{18}\text{O}$ and higher d-excess correspond to higher RH, lower LCL and higher Tb. For these variables strong and significant correlations were observed, such as $\delta^{18}\text{O}$ -RH (r -0.86 p <0.001), d-excess and RH (r 0.68 p <0.001), $\delta^{18}\text{O}$ -LCL (r 0.86 p <0.001), d-excess and LCL (r -0.68 p <0.001).

Atmospheric systems are linked to the isotopic composition of rainfall during autumn and spring. Frontals are the cold front passage over study area, instability (frontal) when the cold front is localized in South Brazil in direction to Rio Claro generate changes in regional atmosphere. Low pressure (frontal) was associated a specific feature during cold front passage, interacting with a low pressure in inland central Brazil and cold front over ocean. Instability is the atmospheric systems related to surface heat in inland Brazil. In summer, frontal and instability (frontal) occurred during the daytime, while instability and low pressure at night (Fig. 4g). A clear influence of frontal systems was observed for autumn and spring (Fig. 4h).

3. OUTLOOK

Our observations data reveal that the isotopic composition of rainfall is not related to rainfall types based on monthly timescales, which does not capture the diurnal convection features in tropical inland. In addition, no differences were identified between day and night for the isotopic composition of St rainfall. It is argued that the time available for growth in stratiform regions is longer than the time for Cv rainfall formation, which difficult the St rain formation based on diurnal cycle. Furthermore, it is known that synoptic forcing is more relevant than diurnal forcing for the formation of St rainfall in Southeast Brazil. These strong convective activity during summer (Fig. 3d,e) reflects in depleted isotopic composition of Cv rainfall, that could be explained by continuous rainout processes in convection systems along the vapor pathway to the Rio Claro. Summer convective events illustrate this feature, characterized by vapor with origin in the Amazon Forest and transported across Brazil to reach the Rio Claro (São Paulo state) area, in agreement with previous studies. The strong topographic blocking effect of the Andes induces a change in the wind direction to northwest-southeast along the eastern slope of the Andes, transporting vapor from the Amazon to the southeast of Brazil. Along this pathway, the occurrence of convective development results in continuous rainout which is reflected in the depleted isotopic composition of rainfall ($\delta^{18}O$ median $< -7\text{‰}$).

Figure 5 synthesizes all results and could be used as the conceptual model to interpret day-night differences. More enriched isotopic composition of Cv rainfall during daytime (median -7‰) was observed because trajectories are from South Brazil and Atl Oc (Fig. 4b, d), higher, dryer, correspond less rainy (Table 2) and strong surface heating generate convective systems more vigorous and enhanced deep convection in relation to nighttime, which more depleted isotopic composition (median -13‰) was linked from predominantly Amazon trajectories (Fig. 4a) that are lower, wetter, more rainy and convective systems were less vigorous (Fig. 5). Therefore, strong diurnal surface heat (Fig. 2SMd,e), results in changing of local atmospheric conditions, characterized by sub-

cloud processes that rivaling with rainout processes during daytime, different at night-time which surface heating is weak, generating lower sub-cloud influence (Fig. 5). This feature is clear when observing the d-excess variations, rain rates (AWS and MRR), LCL and T_b values.

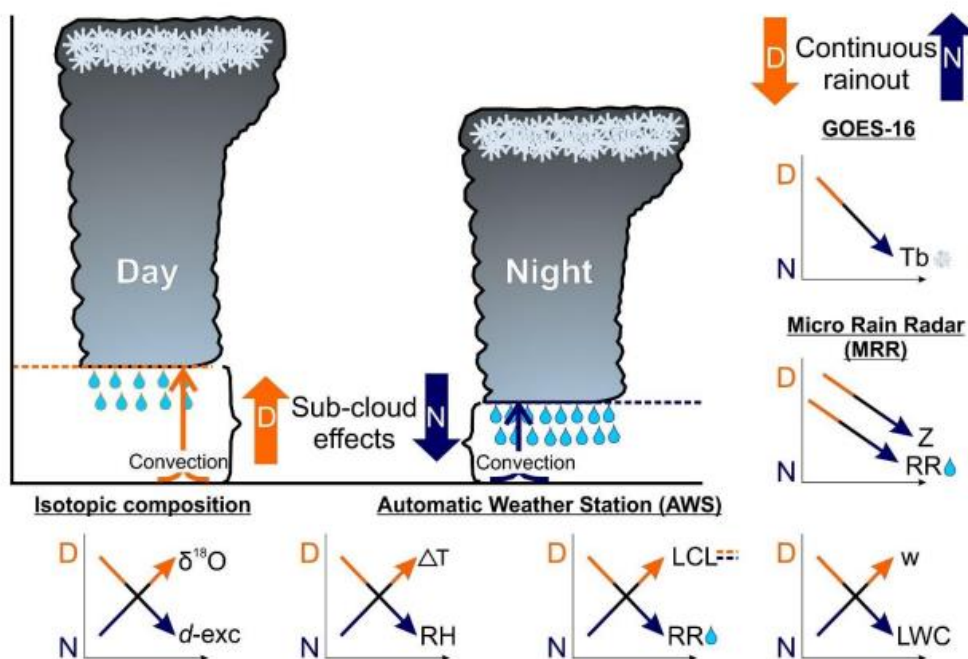


Figure 5. Schematic diagram for daytime (orange) and night-time (blue) in convective rainfall during summer. Down arrows indicate lower median values and up arrows higher median values for isotopic composition ($\delta^{18}O$ and d-excess), AWS (ΔT = difference between maximum and minimum in table 2, RH - relative humidity, LCL - lifting condensation level computed from AWS RH and temperature, RR - rain rate), near-surface MRR data (Z - reflectivity, RR - rain rate, w - vertical velocity and LWC - liquid water content) and GOES-16 brightness temperature (T_b). Sub-cloud effects represent the partial evaporation in raindrops in atmosphere below the cloud base, while continuous rainout is the rainfall occurrence during transport of air masses from HYSPLIT origin to Rio Claro.

Despite our increasing knowledge about the controls on convective systems isotopic composition, some questions regarding specific events (called mixed) remains open and provide the continuity of the research in this site, or other site in different climatic conditions. We are working on better understand the isotopic behavior for the stratiform precipitation and the relationship between the cycle of life of stratiform precipitation and the variability in the isotopic composition. An opportunity to expand

the observation of intra-event variation in isotopic composition of rain was opened through another research project coordinated by de CSI of this CRP contract in the Amazon region. This project has an important isotopic component to evaluate origin of water fluxes in two watersheds (one heavily impacted by urbanization in Manaus and the other in a pristine region of the Amazonia Forest). As a part of this project, rain samples were taken in both areas, and during a field trip to the region, a possibility of sampling in high frequency intra events has been organized. Since May 2021 samples in daily basis are being sampled, that will be very helpful to understand the process controlling the isotopic variation on rain in this region. For local processes, intra-event samples are planned to be taken in October/2022 coupled to MRR observations and information from tower fluxes installed in the Amazon Forest, to evaluate rain generation processes and cloud microphysics associated with rainfall event evolution.

4. REFERENCES

- Aggarwal, P.K., Alduchov, O.A., Froehlich, K.O., Araguas-Araguas, L.J., Sturchio, N.C., Kurita, N., 2012. Stable isotopes in global precipitation: A unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. *Geophys. Res. Lett.* 39, 1–7. <https://doi.org/10.1029/2012GL051937>
- Celle-Jeanton, H., Gonfiantini, R., Travi, Y., Sol, B., 2004. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: Application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France. *J. Hydrol.* 289, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.017>
- dos Santos, V., Gastmans, D., Sánchez-Murillo, R., Felipe Gozzo, L., Vianna Batista, L., Lilla Manzione, R., Martinez, J., 2019. Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil. *J. Hydrol.* 579, 124136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124136>
- Endries, J.L., Perry, L.B., Yuter, S.E., Seimon, A., Andrade-Flores, M., Winkelmann, R., Quispe, N., Rado, M., Montoya, N., Velarde, F., Arias, S., 2018. Radar-Observed Characteristics of Precipitation in the Tropical High Andes of Southern Peru and Bolivia. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 57, 1441–1458. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0248.1>
- Ishizaki, Y., Yoshimura, K., Kanae, S., Kimoto, M., Kurita, N., Oki, T., 2012. Interannual variability of H₂18O in precipitation over the Asian monsoon region. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, D16308. <https://doi.org/10.1029/2011JD015890>

- Jouzel, J., Delaygue, G., Landais, A., Masson-Delmotte, V., Risi, C., Vimeux, F., 2013. Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation. *Water Resour. Res.* 49, 7469–7486. <https://doi.org/10.1002/2013WR013508>
- Lacour, J.L., Risi, C., Worden, J., Clerbaux, C., Coheur, P.F., 2018. Importance of depth and intensity of convection on the isotopic composition of water vapor as seen from IASI and TES δD observations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 481, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.048>
- Mehta, S., Mehta, S.K., Singh, S., Mitra, A., Ghosh, S.K., Raha, S., 2020. Characteristics of the Z–R Relationships Observed Using Micro Rain Radar (MRR-2) over Darjeeling (27.05° N, 88.26° E): A Complex Terrain Region in the Eastern Himalayas. *Pure Appl. Geophys.* 177, 4521–4534. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02472-6>
- Moerman, J.W., Cobb, K.M., Adkins, J.F., Sodemann, H., Clark, B., Tuen, A.A., 2013. Diurnal to interannual rainfall $\delta 18O$ variations in northern Borneo driven by regional hydrology. *Earth Planet. Sci. Lett.* 369–370, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.014>
- Novello, V.F., Cruz, F.W., Karmann, I., Burns, S.J., Stríkis, N.M., Vuille, M., Cheng, H., Lawrence Edwards, R., Santos, R. V., Frigo, E., Barreto, E.A.S., 2012. Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophys. Res. Lett.* 39, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2012GL053936>
- Ren, W., Yao, T., Xie, S., He, Y., 2017. Controls on the stable isotopes in precipitation and surface waters across the southeastern Tibetan Plateau. *J. Hydrol.* 545, 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.034>
- Ribeiro, B.Z., Machado, L.A.T., Biscaro, T.S., Freitas, E.D., Mozer, K.W., Goodman, S.J., 2019. An evaluation of the GOES-16 rapid scan for nowcasting in southeastern Brazil: Analysis of a severe hailstorm case. *Weather Forecast.* 34, 1829–1848. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0070.1>
- Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Chongd, M., Descroix, L., 2010. Evolution of the stable water isotopic composition of the rain sampled along Sahelian squall lines. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 136, 227–242. <https://doi.org/10.1002/qj.485>
- Santos, V. Dos, Gastmans, D., Santarosa, L.V., Batista, L.V., Betancur, S.B., Dias de Oliverira, M.E., Pereira Filho, A.J., 2019. Variabilidade da Composição Isotópica da Precipitação na Região Central do Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas* 33, 171–181. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29474>

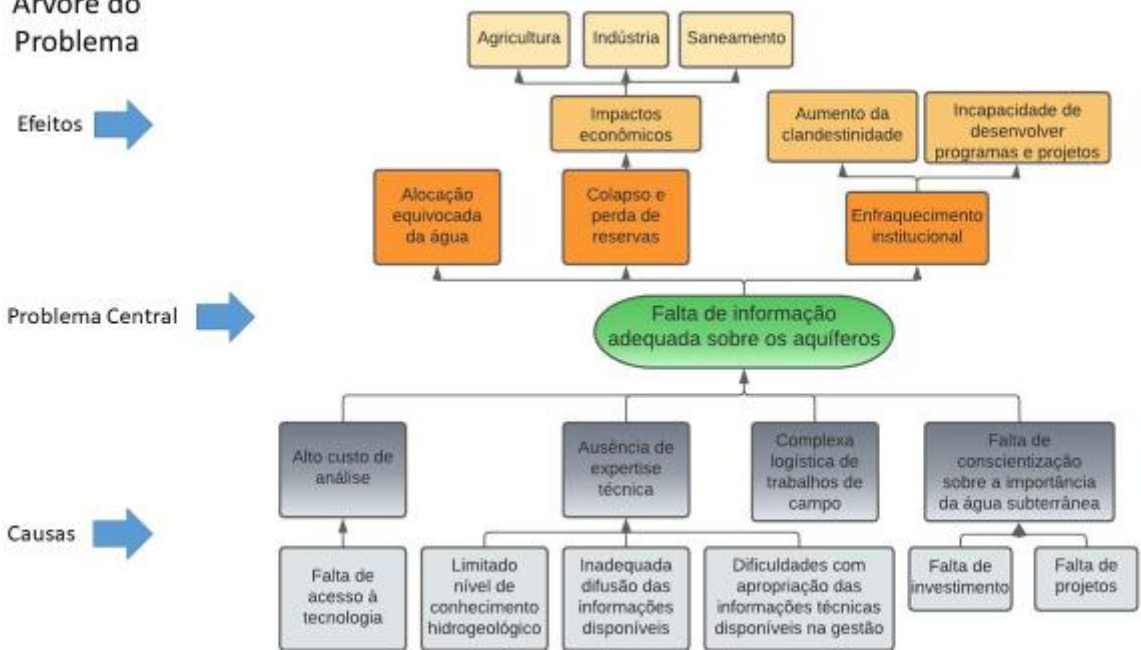
Santos, V., Dias de Oliveira, M., Boll, J., Sánchez-Murillo, R., Menegário, A.A., Gozzo, L.F., Gastmans, D., 2019. Isotopic composition of precipitation during strong El Niño–Southern Oscillation events in the Southeast Region of Brazil. *Hydrol. Process.* 33, 647–660. <https://doi.org/10.1002/hyp.13351>

Torri, G., Ma, D., Kuang, Z., 2017. Stable water isotopes and large-scale vertical motions in the tropics. *J. Geophys. Res.* 122, 3703–3717. <https://doi.org/10.1002/2016JD026154>

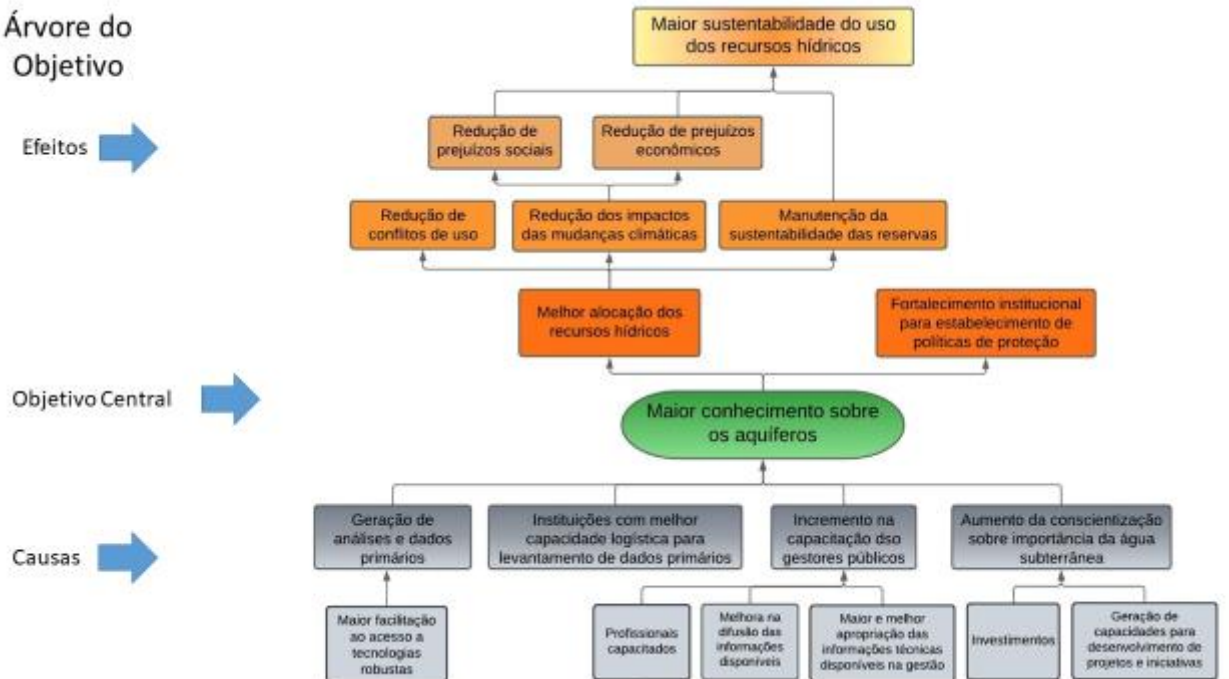
APÊNDICE F – Projeto de Pesquisa NTC para Datação de Águas Antigas

1. Resultado do Desenvolvimento Lógico do Projeto desde a matriz de impactos/causas e problemas, passando pelos resultados e entregas, até a definição dos objetivos centrais e principais atividades.

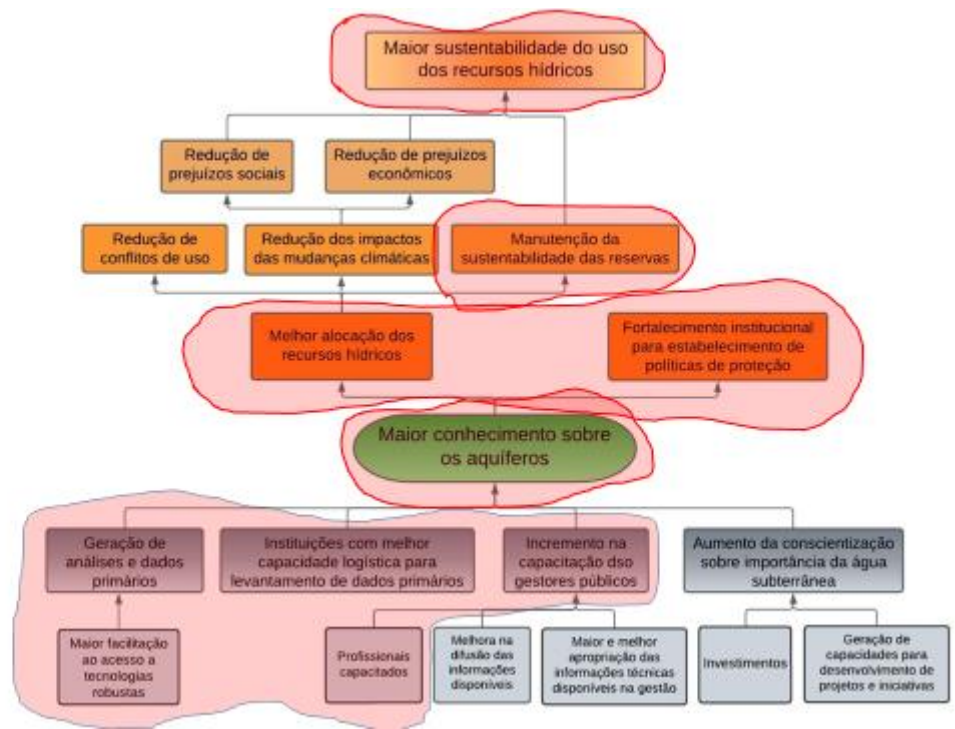
Árvore do Problema



Árvore do Objetivo



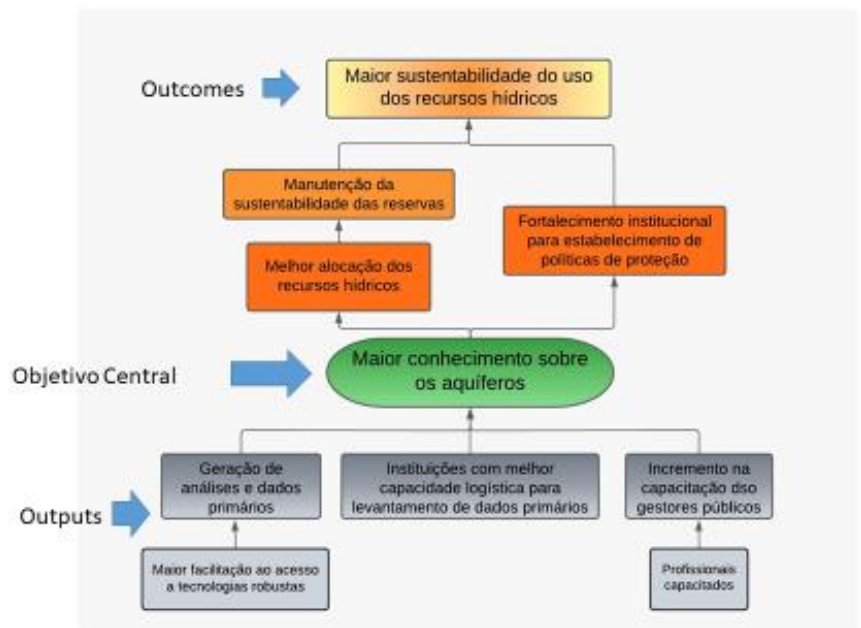
Justificativa dos Objetivos



Justificativa dos Objetivos – Específico para Projeto/Proposta SGB-AIEA



“Ao gerar informação robusta, pioneira e de forma otimizada o SGB e parceiros objetivam melhorar o conhecimento dos aquíferos selecionados para assim favorecer uma maior sustentabilidade dos recursos hídricos. Ao fazê-lo estaremos capacitando profissionais e fortalecendo o sistema de gestão de recursos hídricos”.



2. Determinação e Descrição de Atores do Projeto

Stakeholder	Interest in the Project	Assessment of Impact	Strategies for Obtaining Support or Reducing Obstacles	Role in the Project
Agências do Sistema UN (UNESCO, PNUMA, CeReGAS) e Instituições Supranacionais (OITCA)	Instituições interessadas nas informações geradas pelo projeto, cujos resultados trazem impactos diretos na formulação de projetos transfronteiriços	Os impactos são positivos e aumentam a visibilidade dos resultados obtidos	Os resultados concretos obtidos com a execução do projeto precisam ser comunicados e divulgados nos fóruns específicos e aos representantes destes organismos que estão à frente dos processos (Alice Aurelli-Unesco; Isabelle Van der Beck-PNUMA)	São apenas receptores dos resultados conferindo aos mesmos uma divulgação internacional do tipo best practices e lessons learned. Possibilidade de alavancar recursos para seguimento das investigações e difusão ampla das técnicas
AIEA	Aplicação e difusão das técnicas isotópicas em recursos hídricos e cumprimento de metas através de seu CC na América Latina	A participação ativa da AIEA tem impacto positivo e traz vantagens indispensáveis para o correto desenvolvimento técnico e metodológico das atividades do projeto.	O projeto proposto está totalmente inserido dentro do Programa de Isotopia do SGB, cujo conteúdo o próprio plano de atividades do Acordo Formal assinado em 09/21 conferindo ao SGB o status de CC da AIEA	A AIEA, através dos contrapartes técnicos possuem papel de auditores e consultores técnicos quanto ao uso do equipamento e na interpretação dos resultados
ANA e Órgãos Estaduais de Gestão das Águas	Informações sobre idade das águas subterrâneas estão relacionadas à renovação dos recursos e trata-se de uma informação indispensável para a gestão dos mesmos.	Os impactos são positivos e vão de encontro a demandas prementes das referidas instituições. Realizar gestão de recursos conhecendo a dinâmica dos mesmos concede credibilidade ao sistema.	A comunicação com os órgãos gestores estaduais e federal é salutar e necessária em todas as etapas da execução. O acesso aos poços pode ser facilitado.	Estas instituições possuem papel político de salvaguarda do projeto Da mesma forma, são as instituições que podem acolher os resultados para dentro dos procedimentos de gestão e tornar a determinação de idades uma prática obrigatória em estudos hidrogeológicos nacionais e regionais.
Sociedade Civil	Informações relevantes como as idades de renovação dos recursos hídricos subterrâneos são necessárias para melhorar e elevar o nível do debate promovido por ONG's, Agremiações de Usuários de Água e Representantes de Comitês de Bacias Hidrográficas, por exemplo.	Os impactos são positivos e aumentam a apropriação de informações para melhorar conhecimento e disciplinar discussões e pleitos realizados por estes grupos.	Novamente, a estratégia deve ser baseada na transparência e comunicação das informações. É parte da missão do SGB a geração e difusão de informação geocientífica.	Da mesma forma como os órgãos de gestão, a sociedade civil organizada possui um papel de salvaguarda do projeto
Comunidade Científica	Os principais grupos de pesquisa no Brasil em hidrogeologia já estão acostumados a trabalhar em parceria com o SGB. No caso de aplicações isotópicas em hidrologia em virtude de operarmos as redes de monitoramento isotópico de chuvas, rios e águas subterrâneos existe uma forte sinergia e complementariedade. O benefício é direto no sentido de capacitação, compartilhamento de resultados e ações conjuntas e empréstimo de equipamentos.	Os impactos são positivos e diretos e se traduzem em coparticipação dos estudos resultando em capacitação de novos talentos, geração de documentos e propagação de know-how e inovação	O Programa de Aplicações Isotópicas e, especificamente esta componente de radioisótopos está desenhada contemplando ações de parceria e todas as submissões contam com a participação formal e efetiva dos parceiros acadêmicos	São parceiros efetivos em todas as etapas do projeto, desde a concepção, execução e seguimento. Aportam recursos de contrapartida para assegurar a boa execução das campanhas

3. Desenvolvimento do Marco Lógico

Project Design	Description	Indicators	Means of Verification	Assumptions
Overall Objective	Improved sustainability of water reserves in the studied aquifer systems	Project data already incorporated in the groundwater management framework	Terms of reference for hydrogeological studies considering project results	Political and technical support by the SBG and partners will be kept
Outcomes	Development of innovative radiogenic methodologies applied to groundwater	Manuals and technical reports published by SBG and research partners with lessons learned and field procedures	Activities under responsibility of the SBG in Budget - PLOA (2024-2025)	Access to the representative water wells will be given and weather conditions will be appropriate for sampling
Outputs	1. Field Mass Spectrometer in regular operation status	Equipment ready to shipment	Tax and customs clearance	Maintenance of the high motivation of SBG teams
	2. Primary data on flow dynamics and groundwater residence times determined	Complete data set including residence times estimates	Information available at the web site of the SGB	No unexpected natural fingerprints of the concentration of Noble Gases will be detected
	3. Capacity building and knowledge transfer	Number of beneficiaries achieved	Aide Memoirs/Minutes of the Courses	Motivation and interest by stakeholders and water committee representatives will be kept high
	4. Exchange and scientific development	Number of participants achieved	Fellowship and Scientific Visit Report available	Financial support will be maintained
Activities	1.1. Equipment purchase	Delivery of the equipment at right destination	Registration of the equipment within the SBG system	Customs and fiscal demands are going to be overcome
	1.2. Field training	(10) SBG staff trained	Training Report and Operation Manual available	Maintained technical interest and sufficient resources for training
	2.1. Field and sampling missions	Two 10 days field sampling missions at each one of the 03 target aquifers	Field Notes and Map of sampled wells	Financial resources to guarantee field missions and mobilization of SGB technicians and academic partners are going to be placed
	2.2. Data systematization	100% of the data set compiled, consisted and analyzed	Spreadsheets available for the participant researchers	Enough time allocation and sufficient intellectual workforce

	2.3. Report generation	3 Report (one for each target aquifer) generated	Reports published and available at the SBG webpage	Enough time allocation and sufficient intellectual workforce
	3.1. Advanced courses on application of NG and isotopes	02 Courses on advanced isotope applications organized	Material and course schedule available	Maintaining the motivation of the SGB and technical partners
	3.2. Basic training courses	02 Courses reaching managers at the state and federal level	Course notes for managers ready and course scheduled	Maintenance of the SBG's ability to articulate and maintain a high degree of engagement on the part of managers
	3.3. Meetings and workshops	03 Kit of Manual/Booklets distributed among river committees	Meeting officially scheduled	Maintenance of the technical engagement of the SGB with improvement in teaching capacity
	4.1. Fellowship	05 Brazilian researchers trained at excellence research centers	Fellowship Reports available	Maintained financial support and continued interest from candidates
	4.2. Expert missions	02 Expert missions successful executed	Mission Reports available	Financial support kept
	4.3. Scientific visit	10 Scientific Visits successful executed	Scientific Visit Reports available	Financial support kept

4. Construção da Matriz Executiva Final

(OUTPUT /) Activities	Responsibility	Inputs (e.g. ME, SV, EX, FE, TC, cash)	Funding Source	Quantity (Q)	Rate (R)	Budget (=QxR)	Start	End
Output 1: (From the FLM) - Field Mass Spectrometer in regular operation								
1.1. Equipment purchase	AIEA, SBG	(PR) Equipment procurement for purchasing the Field Spectrometer	IAEA	1	64.000	64.000	01/2024	03/2024
1.2. Field training	SBG, AIEA	Training events among SBG technicians	Govt/SBG	2	10.000	20.000	01/2024	03/2024
Output 2: (From the LFM) - Primary data on flow dynamics and groundwater residence times determined								
2.1. Field and sampling missions	SBG	(08) Field missions for sampling and in loco analyses at (04) target aquifers	Govt/SBG	08	12.000	96.000	03/2024	02/2025
2.2. Data systematization	SBG	Office technical work	Govt/SBG	08	20.000	160.000	03/2024	03/2025
2.3. Report generation	SBG	Office technical work for the development of (04) reports	Govt/SBG	04	20.000	160.000	04/2024	03/2025
Output 3: (From the LFM) - Capacity building and knowledge transfer								
3.1. Advanced courses on application of NG and isotopes	SBG, IAEA and Universities	Training on advanced isotope techniques among SBG and research partners	Govt/SBG	2	20.000	40.000	03/2024	03/2025
3.2. Basic training courses	SBG	Capacity building for water decision makers	Govt/SBG	4	15.000	60.000	03/2025	04/2025
3.3. Meetings and workshops	SBG	Capacity building among water committee representatives	Govt/SBG	4	10.000	40.000	03/2025	04/2025
Output 4: (From the LFM) - Exchange and scientific development								
4.1. Fellowship	AIEA	(FE) – One-month Fellowship: SBG or Partner Researcher - IAEA Noble Gas Lab (Vienna)	IAEA	5	5.670	28.350	01/2024	04/2025
		(FE) – One-month Fellowship: SBG or Partner Researcher - IAEA Noble Gas Lab (Vienna)						
		(FE) – One-month Fellowship: SBG or Partner Researcher - Noble Gas ATTA Facility Lab in China						
		(FE) – One-month Fellowship: SBG or Partner Researcher - IAEA Noble Gas Research Center in Heidelberg						
		(FE) – One-month Fellowship: IAEA Noble Gas Facility in USGS (USA)						
4.2. Expert missions	AIEA	(EX) –One week Expert Mission: Field Procedures	IAEA	2	5.250	10.500	01/2024	03/2024

		(EX) –One week Expert Mission: Data Systematization and Interpretation						
4.3. Scientific visit	AIEA	(SV) – One week Scientific Visit: SBG Researcher in Research Group La Plata (Argentine)	IAEA	10	3.150	31.500	01/2024	04/2025
		(SV) – One week Scientific Visit: SBG Researcher in Stellenbosch University (South Africa)						
		(SV) – One week Scientific Visit: SBG Researcher in Atomki (Hungary)						
		(SV) – One week Scientific Visit: SBG Researcher in IAEA Isotope Symposium						
		(SV) – One week Scientific Visit: SBG Researcher in IAEA Isotope Symposium						
		(SV) – One week Scientific Visit: SBG Researcher in IAEA Isotope Symposium						
		(SV) – One week Scientific Visit: Partner Researcher in IAEA Isotope Symposium						
		(SV) – One week Scientific Visit: Partner Researcher in IAEA Isotope Symposium						
		(SV) – One week Scientific Visit: Partner Researcher in Isotope Research Group in Costa Rica						
		(SV) – One week Scientific Visit: Partner Research in USGS (USA)						

ANEXO A – Caderno Técnico: Estação de Monitoramento Isotópico de Porto Alegre

1. Apresentação

A instalação e operação da Estação de Monitoramento Isotópico de Chuva de Porto Alegre (GNIP-POA) e sua incorporação à rede global de Monitoramento Isotópico fazem parte do conjunto de ações do denominado Programa Nacional de Aplicações Isotópicas na Hidrologia (PNAIH), albergado na Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial – DHT do Serviço Geológico Nacional-CPRM. O conteúdo do referido programa e o seu histórico operacional encontram-se disponibilizados na página de internet da empresa: www.cprm.gov.br/isotopia. Em virtude da execução das ações de caráter isotópico em território nacional, com benefícios perceptíveis em escala continental, a empresa possui atualmente a condição de Centro Colaborativo da AIEA. Significa o reconhecimento institucional por parte da AIEA como instituição parceira, capaz de auxiliar na difusão de técnicas nucleares para fins pacíficos, neste caso, de uso das técnicas isotópicas na hidrologia. Maiores informações sobre Centros Colaborativos e a AIEA podem ser encontrados em: www.iaea.org/about/partnerships/collaborating-centres ou www.iaea.org/sites/default/files/18/05/collaborating-centres-reference-guide.pdf.

O presente documento faz parte de uma série que contempla a apresentação e descrição de cada uma das estações instaladas no âmbito do PNAIH. O objetivo principal aqui claramente é o de tornar pública a existência da estação, sua operação e seus resultados isotópicos preliminares.

2. Introdução

O monitoramento isotópico de chuvas vem sendo realizado em todo o mundo através da operação de estações, como a que está sendo apresentada neste documento. Desde 1960, existe uma rede global de monitoramento isotópico de chuvas denominado GNIP (*Global Network for Isotopes in Precipitation*) apoiado e mantido pela AIEA. Dita rede acumula, portanto, dados espaciais e temporais de concentrações de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ (Deutério), e, em alguns casos, ^3H (Trítio) na precipitação a partir de amostras acumuladas mensais.

Estas informações são indispensáveis para a melhor compreensão do ciclo hidrológico como um todo. A molécula de água, presente na chuva, carrega consigo o que se denomina de “assinatura” isotópica, a qual é utilizada para determinar a origem e movimento da água no ciclo hidrológico. Os isótopos são átomos do mesmo elemento com variações em sua massa. As frações dos diferentes isótopos de hidrogênio e oxigênio presentes na água das chuvas variam no tempo e no espaço devido a processos físicos e químicos, como por exemplo, a evaporação, condensação e devido a variáveis meteorológicas como temperatura do ar e totais precipitados. Consequentemente, as chuvas coletadas nas referidas estações, como por exemplo, GNIP-POA, carrega esta assinatura, a qual acaba sendo percebida nas águas superficiais e subterrâneas de toda a região envoltória. Por esta razão, estes dados provêm informação a vasto leque de usuários e cientistas envolvidos em temas multidisciplinares, inclusive com desafios

relacionados à gestão sustentável das águas. Informações sobre a rede GNIP, referenciar-se a <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>.

3. Memorial Descritivo

Todas as informações referentes à estação GNIP-POA estão apresentadas na Tabela 1. A estação GNIP-POA foi instalada em julho de 2017 e começou a operar a partir do mês de agosto de 2017, com coletas mensais para isótopos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$ e $^2\text{H}\delta$).

Tabela 1. Características gerais da Estação e do Processo de Coleta

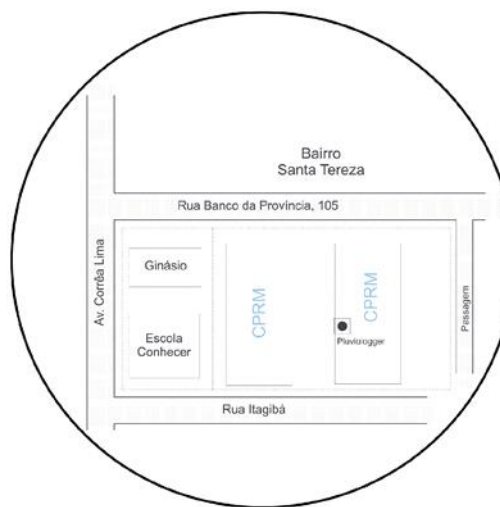
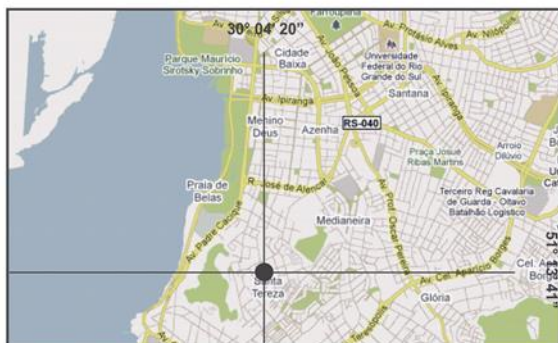
Nome da Estação	Sigla Oficial na GNIP	Sigla Oficial na Rede Nacional
GNIP-POA		
Latitude	Longitude	Elevação (m)
30°04'20''	51°13'39''	60m



Localização da Estação	Endereço Postal	
Pátio Frontal da SUREG de Porto Alegre	90840-030	
Equipe Responsável	Email	Telefone
Pesquisadora em Geociências: Karine Pickbrenner Analista em Geociências: Ana Cristina Peixoto Técnicos em Geociências: Luciano Trasel e Rejane Bao	karine.pickbrenner@cprm.gov.br ana.peixoto@cprm.gov.br luciano.trasel@cprm.gov.br rejane.bao@cprm.gov.br	+55 51 34067300

Croqui de Localização

LOCALIZAÇÃO E SITUAÇÃO
PORTO ALEGRE-CPRM



Equipamento de Coleta de Chuva	Características do Funil
Palmex xxx	
Frequência de Coleta	Características do Reservatório
Mensal	

Observações

Distância em relação à estação hidrometeorológica		Nome e Código das Estações Hidrometeorológicas
30m (Precipitação) 10km (Temperatura e Umidade)		Porto Alegre - CPRM 03051043 Porto Alegre – INMET A801
Parâmetro Medido	Método	Modelo/Equipamento
Precipitação	Báscula	AGSOLVE
Temperatura		
Umidade		
Observações		

Descrição do Processo de Transferência da Amostra	Característica das Alíquotas de Chuva
Transferência manual mensal do reservatório do coletor ao frasco âmbar 50ml com duplicata	Frascos de vidro âmbar com 50ml com batoque e tampa e proteção de fita isolante etiquetados
Amostras para Análise	
<input checked="" type="checkbox"/> isótopos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$)	<input type="checkbox"/> tritium (^3H) <input type="checkbox"/> Outros: _____

Armazenamento e Transporte	Laboratório
Correios POA-SP, DHL SP-Viena	AIEA-Viena

4. Procedimentos de Coleta

O equipamento instalado na GNIP-POA é um amostrador de tubo submerso, altamente recomendado pela AIEA para uso para esta finalidade. A chuva, no intervalo mensal, adentra o amostrador através do funil externo que, por sua vez, é conectado a um tubo que alimenta um reservatório disposto na parte interna do cilindro protetor. Este reservatório encontra-se na parte interna do conjunto, devidamente protegido da exposição física e ambiental. Um sistema de equilíbrio de pressões garante o fluxo de água para dentro do reservatório, ao mesmo tempo em que, em função do comprimento do tubo, minimiza-se por completo o efeito da evaporação. A estratégia de coleta implica em garantir que dentro do reservatório esteja presente a quantidade de água acumulada dos vários eventos de chuva do mês de referência. Estes reservatórios de acumulação de amostras mensais precisam necessariamente ser de polietileno de alta qualidade e densidade (HDPE) ou de vidro acompanhados de tampas que garantam total estanqueidade. A água de chuva acumulada e armazenada nestes reservatórios é transferida cuidadosamente para o interior dos frascos utilizados para o envio aos laboratórios. Novamente, é essencial que estes frascos sejam de polietileno de alta qualidade e densidade ou de vidro. O volume típico mínimo adotado pelos laboratórios é de 20 ml para isótopos estáveis e 300 ml para trítio. As coletas realizadas nesta estação para isótopos estáveis utilizam frascos de 50 ml de vidro âmbar com cap e tampa plástica. Em todo o início do mês, sendo o primeiro mês utilizado como referência, esta transferência de amostras do reservatório de acumulação para as alíquotas é realizada pelos integrantes da equipe GNIP local, devidamente treinados para este procedimento. São coletadas duas alíquotas de chuva acumulada para cada mês de referência, as quais são devidamente etiquetadas e armazenadas em local arejado, escuro e protegido por um período entre 06 a 12 meses, são despachadas para o laboratório designado com facilidades isotópicas.

5. Obtenção de dados Complementares

De forma complementar à metodologia de coleta das amostras de chuva mensais, o monitoramento isotópico implica necessariamente na aquisição de médias mensais de certos parâmetros climáticos, entre eles: i) Total mensal precipitado (mm); ii) Temperatura média mensal do ar (°C) e, iii) Pressão de vapor média mensal (mb), lembrando que este parâmetro pode ser obtido a partir da umidade relativa e temperatura. A necessidade de se contar com estes parâmetros obriga a que a estação GNIP esteja vinculada a uma estação de monitoramento climatológica operante. Ressalta-se que, preferencialmente, esta estação deve pertencer à Rede Pluviométrica Nacional. Entretanto, o mais importante, neste caso, é a disponibilidade e consistência do dado, que pode ser provido por estações individuais manuais e ou automáticas não registradas.

No caso específico da GNIP-POA, os dados do parâmetro precipitação são obtidos de uma estação de monitoramento operada pelo Serviço Geológico do Brasil e localizada na mesma unidade, a cerca de 30m de distância. Os dados de umidade e temperatura são obtidos de uma estação climatológica operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia, localizada a cerca de 10km da GNIP-POA. Os dados de precipitação desta estação também serão utilizados para balizar, consistir e preencher eventuais falhas de dados pluviométricos locais.

Maiores informações sobre a caracterização espacial das precipitações médias de longo período e sazonais no entorno da região de Porto Alegre podem ser obtidas no Atlas Pluviométrico do Brasil (<https://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>).

6. Histórico Isotópico da Chuva

Importante mencionar a existência e o conteúdo de dados isotópicos da chuva coletada em Porto Alegre, as quais podem ser acessadas, mediante registro no sistema WISER da AIEA (<https://www.iaea.org/services/networks/gnip>). Este monitoramento cobriu os períodos de 1957 a 1983, com coletas acumuladas mensais parciais, ou seja, com lapsos de medição, para isótopos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$ e $^2\text{H}\delta$) e $^3\text{H}\delta$ - trítio. A estação GNIP (codificada 8396700 no WMO *Code*) localizava-se nas coordenadas (-30,8° S, -51,18° E) a 07 m de elevação. Os provedores das informações analíticas foram: AIEA, Viena (Áustria), Universidade de Copenhague (Dinamarca) e Universidade de Ciência e Tecnologia (AGH) em Cracóvia (Polônia).

Os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ são gerados por espectrometria de massa ou por espectroscopia de absorção a laser como sendo razões $^2\text{H}/^1\text{H}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. São expressos na unidade permil (‰), que representa o quanto a razão isotópica de uma amostra específica desvia da razão isotópica do padrão (normalmente o mais utilizado é conhecido como VSMOW – Padrão de Viena da Média das Águas do Oceano), conforme a notação conhecida como delta ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$). As medições possuem uma precisão de cerca de $\pm 0.1\%$ para Oxigênio e $\pm 0.8\%$ para Deutério para um desvio padrão de uma unidade.

As **Tabelas 2 a 5**, modificadas a partir do tratamento estatístico realizado pela AIEA (*Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation, Technical Reports Series No. 331, 1992*) apresentam a síntese de métricas quantitativas do referido banco de dados, assim como as regressões gerando as denominadas linhas meteóricas locais - LMWL (em comparação com a linha meteórica global – GMWL), conforme ilustrado na **Figura 1**.

A **Equação 1** ilustra uma relação reconhecida por Craig (1961), obtida a partir da medição de ^{18}O e ^2H das águas meteóricas em estações localizadas ao redor do mundo. Ela demonstra a correlação entre os dois isótopos em escala global, cuja reta resultante é denominada GMWL, com regressão correspondente a:

Equação 1: $\delta^2\text{H} = 8(\delta^{18}\text{O}) + 10$ (Regressão Linear pelo Método dos Mínimos Quadrados)

Esta reta fornece uma referência para a interpretação e proveniência de águas subterrâneas. A observação essencial é que águas isotopicamente empobrecidas são associadas a regiões frias e águas enriquecidas são encontradas em regiões quentes, considerando-se que a composição isotópica das águas subterrâneas numa bacia hidrográfica reflete a média de longo prazo das chuvas na área. Com isso, a composição isotópica da água subterrânea pode ser modificada significativamente em relação à linha meteórica local. Processos como evaporação e modificações climáticas regionais também podem modificar a composição isotópica das águas subterrâneas (Fritz e Clark, 1997). Para a estação GNIP-POA, a correlação dos dados de todo o período histórico da fase de medição compreendida entre 1957 e 1983 (envolvendo 172 pares de dados), fornece as regressões caracterizadas pelas **Equações (2 a 4)**:

Equação 2: $\delta^2\text{H} = 7,67(\delta^{18}\text{O}) + 10,59$ (Regressão Linear pelo Método dos Mínimos Quadrados);

Equação 3: $\delta^2\text{H} = 8,04(\delta^{18}\text{O}) + 12,38$ (Regressão Ortogonal);

Equação 4: $\delta^2\text{H} = 7,55(\delta^{18}\text{O}) + 10,24$ (Regressão Linear pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderada pela Precipitação);

Adotando-se a **Equação 2** como representativa da Reta Meteórica Local, o coeficiente angular de valor 7,67 é invariante, mas o coeficiente linear é representado por um parâmetro denominado de Excesso de Deutério (D), proposto por Dansgaard (1964). Trata-se de uma variável controlada por efeitos cinéticos associados com a evaporação da água na superfície dos oceanos ou continentes que aumenta com o déficit de umidade nas massas de ar oceânicas (Merlivat & Jouzel 1979). A ideia principal é que as chuvas em meses de verão apresentam valores mais elevados do que as chuvas relacionadas a meses de inverno, devido a diferenças na temperatura sazonal do ar.

[GL1]

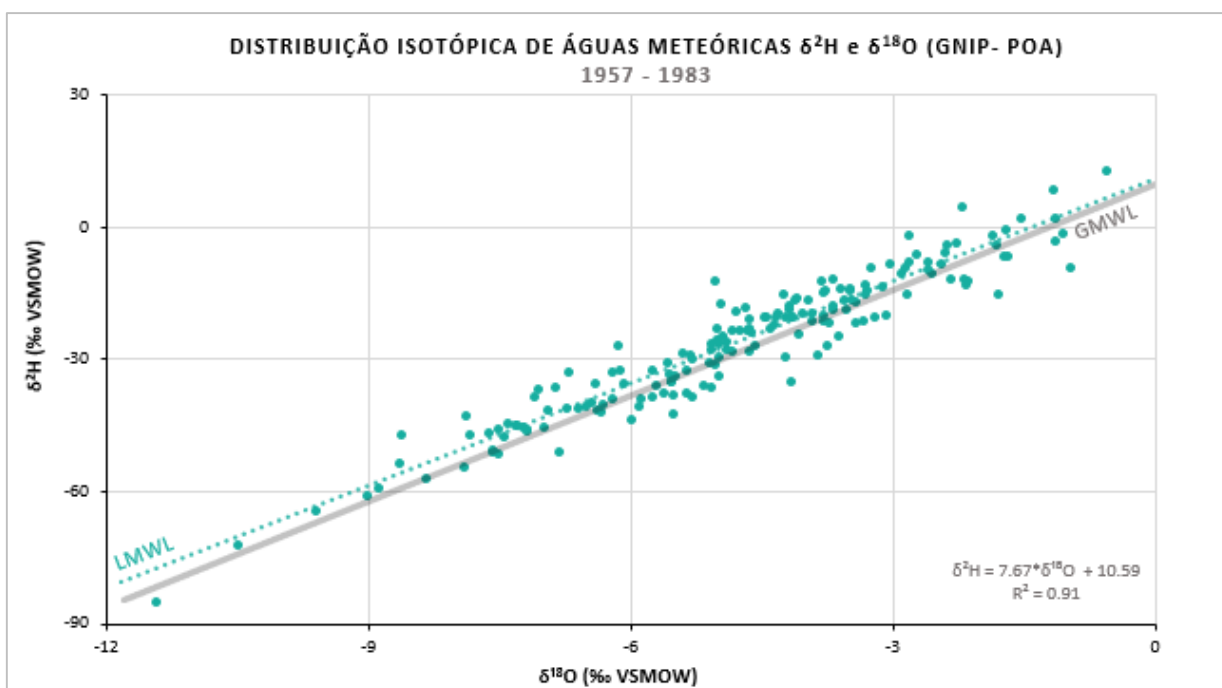


Figura 1. Reta Meteórica Local (LMWL) e sua relação com a Reta Meteórica Global (GMWL)

A correlação da variação isotópica mensal de $\delta^{18}\text{O}$ com os parâmetros climáticos mensais médios, precipitação e temperatura, do mesmo período (1957 – 1983) encontra-se disposta nas **Figuras 2 e 3** abaixo:

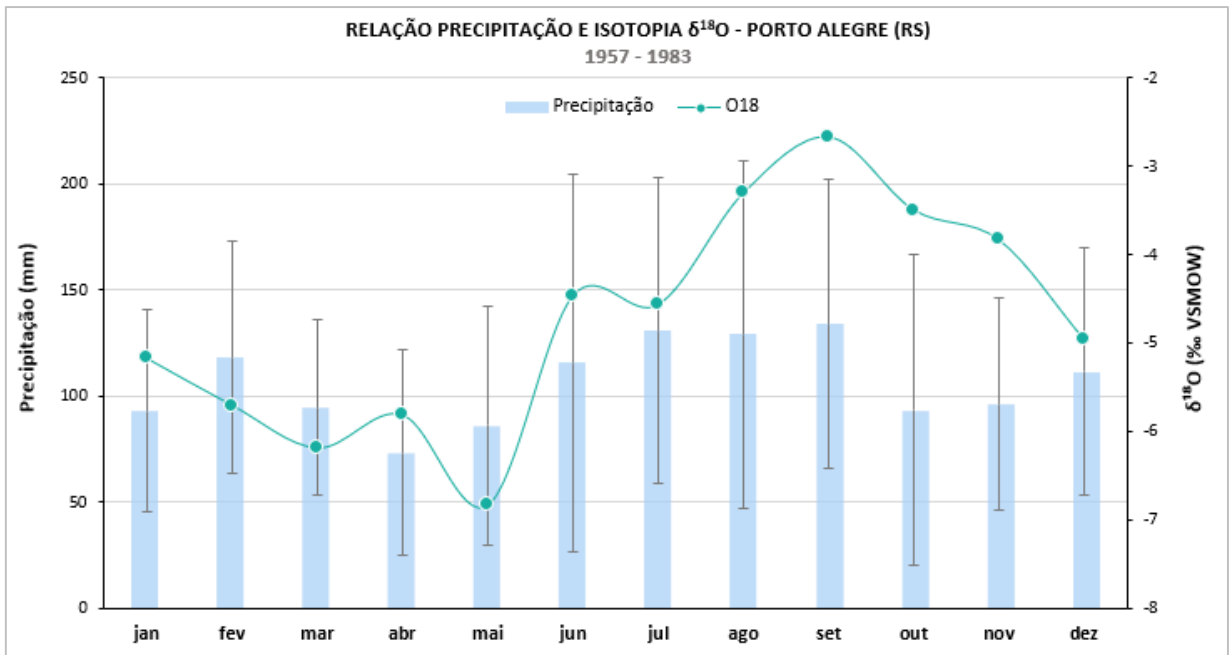


Figura 2. Relação isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ e precipitação

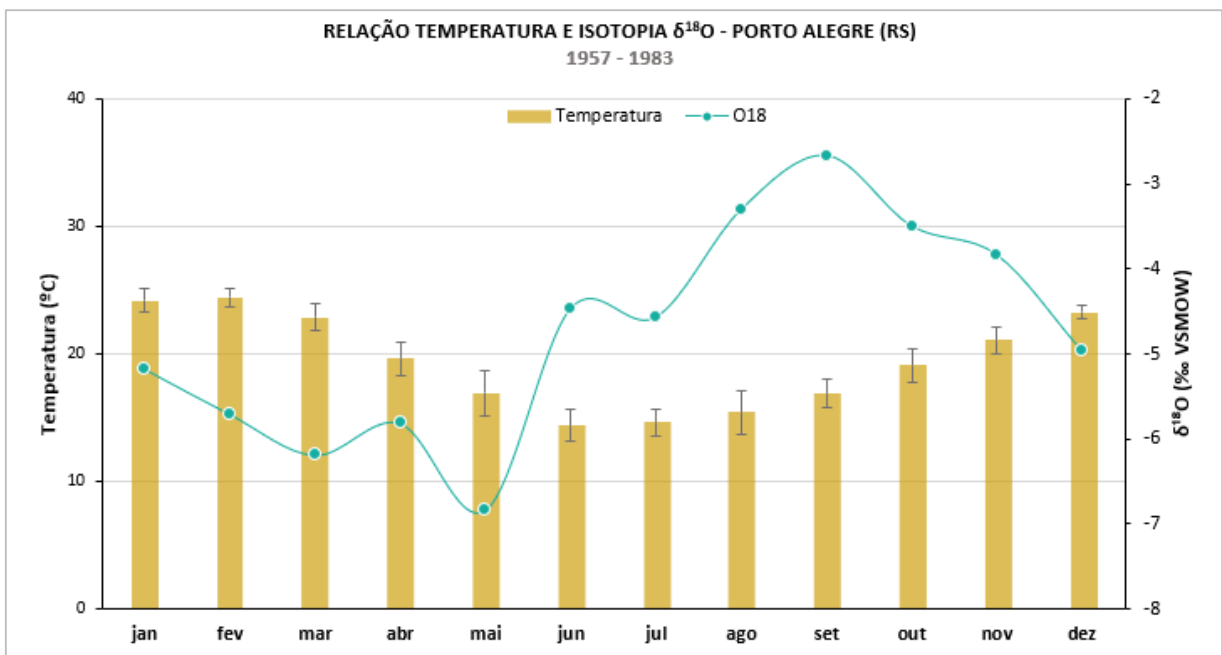


Figura 3. Relação isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ e temperatura

7. Análise dos dados históricos GNIP – POA e dados RIMAS – RS

A recarga de água subterrâneas e sua inter-relação com as águas superficiais e meteóricas, representam mecanismos hidrológicos fundamentais, sendo seu conhecimento importante para o gerenciamento de recursos hídricos. Nesse sentido, os dados isotópicos da GNIP de Porto Alegre (1957 – 1983) foram conjuntamente analisados com a coleta de águas subterrâneas da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas RIMAS

(<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>) de alguns municípios situados no litoral do Rio Grande do Sul e do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Os dados provenientes da RIMAS estão dispostos na Tabela 7 e 8.

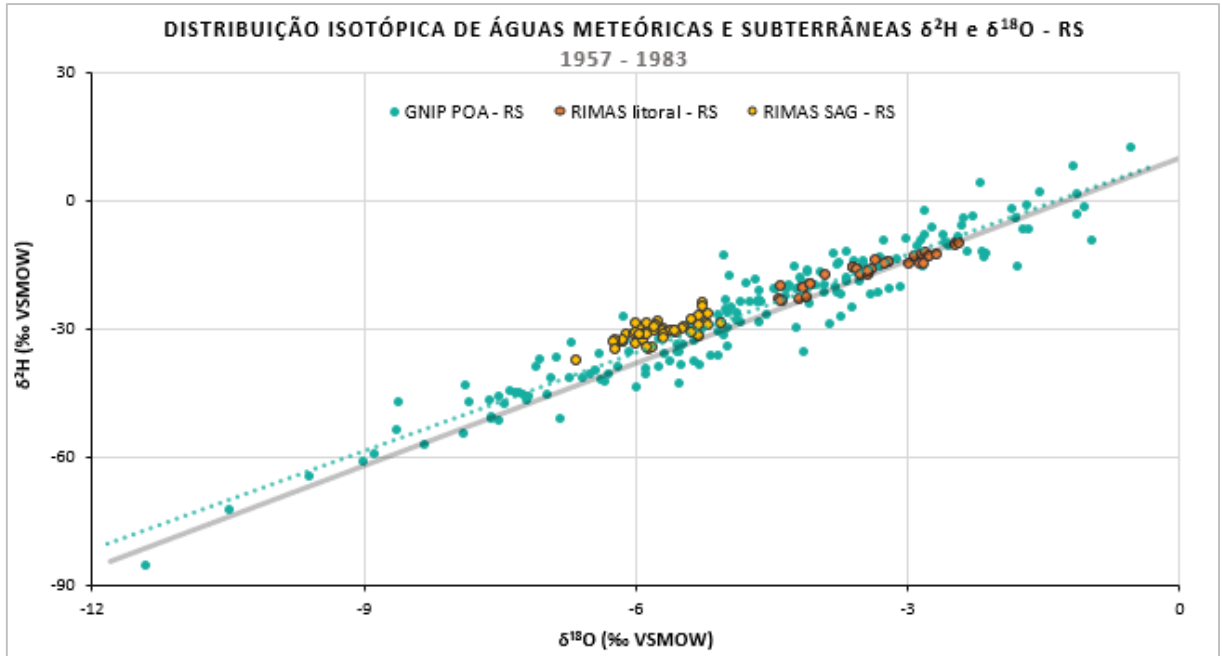


Figura 4. Plot de correlação entre $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de águas meteóricas e subterrâneas do Rio Grande do Sul.

Tabela 2. Médias históricas mensais

Meses	PPT ¹ (mm)	n	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	n	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	n	d-excess(‰)	n	T (°C)	n	VP(hPa)	n
Jan	95,3	27	-4.94 ± 1.35	18	-29.8 ± 11.4	15	11.6 ± 4.9	15	24,5	27	22,3	27
Fev	108,9	27	-6.07 ± 1.86	17	-33.8 ± 10.9	15	11.9 ± 4.6	15	24,4	27	22,7	27
Mar	95,1	27	-6.24 ± 1.76	17	-37.3 ± 13.6	16	12.1 ± 4.7	15	23,1	26	21,3	27
Apr	73,4	27	-6.05 ± 1.72	17	-34.9 ± 10.9	15	11.3 ± 3.6	14	19,8	26	18,2	27
Mai	84,6	27	-6.84 ± 1.60	17	-42.9 ± 12.8	14	11.8 ± 4.9	14	17	27	16,1	27
Jun	129,8	27	-4.57 ± 1.84	18	-23.7 ± 15.7	16	13.0 ± 4.5	15	14,5	27	13,6	27
Jul	121,4	27	-4.34 ± 1.36	17	-21.1 ± 10.1	14	15.4 ± 5.5	14	14,7	27	13,9	27
Ago	146,4	27	-3.28 ± 1.10	16	-13.4 ± 10.1	14	13.0 ± 4.6	14	15,4	27	14,2	27
Set	136	27	-2.46 ± 1.04	16	-7.6 ± 7.9	14	13.3 ± 6.1	14	16,9	27	15,4	27
Out	116	27	-3.58 ± 1.43	15	-16.6 ± 11.7	13	11.4 ± 3.8	13	19,3	27	16,9	27
Nov	89,9	27	-3.64 ± 1.41	15	-19.2 ± 11.0	13	11.5 ± 4.9	13	21,2	27	18,1	27
Dez	103,6	27	-4.87 ± 2.44	17	-28.9 ± 19.8	16	9.8 ± 5.2	16	23,4	27	20,4	27

Tabela 3. Médias ponderadas e médias normais de longo período

PPT t	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ mp	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ m	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$ mp	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$ m	d-excess(‰) mp	d-excess(‰) m	AirTemp. (°C) m	VP(hPa) m
1,300.5 ± 255.1 (27)	-4.68 ± 0.62 (14)	-4.62 ± 0.42 (14)	-25.1 ± 4.0 (13)	-24.8 ± 2.6 (13)	12.4 ± 3.2 (13)	12.3 ± 2.8 (13)	19.5 ± 0.4 (26)	17.8 ± 0.6 (27)

Tabela 4. Regressões lineares

Tipo de Regressão	a	b	Erro Padrão	R ²	n
LSR	7.67 ± 0.19	10.59 ± 0.96	4,84	0,91	172
RMA	8.04 ± 0.19	12.38 ± 0.96	4,84	0,91	172
PWLSR	7.55 ± 0.20	10.24 ± 1.03	5,08	0,89	172

LSR: Regressão de Ajuste dos Mínimos Quadrados; RMA: Regressão Ortogonal; PWLSR: Regressão de Ajuste dos Mínimos Quadrados Ponderada pela Precipitação.

Tabela 5. Médias anuais

Ano	PPT ² m (mm)	³ H(TU) mp	³ H(TU) m	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ mp	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ m	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$ mp	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$ m	d-excess(‰) mp	d-excess(‰)m	T ar (°C) m	PVap (hPa) m
1957	1,389.0 (12)	-	-	-	-	-	-	-	-	19,7 (12)	18,2 (12)
1958	1,344.0 (12)	11,53 (58.5%)	10,77 (6)	-	-	-	-	-	-	19,8 (12)	18,3 (12)
1959	1,505.0 (12)	14,54 (69.0%)	13,76 (8)	-	-	-	-	-	-	19,8 (12)	18,2 (12)
1960	1,160.0 (12)	7,8 (6.0%)	7,8 (1)	-	-	-	-	-	-	19,5 (12)	17,4 (12)
1961	1,534.0 (12)	-	-	-	-	-	-	-	-	20,4 (12)	18,8 (12)
1962	712 (12)	-	-	-	-	-	-	-	-	19 (12)	16,7 (12)
1963	1,317.0 (12)	-	-	-	-	-	-	-	-	19,9 (12)	18 (12)
1964	1,041.0 (12)	-	-	-	-	-	-	-	-	18,9 (12)	16,4 (12)
1965	1,519.0 (12)	73,21 (51.2%)	63 (6)	-4,93 (70.8%)	-5,58 (8)	-26,4 (70.8%)	-32,3 (8)	13 (70.8%)	12,3 (8)	19,7 (12)	17,9 (12)
1966	1,520.0 (12)	53,66 (76.2%)	53,42 (9)	-4,49 (100.0%)	-4,33 (12)	-25,9 (87.2%)	-23,6 (11)	12,4 (87.2%)	12,4 (11)	19,4 (12)	17,7 (12)
1967	1,077.0 (12)	46,55 (87.8%)	43,35 (10)	-3,13 (90.9%)	-4,03 (11)	-18 (100.0%)	-21,5 (12)	9 (90.9%)	12,3 (11)	20 (12)	18,3 (12)
1968	1,129.0 (12)	42,07 (100.0%)	40,06 (12)	-5,25 (87.4%)	-5,08 (11)	-24 (87.4%)	-23,7 (11)	18 (87.4%)	16,9 (11)	19,3 (12)	17 (12)
1969	984 (12)	33,22 (100.0%)	32,78 (12)	-4,69 (90.2%)	-4,47 (11)	-26,5 (90.2%)	-23,7 (11)	11 (90.2%)	12 (11)	19,4 (12)	17,6 (12)
1970	1,275.0 (12)	38,65 (84.5%)	40 (10)	-3,7 (67.3%)	-3,18 (9)	-19,4 (5.6%)	-19,4 (1)	0,5 (5.6%)	0,5 (1)	19,9 (12)	18 (12)
1971	1,128.0 (12)	30,96 (100.0%)	32,89 (12)	-5,28 (100.0%)	-5,07 (12)	-	-	-	-	19,6 (12)	17,6 (12)
1972	1,985.0 (12)	25,06 (83.2%)	25,18 (10)	-6,59 (64.0%)	-7,32 (8)	-84,9 (1.8%)	-84,9 (1)	6,5 (1.8%)	6,5 (1)	19,8 (12)	18,2 (12)
1973	1,358.0 (12)	20,03 (100.0%)	21,19 (12)	-5,15 (100.0%)	-4,98 (12)	-25,2 (100.0%)	-24,4 (12)	16 (100.0%)	15,4 (12)	19,8 (12)	18,1 (12)

1974	1,195.0 (12)	27,86 (99.9%)	29,05 / 11)	-5,55 (99.9%)	-4,77 / 11)	-31,6 (99.9%)	-25,1 / 11)	12,8 (99.9%)	13 / 11)	19,2 (12)	17,9 (12)
1975	1,288.0 (12)	20,9 (74.2%)	21,09 / 10)	-5,41 (74.2%)	-5,52 / 10)	-29,9 (74.2%)	-31,5 / 10)	13,4 (74.2%)	12,6 / 10)	19 (12)	17 (12)
1976	1,472.0 (12)	16,43 (100.0%)	16,58 / 12)	-4,71 (100.0%)	-5,06 / 12)	-21,7 (100.0%)	-24,6 / 12)	16 (100.0%)	15,8 / 12)	18,6 (12)	17 (12)
1977	1,115.0 (12)	13,89 (92.0%)	13,7 / 11)	-4,08 (92.0%)	-4,07 / 11)	-20,8 (92.0%)	-22,6 / 11)	11,8 (92.0%)	10 / 11)	20,1 (12)	18,1 (12)
1978	1,074.0 (12)	14,47 (85.3%)	14,11 / 11)	-4,28 (85.3%)	-4,26 / 11)	-28,1 (85.3%)	-28 / 11)	6,1 (85.3%)	6,1 / 11)	19,2 (12)	17,3 (12)
1979	1,209.0 (12)	11,48 (90.6%)	11,77 / 11)	-4,7 (90.6%)	-4,33 / 11)	-26 (90.6%)	-23,2 / 11)	11,6 (90.6%)	11,5 / 11)	18,9 (12)	17,1 (12)
1980	1,334.0 (12)	11,13 (91.5%)	10,92 / 11)	-5,17 (91.5%)	-5,35 / 11)	-31,6 (91.5%)	-31,7 / 11)	9,7 (91.5%)	11,1 / 11)	19,3 (12)	18,3 (12)
1981	1,180.0 (12)	10,23 (95.8%)	10,22 / 11)	-4,55 (89.6%)	-4,36 / 10)	-25,9 (100.0%)	-24,9 / 12)	11,2 (89.6%)	11,7 / 10)	19,6 (12)	18,1 (12)
1982	1,652.0 (12)	8,12 (84.0%)	7,3 / 10)	-4,37 (100.0%)	-4,59 / 12)	-21,7 (100.0%)	-24,8 / 12)	13,2 (100.0%)	12 / 12)	19,6 (12)	18 (12)
1983	1,617.0 (12)	7,49 (41.4%)	7,34 / 5)	-5,25 (61.8%)	-5,35 / 7)	-31,9 (61.8%)	-32,9 / 7)	10,1 (61.8%)	9,9 / 7)	18,9 (10)	18,3 (12)

8. Resultados Atuais da Estação GNIP-POA

Os resultados brutos das coletas realizadas até a presente data estão dispostos na **Tabela 6** abaixo, segundo a lógica de cômputo mensal. A coleta foi iniciada em agosto de 2017. Os dados brutos permitem o desenvolvimento de correlações e operações entre as variáveis, cujo resultado e padrão auxiliam na interpretação e uso dos dados isotópicos como informação complementar para iniciativas diversas de caráter climático ambiental.

A **Figura 5** apresenta a dispersão dos resultados, assim como a regressão linear de melhor ajuste. Este pequeno intervalo de tempo é demasiado curto e pouco representativo para considerá-la como sendo uma nova LMWL.

[GL2]

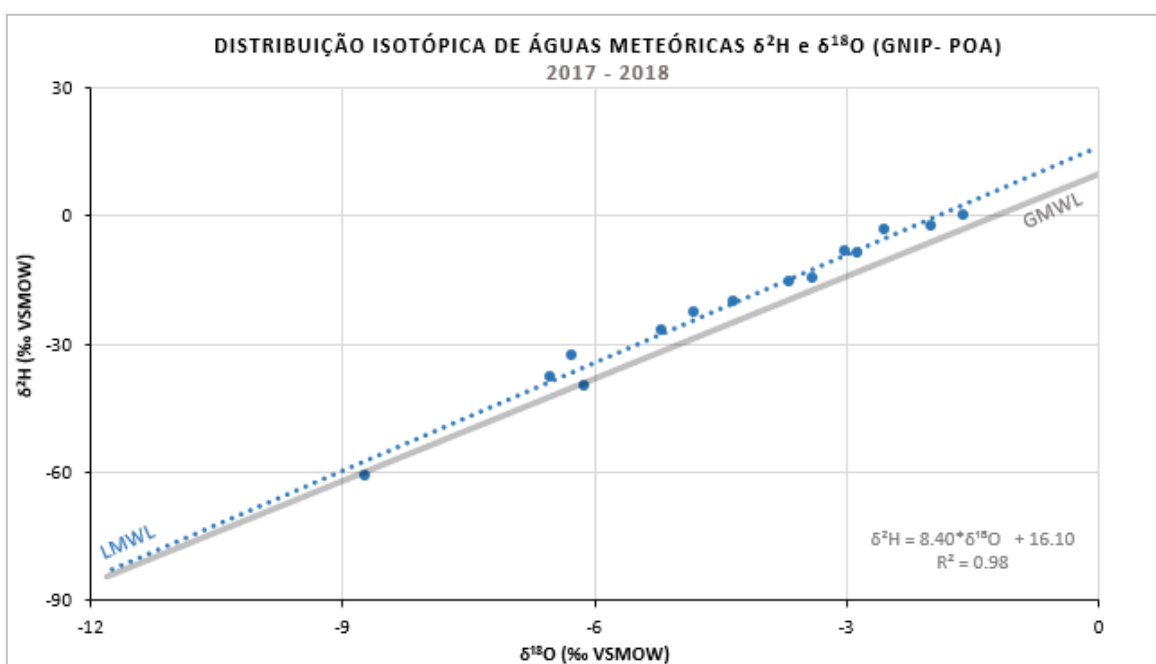


Figura 5. Reta Meteórica Local [GL3]

A correlação da variação isotópica mensal, tanto de $\delta^{18}\text{O}$ como $\delta^2\text{H}$, com os parâmetros climáticos mensais médios do mesmo período encontram-se dispostas nas **Figuras 6 e 7**.

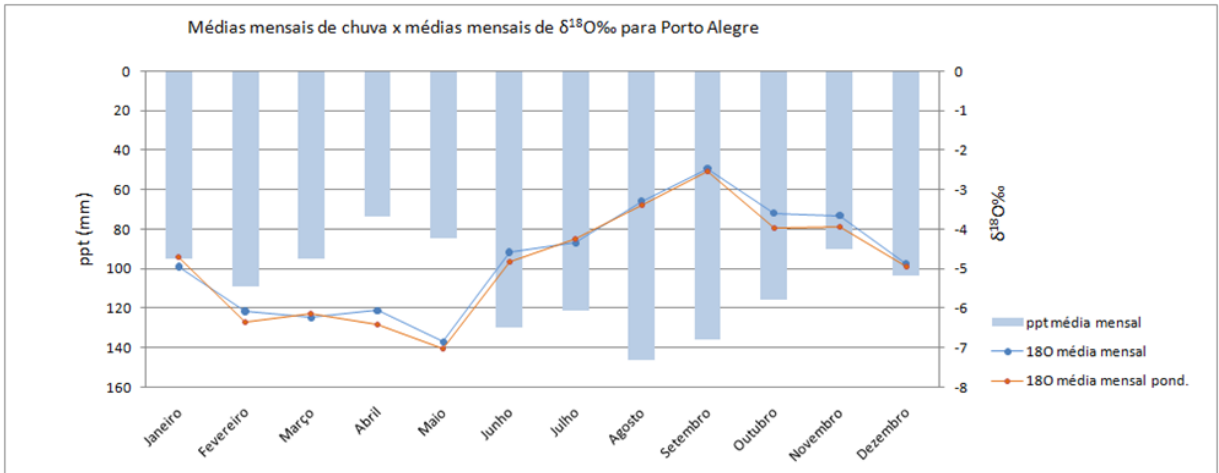


Figura 6. Correlação entre $\delta^{18}\text{O}$ e precipitação

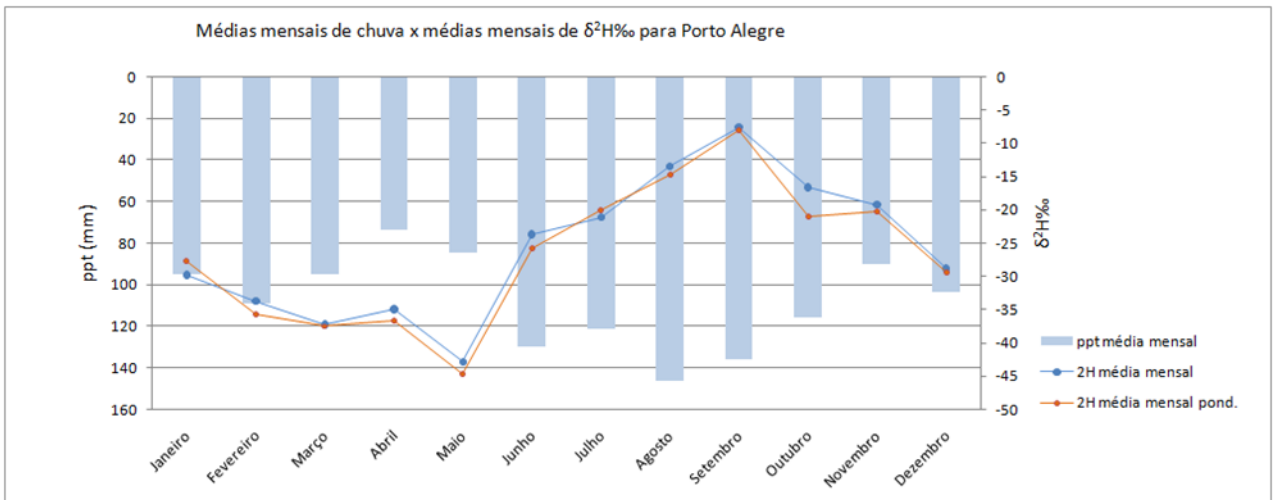


Figura 7. Correlação entre $\delta^2\text{H}$ e temperatura

Por mais que a escala temporal de análise até então presente seja consideravelmente ínfima, o arranjo dos dados isotópicos atuais e históricos permitem sugerir possíveis mudanças quanto aos processos meteorológicos locais e regionais ao se analisar o padrão médio da assinatura isotópica do local.

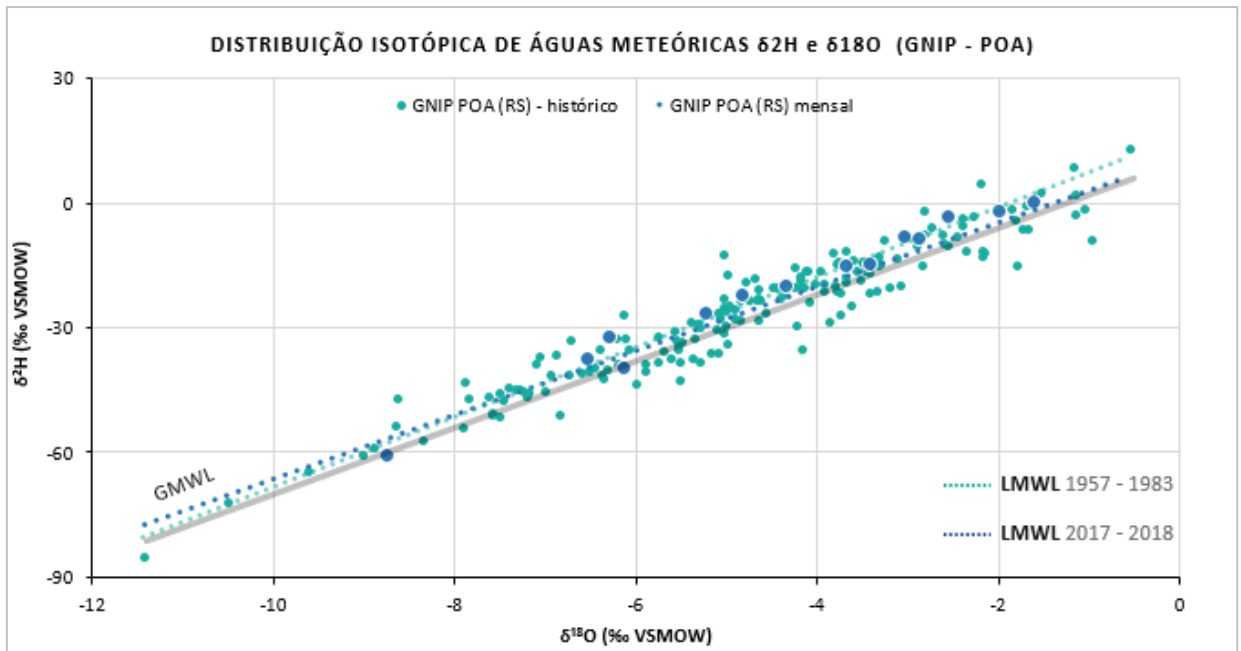


Figura 8. Distribuição isotópica dos dados históricos (1957 – 1983) e dados atuais (2017 – 2018) GNIP POA.

Tabela 6. Dados Isotópicos e climatológicos para GNIP-POA (agosto de 2017 a fevereiro de 2020) - **completar**

Mês/Ano	PPT ² m (mm)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$		$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ mp	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$		$\delta^2\text{H}(\text{‰})$ mp	d-excess(‰)		d-excess(‰)m	T ar (°C) m	PVap (hPa) m
08/2017		-3,696	0,157		-15,17	0,1		14,4	1,26			
09/2017		-4,352	0,166		-19,8	0,02		15,02	1,33			
10/2017		-1,61	0,127		0,16	0,02		13,04	1,02			
11/2017		-5,226	0,172		-26,4	0,04		15,41	1,38			
12/2017		-3,427	0		-14,44	0,04		12,98	0,04			
01/2018		-6,146	0,025		-39,42	0,12		9,75	0,23			
02/2018		-6,532	0,053		-37,48	0,06		14,78	0,43			
03/2018		-8,759	0,034		-60,57	0,04		9,51	0,27			
04/2018		-4,821	0,014		-22,23	0,06		16,33	0,12			
05/2018		-6,299	0,008		-32,36	0,08		18,04	0,1			
06/2018		-2,866	0,011		-8,61	0,28		14,31	0,3			
07/2018		-3,029	0,043		-8,19	0,14		16,05	0,37			
08/2018		-2,555	0,057		-3,19	0,07		17,25	0,46			
09/2018		-2,002	0,178		-2,02	0,29		14	1,45			

9. Perspectivas Futuras

O valor de um banco de dados aumenta à medida que as medições se perpetuam no tempo tornando a série histórica mais extensa e, portanto, mais significativa. A continuidade dos esforços em dar seguimento ao atual monitoramento deve ser encarada como uma prioridade permanente. A existência destes dados permite algumas abordagens específicas e pertinentes que podem agregar importantes elementos a pesquisas científicas da área ambiental hídrica e climatológica:

- Correlação dos dados isotópicos de chuva com concentrações isotópicas encontradas em diferentes aquíferos e sistemas aquíferos da região sul;
- Avaliação dos processos formadores de eventos de chuva e sua influência nas recargas;
- Uso das assinaturas isotópicas das chuvas na compreensão dos eventos climáticos extremos e cíclicos;
- Avaliação estatística e inferência sobre eventuais tendências temporais.^[GL4]

10. Bibliografia

1. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Climatological Normals (Climo) for climate and climate ship stations for the period 1932-1960, WMO/OMM No. 17, TP.52.
2. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Weather Reporting, Volume A: Observing Stations, WMO/OMM No. 9, TP.4.
3. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION in Co-operation with Environmental Science Services Administration USA, Monthly Climatic Data for the World, United States Government Printing Office, monthly editions.
4. LUCAS, L. L., UNTERWEGER, M. P., Comprehensible Review and Critical of the Half-life of Tritium. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 105-4 (2000), 541-549.
5. CRAIG, H., Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters, Science 113 (1961) 1833.
6. GONFIANTINI, R., Standard for stable isotope measurements in natural compounds, Nature (London) 271 (1978) 534-536.
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation, Technical Reports Series No. 331, IAEA, Vienna (1992) 781.
8. TAYLOR, C.B., Stable Isotope Composition of Monthly Precipitation Samples Collected in New Zealand and Rarotonga, Physical Science Rep. 3, Dept. of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, New Zealand (1990) 93.

9. ROZANSKI, K., ARAGUAS ARAGUAS, L., GONFIANTINI, R., Isotope Patterns in Modern Global Precipitation, Geophysical Monograph 78. In: Climate Change in Continental Isotope Records, American Geophysical Union (1993) 1-36.
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Environmental Isotope Data No. 1-10: World Survey of Isotope Concentration in Precipitation.