

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Um panorama bibliométrico do uso de isótopos ambientais na hidrogeologia
no período 2000-2020: cenário mundial e perspectivas de estudos emergentes**

MARIANA GOLDONI DE SOUZA

Nº 21/31

Monografia apresentada à disciplina
0440500 - Trabalho de Formatura – 2021,
para obtenção do certificado de
conclusão de Graduação em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Christine Laure Marie Bourotte
Coorientador: Anderson Santana

SÃO PAULO 2021

Dedico esse trabalho a todos geocientistas que têm interesse em utilizar ferramentas bibliométricas como forma de aprimorar as revisões de literatura, explorar efetivamente a base de um grande volume de conhecimentos existente e progredir em uma linha de pesquisa para aplicar uma visão baseada em evidências. Para, também, possibilitar inferir tendências ao longo do tempo, identificar mudanças nas fronteiras das disciplinas, detectar os pesquisadores e instituições mais produtivas, e apresentar um panorama global da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Começo essa grande lista de gratidão com minha mãe Daniela, meu pai Rubens e meu irmão Matheus. Minha família é minha base, onde há diálogo aberto sobre todo e qualquer assunto, sem julgamento. Com eles desenvolvi curiosidade para buscar conhecimentos gerais, posicionar-me e acreditar nas trajetórias que “escolhemos” ao longo da vida. Há muito apoio, amor e liberdade para buscarmos sempre melhorarmos como seres humanos. A minha mãe e ao meu pai, obrigada por lutarem tanto na vida para nos darem uma vida com muito estudo, dedicação, música, cultura brasileira, esporte e lazer. Ao meu irmão, obrigada por sempre me ajudar com as novidades desse mundo que avança rápido demais e por estar ao meu lado, sempre. Quero agradecer às minhas tias-mães: Manoela, que me ensinou a acreditar numa causa e sempre lutar por ela; Ricarda, que me ensinou sobre poesia periférica, danças de roda (coco), filmes *cults* e tantas outras formas culturais desse país maravilhoso. Agradecer às minhas primas-irmãs, Roberta e Katharina, vocês são mulheres que admiro demais. Todas, absolutamente todas as conversas que temos juntas me ensinam muito. Eu amo vocês e meus sobrinhos, Joaquim e Dandara, que tenho certeza, serão uma geração que vai lutar por esse mundo, pelas causas sociais e pela nossa natureza de uma forma mais inteligente que nós. E aos primos agregados, Renato e Ewerton, por toda a simpatia e respeito ao entrarem em nossa pequena grande família trapo. Quero agradecer meu tio-pai, Carlão, o homem mais carinhoso, generoso e dedicado. Quero agradecer as minhas segundas mães: Fátima e Elisangela, por cuidarem de nós como seus filhos, com tanto apreço e carinho. Quero agradecer às minhas avós, Terezinha e Margherita, e minha tia-avó, Darci, as mulheres mais amorosas do mundo e de quem sinto muita falta. O meu avô, Rubão e meu tio-avô, Rui, seu irmão, duas figuras muito importantes na construção da pessoa que sou hoje. Também sinto muita falta. Agradecer a todos os familiares e amigos da família que estão ou não estão mais entre nós, estão por aí Brasil e mundão a fora. Quero agradecer meus bichinhos, Frida, Bianca, Gil, Cristal, Alfredo, Brigitte, Tito, Brisa e Gepeto. Estão sempre prontos para te dar carinho e atenção, extremamente importantes nos momentos de crises de ansiedade. Um agradecimento com todo meu coração à Rô, mãe do meu companheiro, que me dá abraços muito carinhosos e faz uma comidinha mineira maravilhosa. Que também nos apoia a correr atrás dos nossos projetos de vida. Ao meu companheiro, Victor, por todo apoio emocional nesses 4 anos e meio de relacionamento durante a faculdade. Antes de escrever esses agradecimentos, estávamos lembrando como tinha sido essa trajetória até aqui. Esse ser humano é brilhante, em todos os sentidos da palavra, só tenho amor pra te dar. Obrigada, obrigada e obrigada por tudo que aprendemos juntos nesses anos. Desejo que tenhamos muito mais sabedoria, resiliência e admiração para percorrermos muitas estradas lado a lado!

Eu não sei quem eu seria no mundo sem todas as pessoas maravilhosas que conheci por oportunidades diversas que a vida me deu. Essas pessoas são amigas, amigues e amigos, mas se houvesse uma outra palavra para definir todes, seria amigas-irmãs e por aí vai. Espero que eu tenha memória suficiente para conseguir listar todes aqui: Lucas, Amanda, Patrick, Aline, Carolzinha, Dani, Naty, Rick, Breno, Murilo, Luciano, Belinha, Caio, Jhow, Léo, Altair, Zosha, Pavel, Carina, Angie, Gi, Lilo, Rosi, Maria, Willy, Carô, Nit, Ocotô, Tom, Baba, Dani, Miss, Pinguim, Rico, Waze, Sisu, Brisão, Trevas, Baia, Menoseu, Kibe, Degan, Jura, Dino, Grosa, Prepara, Dilma, Samantha, Rejeito, Bassan. Lyvia, Xita e Carol Blois, três mulheres inspiradoras, porto seguro e que me sinto bem compartilhando momentos lindos e outros difíceis pois elas sempre têm os melhores conselhos... Uma dedicação especial ao Lucas, que é meu amigo há mais de 13 anos, e viveu comigo as maiores dificuldades e as maiores conquistas, até hoje, de nossas vidas. A Lilo, uma mulher linda, forte e que me traz para meu eixo. Passamos os melhores e os piores momentos durante o curso de geologia, mas o amor e o respeito nunca mudaram. Às Vovós (Maria, Willy e Carô), que me mostraram o que há de melhor na amizade entre mulheres independentes, esportistas e muito inteligentes. Ao Beija&Grita, o grupo que possibilitou passarmos por esse período pandêmico com um pouco de sanidade mental, muita risada, afeto e longas conversas sobre os mais diversos assuntos (mesmo que tivéssemos uma tendência em voltar sempre aos polêmicos, rs). OBRIGADA GGEO, por me ensinar tanto sobre cavernas e por possibilitar viagens e cavernadas incríveis!! Agradeço a todos os times que tive oportunidade de competir ao lado: de Basquete (GDV, Geo, GeoPsico, GeoPsicoVet e Seleção USP de Basquete Feminino), de Natação (Galpão, Geo, Catadão), de Polo Aquático (Clube Paulistano), de Escalada (Howick Boulder e GeoBoulder) e aos grupos de Teatro (GDV e Teatro Escola Macunaíma). Queria agradecer as oportunidades de trabalhos que tive até hoje, onde pude conhecer pessoas excepcionais que me ensinaram muito e onde pude amadurecer a cada experiência: Jayne e sua família maravilhosa; AuPairLink com Júlia, Seamus, Thiago e Rafa; Red Balloon, com a minha chefe Alda e todos os demais professores; Golder, onde pude estagiar por 2 anos e trabalhar como assistente técnica por mais um ano. Minha chefe Andreia, Ariane minha colega direta e que possibilitou implementarmos um fluxo de controle de qualidade nos projetos e demais funcionários que são pessoas que transformam o ambiente de trabalho em um verdadeiro local de equipe. Também, tive a oportunidade de desenvolver uma

Iniciação Científica com bolsa da CNPq, vinculada ao IG e sob orientação do Ricota. Também às duas oportunidades que tive de dar monitoria nas disciplinas de Geologia Geral com a professora Lucelene e os professores Ivo Karmann e Chico Bill; e de Geologia Estrutural 2, com os professores Mário Campos e Kabongue. Queria dedicar um especial agradecimento a todos os Funcionários que trabalharam em todas as instituições de ensino que estudei, principalmente na USP e no IGC, onde fiz muitas amizades especiais. Ao meu coorientador, Anderson, por toda a dedicação quanto ao tema de bibliometria. A todos os professores do IGC e da vida, meus sinceros agradecimentos. Sem professores, não seríamos nada nesse mundo. Em especial, Boggi, o maior piadista, pregador de peças, de maior coração e que faz o melhor arroz carreteiro que já comi; Lucelene, Adriana e Maria Helena, três potências que me faziam me re-apaixonar pela geologia todos os dias, Chris minha orientadora, que topou trabalhar comigo desde 2019, mesmo que eu não soubesse sobre o que gostaria de pesquisar, foi paciente comigo até o fim.

“O importante não é ser o primeiro ou primeira, o importante é abrir caminhos.”

Conceição Evaristo

“Apenas quando somos instruídos pela realidade é que podemos mudá-la.”

Bertolt Brecht

RESUMO

Os isótopos ambientais são utilizados, no contexto hidrológico e hidrogeológico, como indicadores ou traçadores de águas superficiais e subterrâneas. Sua análise possibilita investigar a origem, a mobilização, o tempo de residência e a recarga da água subterrânea e quantificar a idade de um aquífero. Os avanços nessas técnicas possibilitarão enfrentar a realidade da diminuição de disponibilidade de água para abastecimento e outros usos. E, de alguma maneira, tentar proteger as águas subterrâneas mais recentes e mais rasas, que são vulneráveis a processos e atividades que ocorrem em superfície, bem como promover ações de gestão sustentável para águas mais puras e mais antigas, com tempos de recarga muito mais longo. Junto a esses avanços, a produção científica também cresce rapidamente tornando-se cada vez mais difícil manter-se atualizado de tudo que é publicado. Tendo isso em vista, esse projeto pretende demonstrar a aplicação da análise bibliométrica para propor formas de aprimorar as revisões de literatura, explorar efetivamente a base de um grande volume de conhecimentos existente e possibilitar inferir tendências ao longo do tempo, identificar mudanças nas fronteiras das disciplinas, detectar os pesquisadores e instituições mais produtivas, e apresentar um panorama global da pesquisa. Ela é feita por meio da aplicação de indicadores de medição da ciência, com o objetivo de avaliar sua qualidade, pertinência e impacto. O mapeamento bibliométrico consiste em uma avaliação quantitativa e estatística, e apresenta-se nas seguintes etapas: definição do tema de pesquisa, coleta de dados, análise de dados, visualização dos dados e interpretação. Para tanto, o tema da pesquisa é entender a dinâmica da produção científica e o desenvolvimento da técnica de isotopia aplicada à hidrogeologia nos últimos 20 anos (2000 – 2020), e identificar possíveis avanços futuros, trazendo, também, um olhar especial à pesquisa no Brasil, que ainda é muito jovem. A coleta de dados foi realizada nas bases da *Scopus* e da *Web of Science (Wos)* no período indicado. Para analisar os dados, foi utilizado o *RStudio (bibliometrix)* para compilar os arquivos, excluir informações duplicadas e avaliar o conteúdo dentre as duas bases de dados e identificar possíveis problemas. Já para a visualização e interpretação fez-se o uso de softwares como o *VOSViewer*, *Excel* e a biblioteca *Biblioshiny*. Com isso, alguns resultados no âmbito global puderam ser discutidos como a colaboração internacional nessa área de pesquisa está aumentando e novas relações resultantes do crescimento das capacidades nas economias emergentes, também. Principalmente, pois temas emergentes têm tratado progressivamente das questões da mudança climática. Já no caso do Brasil, identificou-se que o cenário da pesquisa no Brasil ainda é muito jovem e as correlações entre os pesquisadores brasileiros ainda são muito fragmentadas, onde os principais centros de pesquisa brasileiros não interagem uns com os outros. Entretanto, os autores brasileiros fazem numerosas publicações com colaboradores internacionais.

ABSTRACT

The study is structured to measure the dynamics of scientific production and the development of the isotope technique applied to hydrogeology in the last twenty years (2000 - 2020). Using bibliometric tools, it aims to analyze the available data, methodological advances, emerging topics and their limitations, in order to try to visualize the existing knowledge gaps. The motivations for this overreview are (i) the importance of the isotopic hydrogeology approach for understanding groundwater sources. Their movement and interaction with surface waters, their discharge conditions for maintaining river base flows, their connections with climate and the hydrological cycle, and their recharge and storage conditions; (ii) the advances in isotopic techniques may be helpful to face the reality of the decrease in water availability for supply and further uses; (iii) bibliometric analysis, which is the focus of this study, is an important tool to evaluate the global scientific production through the application of science measurement indicators, with the aim of assessing its quality, relevance and impact. Bibliometric mapping consists of a quantitative and statistical evaluation, and is presented in the following stages: definition of the research topic, data collection, data analysis, data visualization and interpretation. To this end, the research theme is to understand the dynamics of scientific production and the development of the isotope technique applied to hydrogeology over the last 20 years (2000 - 2020), and to identify possible future advances, also taking a special look at research in Brazil, which is still very young, appearing globally around 2012/2013. Data collection was carried out in the Scopus and Web of Science (Wos) databases during the indicated period. To analyze the data, RStudio (bibliometrix) was used to compile the files, exclude duplicate information, and evaluate the content between the two databases and identify possible problems. For visualization and interpretation, software such as VOSViewer, Excel and the Biblioshiny library were used. With this, some results at the global level could be discussed as the international collaboration in this research area is increasing and new relationships resulting from the growth of capabilities in emerging economies, as well. Mainly because emerging themes have been progressively addressing climate change issues. In the case of Brazil, it was identified that the research scene in Brazil is still very young and the correlations between Brazilian researchers are still very fragmented, where the main Brazilian research centers do not interact with each other. However, Brazilian authors make numerous publications with international collaborators.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. METAS E OBJETIVOS	13
3. REVISÃO DA LITERATURA	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
5. RESULTADOS	17
6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	43

1. INTRODUÇÃO

Os isótopos ambientais são utilizados, no contexto hidrológico e hidrogeológico, como indicadores ou traçadores de águas superficiais e subterrâneas. Sua análise possibilita investigar a origem, o fluxo, o tempo de residência e a recarga da água subterrânea e quantificar a idade de um aquífero (Cook, 2020).

Isótopos caracterizam-se por apresentar o mesmo número atômico e diferentes números de massa. A variação do número de nêutrons de um elemento é quem condiciona as alterações nos números de massa e essas alterações proporcionam comportamentos diversos do elemento em relação ao isótopo. Essas particularidades ocasionam um processo chamado fracionamento isotópico, isto é, modificação local da abundância relativa entre os isótopos na natureza. Mudanças de fase, diferença na taxa de reação química, diferença na massa podem ocasionar o fracionamento isotópico (Clark & Fritz, 1997).

Os isótopos ambientais são aqueles que estão relacionados aos ciclos naturais do meio ambiente como o ciclo hidrológico, o ciclo do carbono, o ciclo do nitrogênio entre outros. Os principais estudos e avanços históricos nessa concentram-se na utilização dos isótopos de hidrogênio como ^1H , ^2H , ^3H , isótopos de carbono como ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C , de nitrogênio como ^{14}N e ^{15}N , de oxigênio como ^{16}O e ^{18}O e de enxofre como ^{32}S e ^{34}S . Mas avanços recentes já estão ampliando o uso de ^{36}Cl e o ^3He .

Sua aplicação possibilita traçar o movimento e a interação das águas subterrâneas com os corpos superficiais, suas condições de descarga para manutenção dos fluxos de base dos rios, suas conexões com o clima e com o ciclo hidrológico, suas condições de recarga e armazenamento (Jasechko, 2019). A recarga acontece quando a água percola através das zonas insaturadas e armazena-se em um sistema de aquíferos (zona saturada), podendo ocorrer por toda área de afloramento dos aquíferos livres e confinados. Quando há precipitação e a água infiltra alcançando o lençol freático, a recarga é classificada como direta. Ela é localizada quando há percolação da água que passa por corpos de águas superficiais. Já em zonas de recarga indireta, o aquífero é reabastecido por meio da drenagem superficial das águas, como uma filtração vertical, onde o fluxo subterrâneo indireto é confinado por uma camada sobrejacente, favorecendo fluxos descendentes. É de grande importância identificar as fontes e os mecanismos de recarga para proteger o abastecimento de fontes poluidoras e compreender como o armazenamento e a

descarga das águas subterrâneas podem ser afetados pelo bombeamento de poços (Jasechko, 2019).

Os avanços nas técnicas de isotopia em hidrogeologia, possibilitam enfrentar a realidade da diminuição de disponibilidade de água para abastecimento e outros usos, especialmente ao entender as condições de recarga ou as fontes de contaminação. E, de alguma maneira, tentar proteger as águas subterrâneas mais jovens e mais rasas, que são vulneráveis a processos e atividades que ocorrem na superfície terrestre, bem como promover ações de gestão sustentável para águas mais puras e mais antigas, com tempos de recarga muito mais longos (Clark e Fritz, 1997; Gleeson et al., 2016; Cook, 2020).

A ampla incorporação de isótopos ambientais em programas de monitoramento hidrológicos e hidrogeológicos possibilitaria compreender todos os compartimentos do ciclo hidrológico, processos de movimentação e variações no armazenamento de águas subterrâneas, para fazer uma gestão integrada dos recursos hídricos. Para isso é importante traçar um panorama dos avanços científicos nessa área de pesquisa nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, para viabilizar uma maior percepção da correlação entre publicações, pesquisadores, instituições e metodologias.

A análise bibliométrica, que é o foco desta pesquisa, consiste em uma avaliação quantitativa e estatística para medir a produção científica e o desenvolvimento da técnica de isotopia aplicada à hidrogeologia nos últimos 20 anos (2000 – 2020).

A bibliometria é uma importante ferramenta para avaliar a produção científica global e é feita por meio da análise de dados bibliográficos, com a aplicação de indicadores de medição da ciência, com o objetivo de avaliar sua qualidade, pertinência e impacto. No início do século XX, a avaliação quantitativa, que era realizada em pequena escala, começava a revelar padrões distintos em como as publicações são produzidas. Atualmente, a aplicação de ferramentas e técnicas em conjuntos de dados em grande escala, na era do Big Data, precisaram evoluir junto ao aumento substancial no volume das produções (Ding e Rousseau, 2014). Dentre elas, a estatística, a análise de redes e a mineração de texto (“text mining”) serão algumas das técnicas aplicadas para esse estudo.

A medição e avaliação do impacto acadêmico têm sofrido rápidas mudanças nas últimas duas décadas, desempenhando um papel cada vez mais significativo na

forma como indivíduos, grupos de investigação, revistas, departamentos acadêmicos, instituições e países produzem, publicam e divulgam suas pesquisas. Enquanto a contagem de publicações em um determinado período revela a produtividade, a contagem do número de citações de um artigo é frequentemente considerada uma medida intuitiva da qualidade e do impacto científico da pesquisa publicada. São usadas para classificar universidades, laboratórios e pesquisadores como uma medida mais "objetiva" e gradualmente vêm substituindo as avaliações mais "subjetivas" que têm sido usadas desde o século XVII. Entretanto, estes critérios/indicadores são aplicados de maneira excessiva e sem cautela e a falta de especificação da escala na qual os indicadores são válidos e úteis, são, dentre outros, fatores que prejudicam sua utilização (Gingras, 2016).

Para tanto, um panorama dos avanços das técnicas isotópicas e suas aplicações na hidrogeologia promovem um olhar mais global ao tema e contribuem para os movimentos Open Science, que propõem tornar o conhecimento científico disponível ao público e os resultados de pesquisas com financiamento público acessíveis à sociedade, promovendo a contribuição e colaboração de pesquisadores, educadores, gestores e da população em vários estágios da pesquisa (Bautista-Puig et al., 2019).

Por conta do crescimento significativo da produção científica mundial, as revisões de literatura estão cada vez mais assumindo um papel crucial na síntese de resultados de pesquisas anteriores para explorar efetivamente a base de conhecimentos existente, progredir em uma linha de pesquisa e aplicar uma visão baseada em evidências e sustentar argumentos baseados em julgamento profissional.

É nessa *Era do Big Data*, isto é, uma era com uma enorme quantidade de dados, mas que estamos desenvolvendo capacidade de armazenar todos eles, processá-los e analisá-los. Para isso, a bibliometria se faz mais do que necessária, pois, com ela, é possível introduzir uma revisão sistemática, transparente e reproduzível em um processo baseado na medição estatística da ciência, cientistas ou atividade científica (Broadus, 1987; Aria e Cuccurullo, 2017). Com ela é possível fazer uma análise objetiva e estruturada de um grande volume de informações, para inferir tendências ao longo do tempo (*trend topics*), identificar mudanças nas fronteiras das disciplinas, detectar os pesquisadores e instituições mais produtivas, e apresentar um panorama global da pesquisa.

2. METAS E OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho visam mapear, por meio de banco de dados bibliográficos, a evolução do conhecimento e aplicações de isótopos ambientais para análises de águas subterrâneas dos últimos vinte anos (2000-2020), para elaborar gráficos em rede e mapas interativos que auxiliem a análise da dinâmica da produção científica ao longo do tempo e identificar possíveis avanços futuros.

As motivações para essa revisão estão (i) na importância da abordagem da hidrogeologia isotópica para a compreensão das fontes de águas subterrâneas e quantificar suas taxas de recarga, descarga, fluxo e mistura; (ii) na análise das bases de dados utilizadas e suas limitações, e avaliar a eficácia dos indicadores em uma escala definida.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Uso de isótopos em Hidrogeologia

A utilização de isótopos no estudo de águas subterrâneas teve início nos anos 50 (Cook, 2020). Os avanços tecnológicos e o advento de técnicas laboratoriais de determinação de razões isotópicas, especialmente a espectroscopia a laser, possibilitaram o desenvolvimento das pesquisas e consequentemente o aumento das publicações, no final dos anos 90 e começo dos anos 2000. Mesmo que haja avanços significativos nas áreas de hidrologia e hidrogeologia devido a importância das águas para a segurança alimentar e energética, para a saúde humana e para os ecossistemas, as águas subterrâneas precisam ser melhor compreendidas quanto aos processos e quanto sua disponibilidade enquanto recurso (Jasechko, 2019). Vale ressaltar que os aquíferos representam aproximadamente 30% do volume de água doce do mundo e 95% da água doce disponível para o consumo (White, G.; Gleick, 1993).

A água é formada por isótopos de hidrogênio e oxigênio. Estes isótopos apresentam pesos atômicos diferentes, isto é, átomos como ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^1H , ^2H (deutério) e ^3H (trítio), fazem com que moléculas de água apresentem massas distintas e consequentemente propriedades físicas distintas, devido aos processos de mudança de fase, em função dessa variação de massa.

Em sua publicação intitulada “Variações Isotópicas em Águas Meteóricas” na revista Science (Craig, 1961) com 8.365 citações, Harmon Craig demonstrou a existência de uma relação entre o $\delta^{18}\text{O}$ e o $\delta^2\text{H}$ (deutério) em todas as águas

meteóricas e essa relação obedecia uma equação linear bastante conhecida, a Reta Meteórica Global (Equação 1).

$$\text{Equação 1: } \delta D = 8 \delta^{18}O + 10$$

A comparação dos isótopos estáveis a partir da posição relativa de uma amostra na reta meteórica global, permite interpretar quando e quais processos ocorrem na movimentação da água ao longo do ciclo hidrológico, isto é, posições abaixo da reta meteórica global indicam processos de evaporação e, acima da mesma, indicam a ocorrência de processos de reciclagem de vapor ao longo do transporte das águas na atmosfera. As variações isotópicas estão relacionadas a diferentes proporções em que as moléculas mais leves e mais pesadas ocorrem. Processos de modificação de fase (precipitação e evaporação) fazem com que uma quantidade de água mais leve e mais pesada se diferencie (fracione) do reservatório original (Clark & Fritz, 1997). Esse processo de diferenciação ou fracionamento produz um sinal isotópico característico do local e de uma condição climática, ou seja, cada reservatório terá um sinal isotópico singular que vai representar uma variabilidade isotópica temporal e espacial influenciada por fatores climáticos, como a temperatura, e fatores geográficos.

Conhecer o tempo de residência das águas subterrâneas é repensar uma exploração mais racional do recurso para que ele tenha uma durabilidade e para que sua resiliência hídrica aumente. Gleeson et al. (2016), por meio de dados geoquímicos, geológicos, hidrológicos e geoespaciais e pela análise de idades da água subterrânea baseada no trítio, demonstram que, de um volume total de 22,6 milhões de km³ de água subterrânea nos 2 km superiores da crosta, menos de 6% apresenta tempo de renovação de até 50 anos de idade. Essas águas modernas são as mais recentemente recarregadas e também as mais vulneráveis às mudanças climáticas globais, porém, seu tempo de renovação ainda pode ser gerenciado pela escala do tempo humano. Apesar disso, os grandes reservatórios são de águas fósseis, portanto, águas em que seu tempo de renovação encontra-se na escala geológica.

Os isótopos ambientais possibilitaram um maior entendimento sobre o comportamento das águas subterrâneas e, especialmente, o advento da espectrometria a laser viabilizou um maior número de determinações. Jasencko (2019) fez uma avaliação global de diversos bancos de dados para tentar analisar a distribuição espacial das assinaturas isotópicas, começando por revisar técnicas e

métodos comuns aplicados para avaliar a recarga, o armazenamento e o transporte de águas subterrâneas em diferentes regiões geográficas e condições climáticas distintas, salientando o impacto na qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos. Ele conclui que, provavelmente, um dos maiores e mais relevantes avanços nas contribuições das análises de isótopos esteja no desenvolvimento e no refinamento das técnicas que determinam as idades das águas. Por fim, o autor destaca pontos que ainda precisam evoluir quanto à análise de composições isotópicas de águas subterrâneas em escalas continentais a escalas globais.

3.2. Bibliometria

Segundo Ding e Rousseau (2014), a Bibliometria foi definida por Pritchard (1969) como "a aplicação da matemática e métodos estatísticos aos livros e outros meios de comunicação" e mais tarde, Nacke (1979) apresentou o termo informetria para abranger todos os aspectos quantitativos do estudo da informação, sua produção, disseminação e uso. Os autores apresentam como ferramentas e técnicas - como os métodos de mineração de dados e texto, a análise de rede e as técnicas estatísticas avançadas para revelar relações ou padrões ocultos dentro de grandes conjuntos de dados. Essas técnicas estão se tornando ferramentas valiosas para as análises de impacto acadêmico-científico.

Gingras (2016) discute o uso extenso da bibliometria para analisar objetivamente autores, revistas, universidades, enquanto a mesma substitui, gradualmente, a avaliação "subjetiva" que é utilizada desde o século XVII. Contestando seus abusos na avaliação da pesquisa e a maneira como vem sendo aplicada desde os anos 90, o autor defende que o resultado da relação mal definida entre o conceito e seus indicadores bibliométricos, bem como a falta de especificação da escala na qual os indicadores são válidos e úteis, são dentre outros, um fator que prejudica sua utilização.

Portanto, para eleger qual indicador é apropriado, é importante identificar quais são os níveis de suas aplicações. Vinkler (1988) os divide em três: o nível Micro, que compreende a quantidade de publicações ou citações geradas a partir de um artigo, ou um pesquisador; o nível Meso, abarcando um grupo de pesquisadores ou uma instituição; e, finalmente, o nível Macro, que se posiciona à altura de um grupo de países ou instituições e todas as suas publicações acerca de uma determinada área de pesquisa. Com isso, Thelwall (2008), ressalta a relevância de apresentar duas

aplicações da bibliometria como forma de não substituir completamente a análise qualitativa das publicações por uma análise quantitativa única. São elas:

I. a aplicação avaliativa, que avalia a repercussão de uma pesquisa acadêmica; e

II. a aplicação relacional, que olha o processo de pesquisa como uma rede que conecta pesquisadores, instituições e campos de pesquisa do mundo todo, elucidando novas frentes emergentes e conectando trabalhos acadêmico-científico a nível nacional e internacional.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas as seguintes ferramentas bibliométricas: Scopus (Elsevier, 2020), Web of Science - WoS (Clarivate, 2021), e os softwares Excel e VOSViewer (van Eck e Waltman, 2013) para tratamento e visualização dos dados bibliométricos.

Foi incorporada também a utilização da ferramenta bibliometrix, uma aplicação que visa executar a análise de mapeamentos científicos, programada em ambiente e linguagem R (Aria e Cuccurullo, 2017). Análises bibliométricas por vezes são bastante complexas pois exigem várias etapas de processamento dos dados e a utilização de algumas ferramentas, portanto, o pacote-R bibliometrix oferece um recurso único e de código aberto (open-source) com um fluxo de trabalho bibliométrico lógico (Aria e Cuccurullo, 2017).

Para trabalhar a ferramenta bibliometrix no RStudio (Allaire, 2009), se faz necessário a elaboração do script (Apêndice 01) e de arquivos em formato BibTex (.bib) ou Texto (.txt). Para este projeto, os dados foram compilados das bases de dados WoS e Scopus.

As primeiras etapas foram: mapear os dados relacionados com estudos de isótopos ambientais em águas subterrâneas entre os anos de 2000 a 2020 e a elaboração de um banco de dados. A pesquisa foi realizada no banco de referências da Scopus e da WoS pelas especificações “título”, “resumo” e “palavras-chave”, que nesse estudo serão chamadas por TAK (Title, Abstract e Keywords) como (TAK ("Groundwater") AND TAK ("isotope*" OR "environmental isotope*")) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2021 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "article")). Através dos resultados, elaborou-se uma planilha de dados .csv com a compilação dessas referências bibliográficas (arquivos .bib exportados da Scopus e WoS)

utilizando o RStudio. A partir dessa base de dados compilados, foram utilizados os softwares: VOSViewer, uma ferramenta de software para a construção e visualização de gráficos bibliométricos em rede (van Eck e Waltman, 2013); Excel, um editor de planilhas produzido pela Microsoft; e Biblioshiny, um aplicativo que fornece uma interface web para realizar análises de mapeamento científico usando as principais funções do pacote bibliometrix (Aria e Cuccurullo, 2017). Com essas ferramentas, foi possível gerar as figuras e gráficos que serão apresentadas na Seção 5 de resultados e discussões.

5. RESULTADOS

Os resultados desse estudo estão sendo apresentados no formato de um artigo que deverá ser submetido para a *Journal of Hydrology* após a defesa do TCC.

A bibliometric overview of the use of environmental isotopes in hydrogeology from 2000 to 2020: global scenario and perspectives for emerging studies

ABSTRACT

The study is structured to measure the dynamics of scientific production and the development of the isotope technique applied to hydrogeology in the last twenty years (2000 - 2020). Using bibliometric tools, it aims to analyze the available data, methodological advances, emerging topics and their limitations, in order to try to visualize the existing knowledge gaps. The motivations for this overview are (i) the importance of the isotopic hydrogeology approach for understanding groundwater sources. Their movement and interaction with surface waters, their discharge conditions for maintaining river base flows, their connections with climate and the hydrological cycle, and their recharge and storage conditions; (ii) the advances in isotopic techniques may be helpful to face the reality of the decrease in water availability for supply and further uses; (iii) bibliometric analysis, which is the focus of this study, is an important tool to evaluate the global scientific production through the application of science measurement indicators, with the aim of assessing its quality, relevance and impact. Bibliometric mapping consists of a quantitative and statistical evaluation, and is presented in the following stages: definition of the research topic, data collection, data analysis, data visualization and interpretation. To this end, the research theme is to understand the dynamics of scientific production and the development of the isotope technique applied to hydrogeology over the last 20 years (2000 - 2020), and to identify possible future advances, also taking a special look at research in Brazil, which is still very young, appearing globally around 2012/2013. Data collection was carried out in the Scopus and Web of Science (WoS) databases during the indicated period. To analyze the data, RStudio (bibliometrix) was used to compile the files, exclude duplicate information, and evaluate the content between the two databases and identify possible problems. For visualization and interpretation, software such as VOSViewer, Excel and the Biblioshiny library were used. With this, some results at the global level could be discussed as the international collaboration in this research area is increasing and new relationships resulting from the growth of capabilities in emerging economies, as well. Mainly because emerging themes have been progressively addressing climate change issues. In the case of Brazil, it was identified that the research scene in Brazil is still very young and the correlations between Brazilian researchers are still very fragmented, where the main Brazilian research centers do not interact with each other. However, Brazilian authors make numerous publications with international collaborators.

Keywords: Environmental isotopes, groundwater, Scopus, WoS, bibliometric analysis, RStudio, Bibliometrix, VOSViewer

1. Introduction

The use of isotopes in the study of groundwater began in the 1950s (Cook, 2020), and especially with technological advances and the advent of laboratory techniques for determining isotope ratios, especially laser spectrometry, enabled a breakthrough and growth in publications in the late 1990s and early 2000s. Studies are increasing due to their importance for food and energy security, human health and ecosystems (Jasechko, 2019). It is worth noting that aquifers account for approximately 30% of the world's freshwater volume available for consumption (White, G.; Gleick, 1993).

Environmental isotopes are used as indicators or tracers and their analysis makes it possible to investigate the origin, mobilization, residence time and recharge of groundwater (Cook, 2020). Their application makes it possible to trace the movement and interaction of groundwater with surface bodies, their discharge conditions for maintaining river base flows, their connections with climate and the hydrological cycle, their recharge and storage conditions (Jasechko, 2019). Recharge occurs when water percolates through unsaturated zones and is stored in an aquifer system (saturated zone). It is of great importance to identify the sources and mechanisms of recharge to protect the supply from polluting sources and to understand how groundwater storage and discharge can be affected by well pumping (Jasechko, 2019).

The broad incorporation of environmental isotopes in hydrological and hydrogeological monitoring programs makes it possible to understand all the compartments of the hydrological cycle, movement processes, and variations in groundwater storage, in order to carry out integrated management of water resources. For this reason, it is important to draw an overview of the scientific advances in this research area, allowing a greater perception of the correlation between publications, researchers, institutions, and methods.

The bibliometric analysis, consists of a quantitative and statistical evaluation to measure scientific production and the development of the isotope technique applied to hydrogeology in the last 20 years (2000 - 2020). Bibliometrics is an important tool for evaluating global scientific production and it is done by analyzing bibliographic data, applying science measurement indicators to evaluate its quality, relevance and impact.

Due to the significant growth in scientific production worldwide, literature reviews are increasingly taking on a crucial role in synthesizing the results of previous research and effectively exploring the existing knowledge basis, making progress in the line of research, and applying evidence-based insight and supporting arguments based on professional judgment.

In this Age of Big Data, bibliometrics enables to introduce a systematic, transparent, and reproducible review into a process based on the statistical measurement of science, scientists, or scientific activity (Broadus, 1987; Aria and Cuccurullo, 2017). With it, it is possible to perform an objective and structured analysis of a large volume of information, to infer trends over time, trend topics, identify changes

at the boundaries of disciplines, to detect the most productive researchers and institutions, and to present a global picture of research.

2. Material and Methods

The steps for conducting this study were as follows:

1. Definition of the theme;
2. Data collection;
3. Data analysis;
4. Data visualization;
5. Data interpretation

Figure 1 exemplifies the flow of scientific mapping of bibliometric data that is recommended for relevant analysis and interpretation of the data generated.

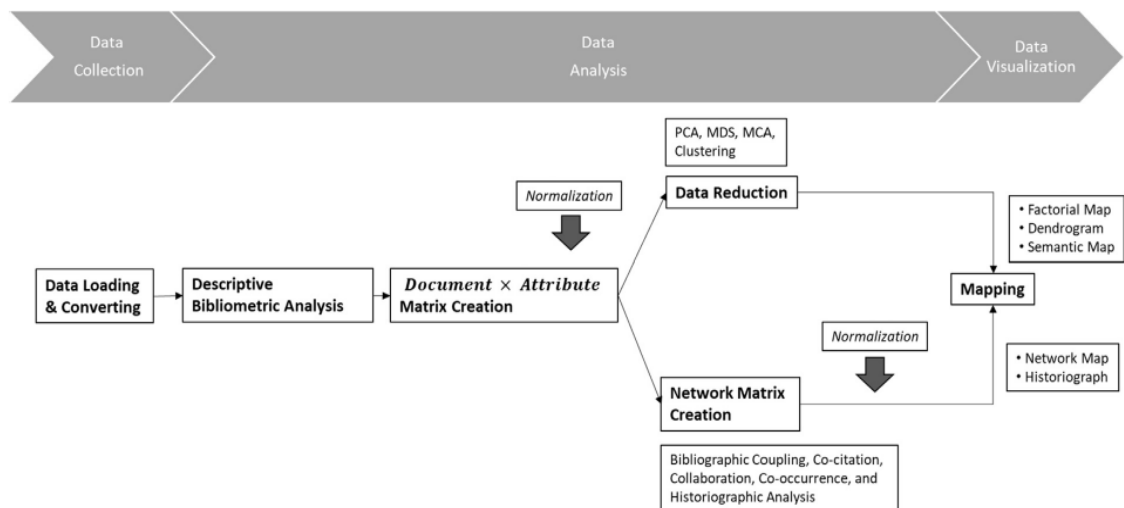


Figure 1: *bibliometrix* and the recommended scientific mapping flow (taken from Aria and Cuccurullo, 2017)

After choosing the theme “the use of environmental isotopes in groundwater studies”, the data collection were conducted using the following bibliometric tools: Scopus (Elsevier, 2020) and Web of Science - WoS (Clarivate, 2021) and the softwares Excel and VOSViewer (van Eck and Waltman, 2013) to process and visualize the bibliometric data. A bibliometrix tool programmed in R environment and language was also incorporated, to perform scientific mapping analysis, (Aria and Cuccurullo, 2017). Bibliometric analyses are sometimes quite complex as they require several data processing steps and the use of some tools, therefore, the R-package bibliometrix offers a unique and open-source resource with a logical bibliometric workflow (Aria and Cuccurullo, 2017). To work with the bibliometrix tool in RStudio

(Allaire, 2009), it is necessary to prepare the script (Appendix 01) and files in BibTex (.bib) or Text (.txt) format.

The first steps were loading and converting the data related to the topic of studies of stable isotopes in groundwater between the years 2000 and 2020 obtained from Scopus and Wos, followed by the elaboration of a database. The search was performed in the reference databases by the specifications "title", "abstract" and "keywords" which in this study will be called TAK (Title, Abstract and Keywords) as (TAK ("Groundwater") AND TAK (("isotope*" OR "environmental isotope*"))) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2021 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "article")). Using the results, a spreadsheet was prepared with the compilation of the references using RStudio by joining .bib and .csv files exported from the tool. In order to create a compiled database, the script follows the steps of normalization, data reduction by excluding duplicate information (4985 duplicated documents were removed) and network matrix creation (Publication Type, Authors, Author Full Names, Group Authors, Title, Source title etc.). Finally, to visualize the data, the following softwares were used: Biblioshiny, an application that provides a web interface to perform scientific mapping analyses using the main functions of the bibliometrix package (Aria and Cuccurullo, 2017) and VOSViewer, a software tool for building and visualizing bibliometric network graphs (van Eck and Waltman, 2013).

3. Results and discussions

3.1. General trends, prominent countries and the global contribution

The results of this bibliometric research on the study of environmental isotopes in groundwater showed that in the Scopus database there are 11960 documents from 1960 to the year 2020, among which 9839 are peer-reviewed scientific articles, the dominant database publication category making up 88% of the results published worldwide. In WoS, there are 9606 documents from 1968 to 2020, among which 8650 are peer-reviewed scientific articles, also the dominant database publication category making up 90% of the results published worldwide. The selection of the last twenty years reduces this scenario to 8213 published articles in Scopus and 7729 in WoS, that is, 83% and 89% respectively of the publications on the subject are concentrated between the years 2000 and 2020. When they are finally merged, the final database consists of 4985 duplicated documents removed, totalizing 11424 documents used in this analysis.

The map in Figure 2 shows a global panorama of scientific production, highlighting countries such as China and the United States as holders of the largest volume of this production. Followed by Canada, Australia, England, France which range from a minimum of 49 up more than 147 articles.

Country Scientific Production

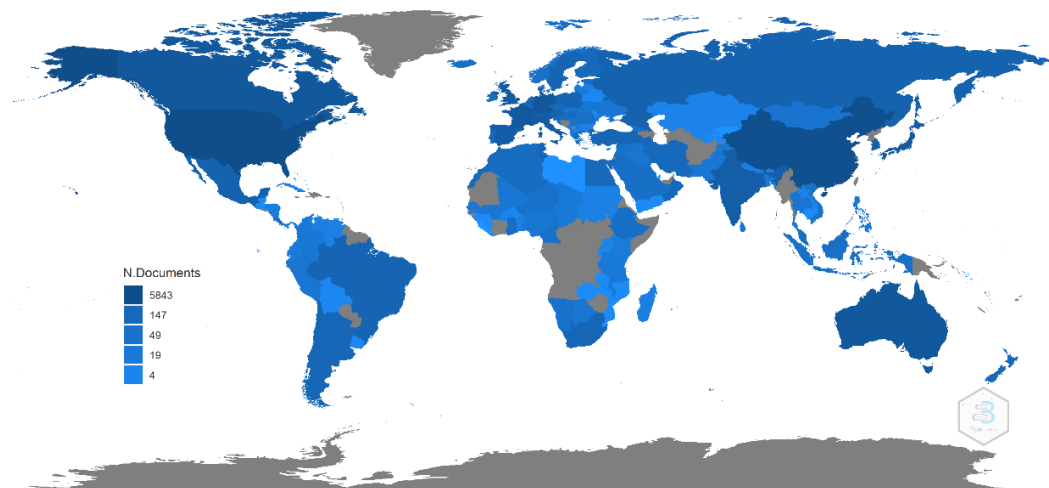


Figure 2: Scientific production by country from 2000 to 2020 (generated and visualized by the Biblioshiny-bibliometrix tool, 2021-11-26)

According to Publications Output: U.S. Trends and International Comparisons (National Science and Engineering Indicators, 2020), the output of peer-reviewed scientific journal articles and conference papers has grown by 4% annually over the past 10 years. Within this scenario, China stands out as growing twice as fast as the world annual average over the last 10 years, while the United States and the European Union (EU) have not reached half the world annual scientific production rate. This analysis reverberates, in the scope of the theme selected for this project, also in an accumulated curve of relevant growth in the last 20 years of scientific production, highlighting this rise in the last 10 years, according to Figure 3. Figure 4 shows the expressiveness and importance of the Chinese contribution on the theme, which surpassed the American contribution as of 2014/2015. It is worth noting that this graph also shows a significant decline in the year 2020, most likely due to the covid-19 pandemic, which had a strong influence on global health, politics and economics, as well as on science and scientific development in the countries.

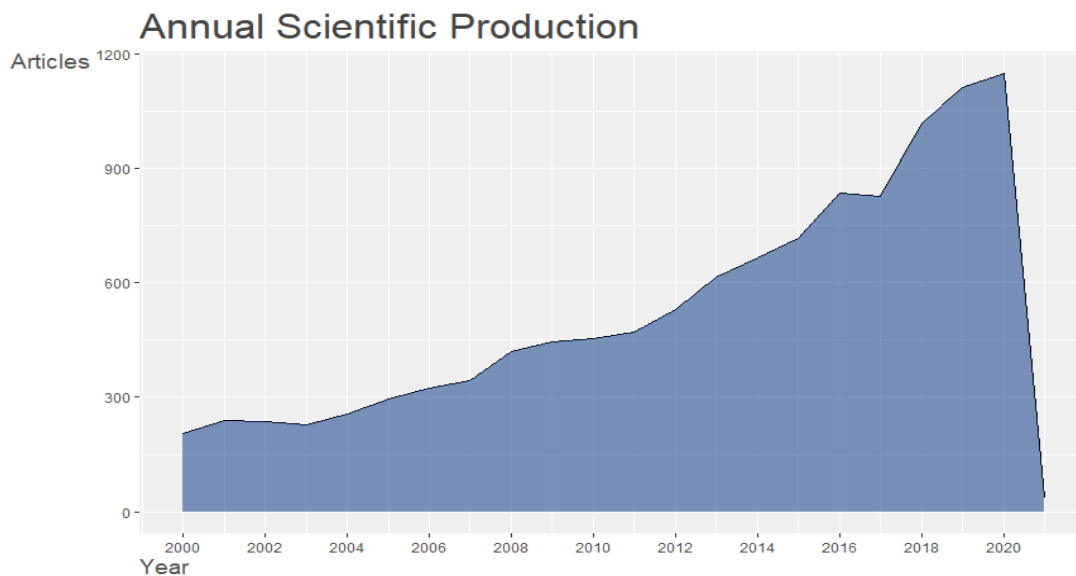


Figure 3: Global Annual Scientific Production - Annual Percentage Growth Rate -8.094205. Generated and visualized by the Biblioshiny-bibliometrix tool, 2021-11-26).

Also according to Publications Output: U.S. Trends and International Comparisons (National Science and Engineering Indicators, 2020), international research collaboration is increasing, reflecting traditional ties between countries and new relationships that result from capacity growth in emerging economies. Countries in stable, developed economies (including the United States, the EU, and Japan) have grown more slowly in publications, while emerging economies have increased output, collaboration, and impact at a rapid pace. These analysis can also be seen for isotope applied to hydrogeology in the graphs in Figure 5, which plot the most productive countries over the years and the evolution of international collaboration of publications (Multiple Country Publications).

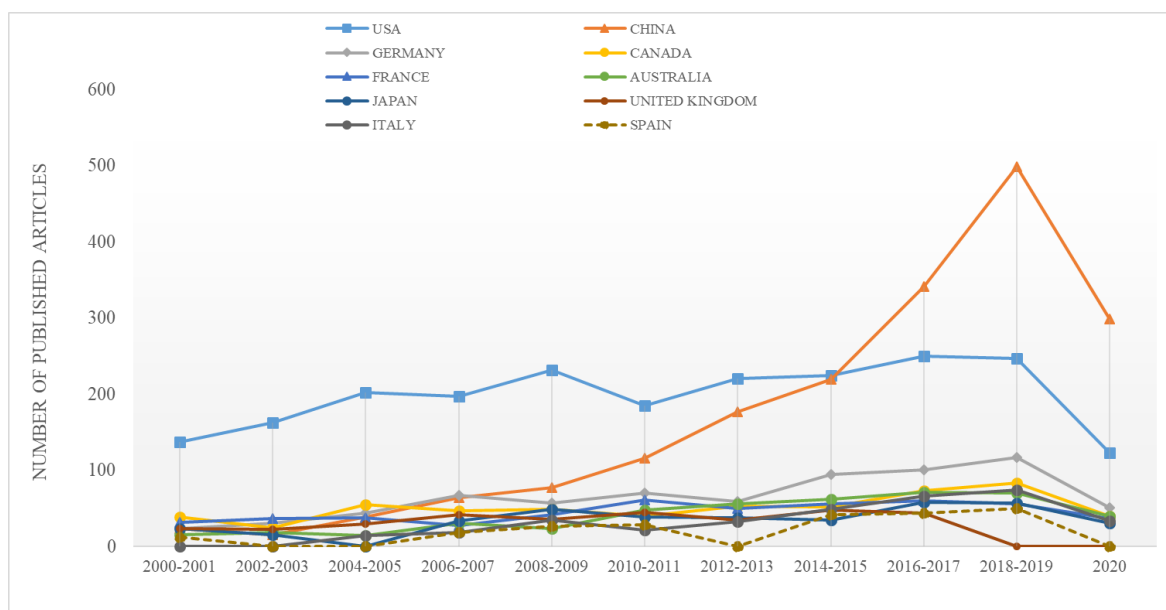


Figure 4: Number of articles published from 2000 to 2020 and the participation of the 10 most relevant countries (generated in Excel, 2021-11-26)

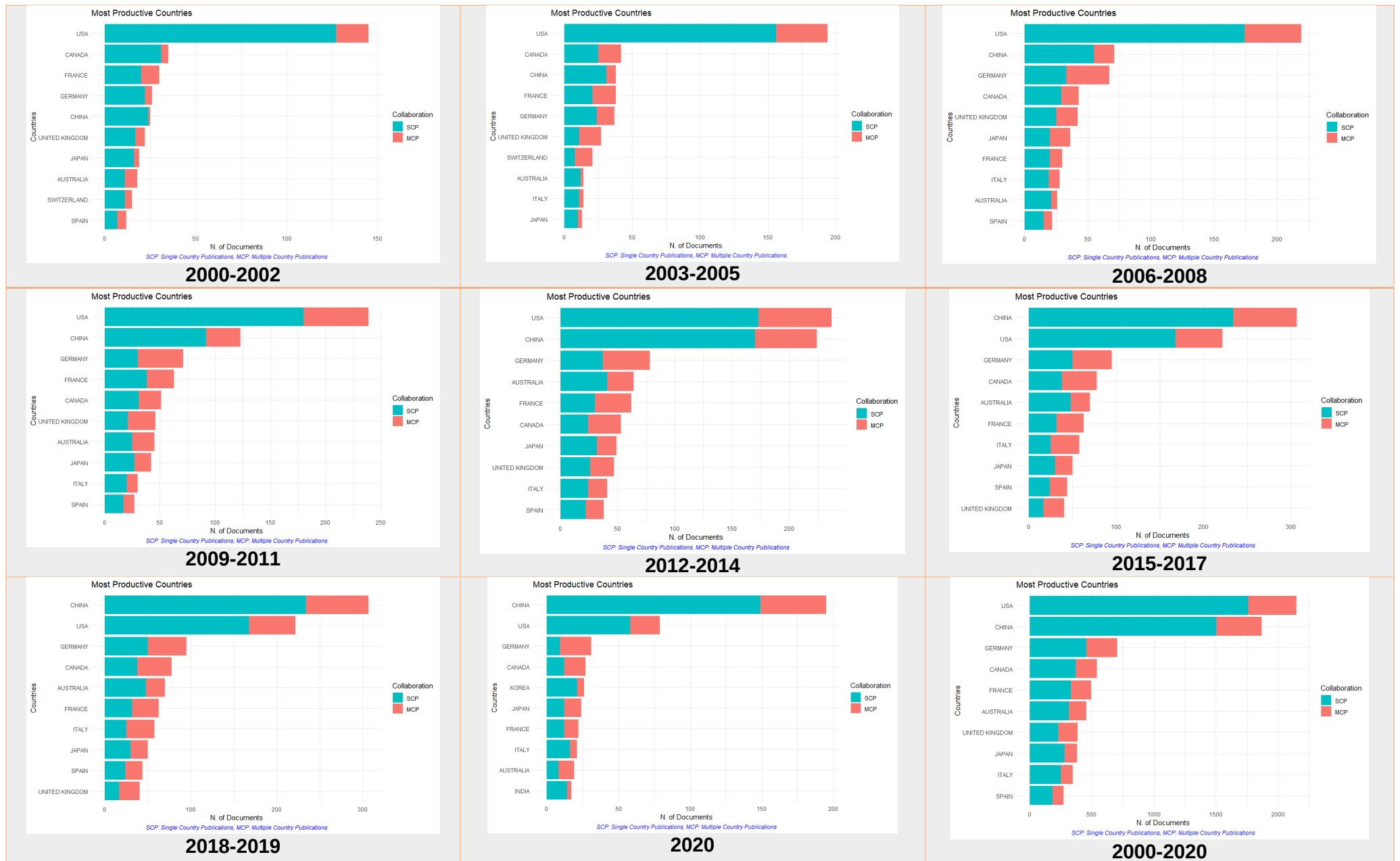


Figure 5 - Isotope applied to hydrogeology: the most productive countries over the years (2000-2020) and the growth of international collaboration of publications. SCP (Single Country Publications) e MCP (Multiple Country Publications).
Note: The horizontal axis of the graphs varies over time.

In the maps of collaboration presented in Figure 6, it is possible to note the incoming and significant participation of countries from the South American continents, such as Chile and Peru in 2006, Colombia and Bolivia in 2015. Highlighting Brazil that showed a relevant but recent increase in the production of scientific articles in the study area also from 2015. In the Asian continent, countries such as Turkey, Saudi Arabia, Iran, Oman and Pakistan consolidated their space in this area between the years 2003 to 2019, presenting considerable evolution in the participation of the global production. However, the highlight goes to China, which in 2015 boosts its scientific production in the area, and surpasses the USA in volume of published articles. It is also worth noting that the African continent, which participated in the global production between 2000 and 2002 counting only countries like South Africa, Ghana, Tunisia, Sudan, Ethiopia, Egypt and Morocco, reaches between 2018 and 2019 the participation of 20 countries counting those already mentioned, and examples like Senegal, Mali, Namibia, Botswana, Madagascar, Mozambique, Kenya among others.

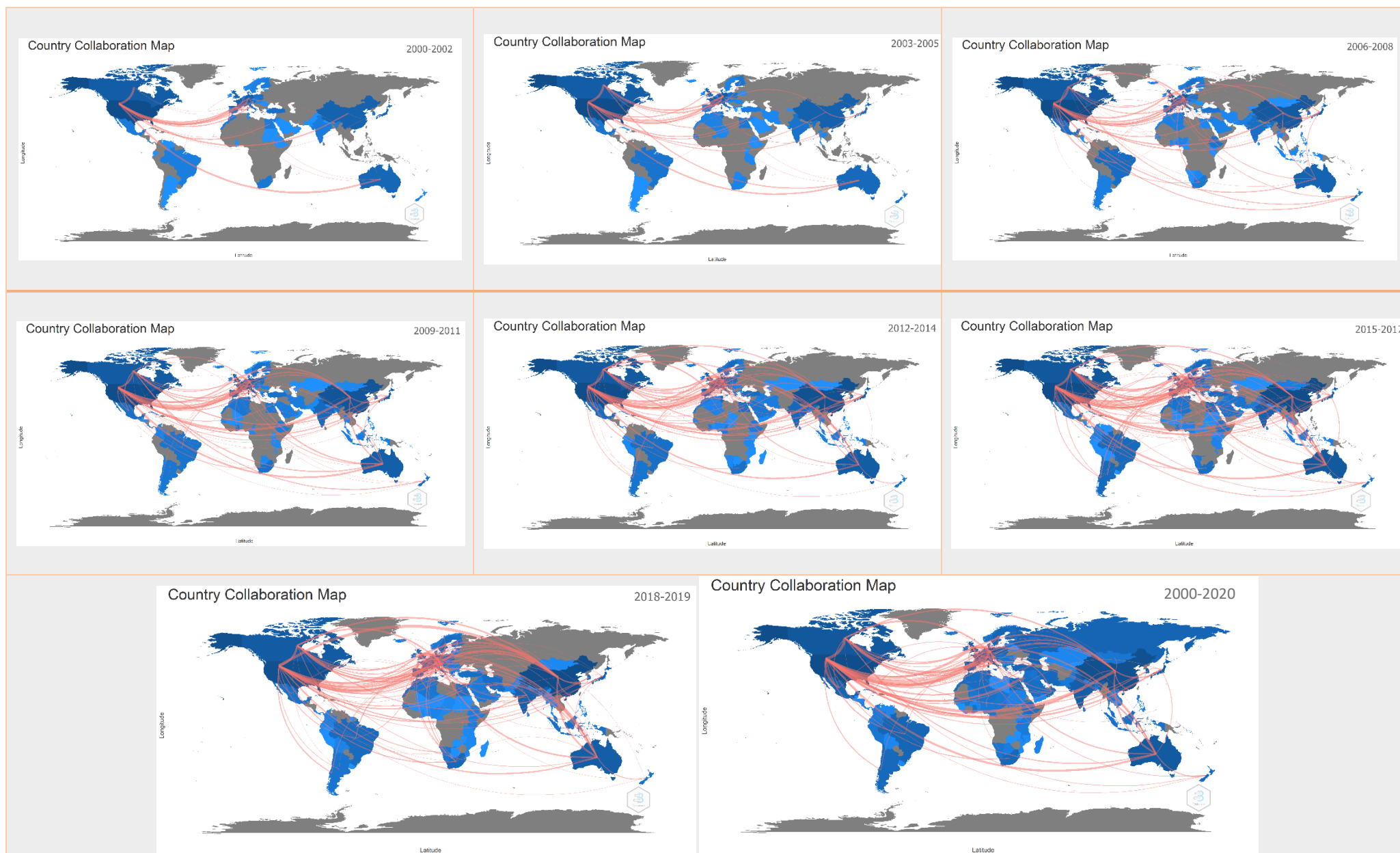


Figure 6 - Isotope applied to hydrogeology: The evolution of international collaboration of publications from 2000 to 2020, with significant emphasis from 2015 to 2020.

3.2. Prominent research areas and the most influential journals

In Scopus, more than 80% of the 8213 articles are distributed among four prominent research areas: "Environmental Science" (5237; 38.7%), "Earth and Planetary Science" (4207; 31.1%), "Agricultural and Biological Sciences" (1470; 10.9%) and "Chemistry" (761; 5.6%). In WoS, on the other hand, the majority of the 8650 articles are distributed among Web of Science Categories: "Water Resources" (3399, 36.1%), "Geosciences Multidisciplinary" (3160, 33.5%), "Environmental Sciences" (3084, 32.7%) and "Geochemistry Geophysics" (1509, 16.0%).

The analysis of the most influential journals was done according to Bradford's law (Figure 7), which considered the journals containing the articles related to the subject and organized in descending order in relation to the quantity of articles. Therefore, the successive zones of journals containing the same number of articles on the subject form the simple geometric series $1:n:n^2:n^3$, where the first zone "Core Collection", is the core of journals most dedicated to the subject (Alabi, 1979). Hence, the journals of this core are: "Journal of Geology", "Applied Geochemistry", "Hydrogeology Journal", "Environmental Earth Sciences", "Science of the Total Environment", "Hydrological Processes", "Chemical Geology", "Geochimica et Cosmochimica", "Environmental Science and Technology" and "Water Resources Research".

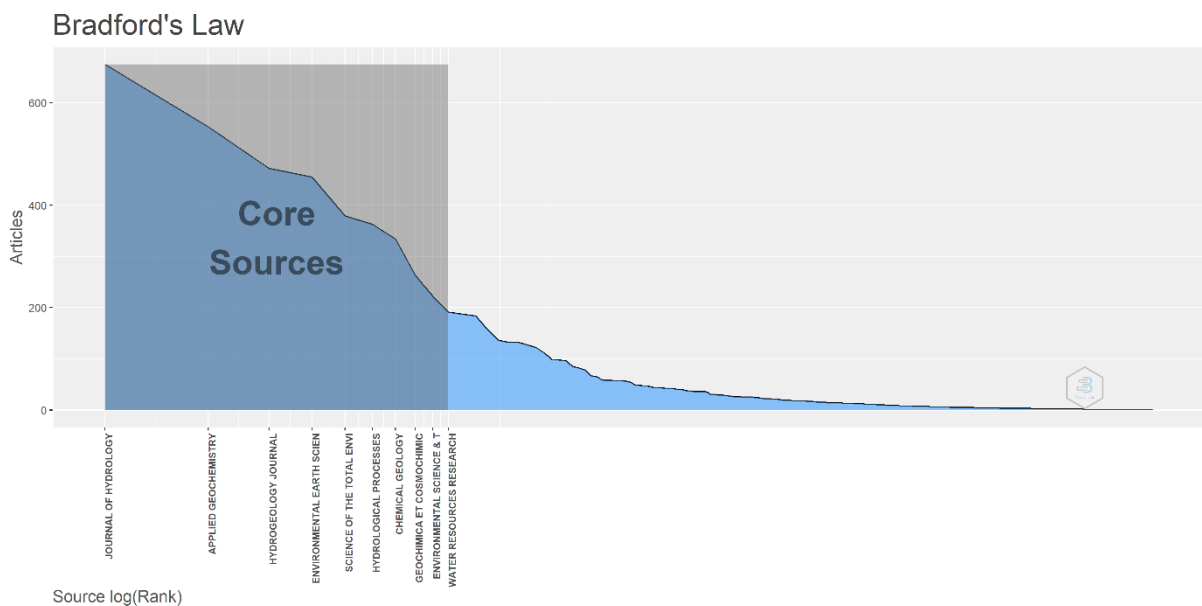


Figure 7: Bradford's Law: most influential journals in the research area between 2000 and 2020 (generated and visualized by the Biblioshiny-bibliometrix tool, 2021-11-26)

3.3. Prolific authors and relevant collaborations

The evaluation of quality, relevance and impact of the most prolific authors was made through the analysis of production volume, total citations, the H-index and G-index. According to the research results, the ten most relevant authors, regarding the volume of scientific production, have at least more than 65 articles published between the period from 2000 to 2020 on the theme. Among them, the authors and the number of articles published by them are: Aravena R. (94) from Canada, Whang Y. (90) from USA, Zouari K. (90) from France, Zhang Y (88) from USA, Richnow H. (84) from Germany, Li J. (77), Hunkeler D. (73) from Switzerland, Lollar B. (69) from Canada, Soulsby C. (67) from UK and Mayer B. (66) from Canada.

However, when the analysis is done by the total citation index (TC), the measurement range of the ten most relevant authors varies from 995 to 1595. Analyzing the ten most relevant, it's worth noting that there is a change from practically all authors previously cited, following: Mcdonnell J. (1595) from USA, Burnett W. (1516) from USA, Santos I. (1429) from Australia, Sturchio N. (1139) from USA, Mayer B. (1138), Böhlke J. (1115) from USA, Aravena R. (1099), Kipfer R. (1047) from Austria, Whang X. (1016) from China and Kim G. (997) from Korea.

The H-index (Hirsch, J. E., 2005). analysis, on the other hand, of the ten most relevant authors is distributed over a range of measures between 16 and 21. Among them, the three most relevant authors have an H-index of at least 20 (at least 20 published articles and 20 citations each), and they are: Burnett W. (21), Cartwright I. (20) from Australia and Santos I. (20).

The G-index is calculated based on the distribution of citations received by a given researcher's publications, i.e. G^2 . The ten most relevant authors are distributed over a range of measures between 25 and 31. Among them, the top five have a G-index of at least 27 (at least 20 published articles that combined have received at least 729 citations), and they are: Whang X. (31), Zouari K. (29), Aravena R. (28), Cartwright I. (28) and Burnett W. (27).

According to Harzing, A.W. (2007)

The h-index and g-index are both limited by the number of papers one publishes. Hence these indices – and especially the g-index – will always favor academics that publish more papers (provided they are cited at least moderately well). These indices are therefore not very suitable to assess the impact of academics that have published one or two ground-breaking contributions, but have not published any further highly cited work. For these

academics, the total number of citations might be a more appropriate metric. The variety of metrics allows you to select the metrics most appropriate to your purpose.

From Figure 8 it is understood that the distribution of articles produced and published shows that a small portion of authors are responsible for most of the scientific production, such authors were listed earlier.

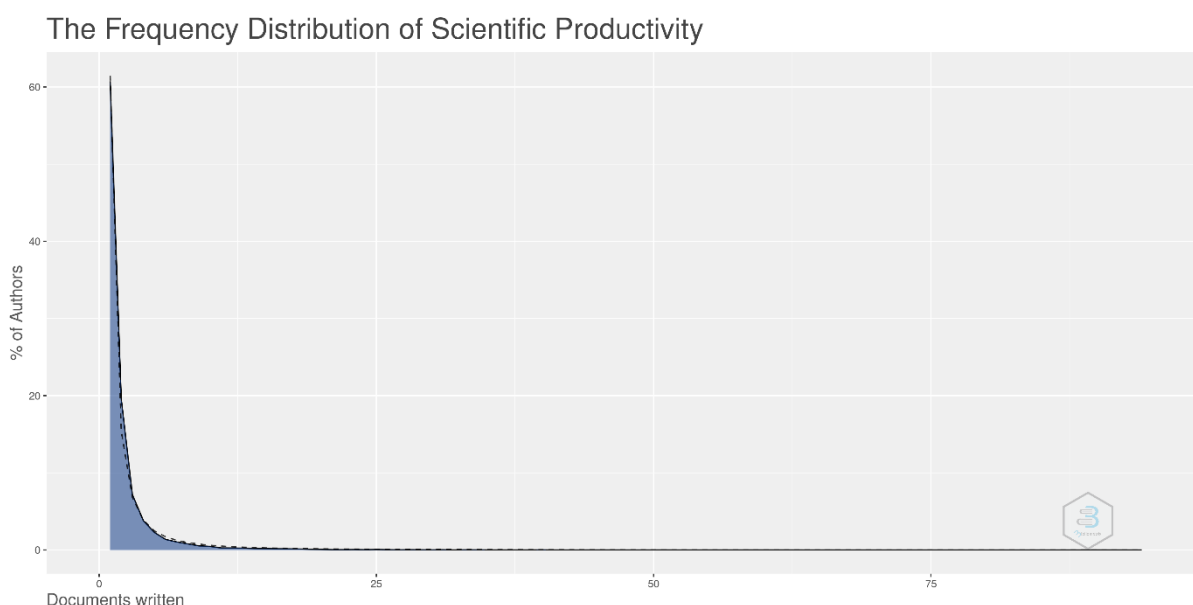


Figure 8: The Frequency of the Distribution of Scientific Productivity between 2000-2020 (generated and visualized by the Biblioshiny-bibliometrix tool, 2021-11-26)

The collaborations between authors, among publications from Scopus database, are presented in Figures 9 and 10, which show the authors who have published more than 17 articles and the isolated nodes¹ are ignored. Authors who have produced the most recent articles, from 2014 to 2020 are highlighted by the colors green to yellow in the Figure 9. This relationship matches the beginning of the rise of Chinese scientific production on the topic. The size of the circle is positively correlated with the number of articles. Then, the most prominent authors in this analysis are Aravena R. who has his contributions on the topic between the years 2008 to 2012, Wang Y., between 2014 to 2016 and Zhang Y. after 2016. Figure 10 also shows prominent circles on some punctual authors that highlight the number of citations of the authors and the link strength between the citations. It is interesting to note the triangular organization of the five clusters, where the central clusters (blue, red and green) correlate with the three extreme clusters (yellow, green and purple) through the

¹ Node or vertex, a term used in VOSviewer and/or other bibliometric tools, refers to an item. Items are the objects of interest. Items can be, for example, publications, researchers, or terms. A map usually includes only one type of item (van Eck and Waltman, 2013).

citation network, however there are no relationships between the yellow and purple clusters, i.e. between the authors who are represented in them.

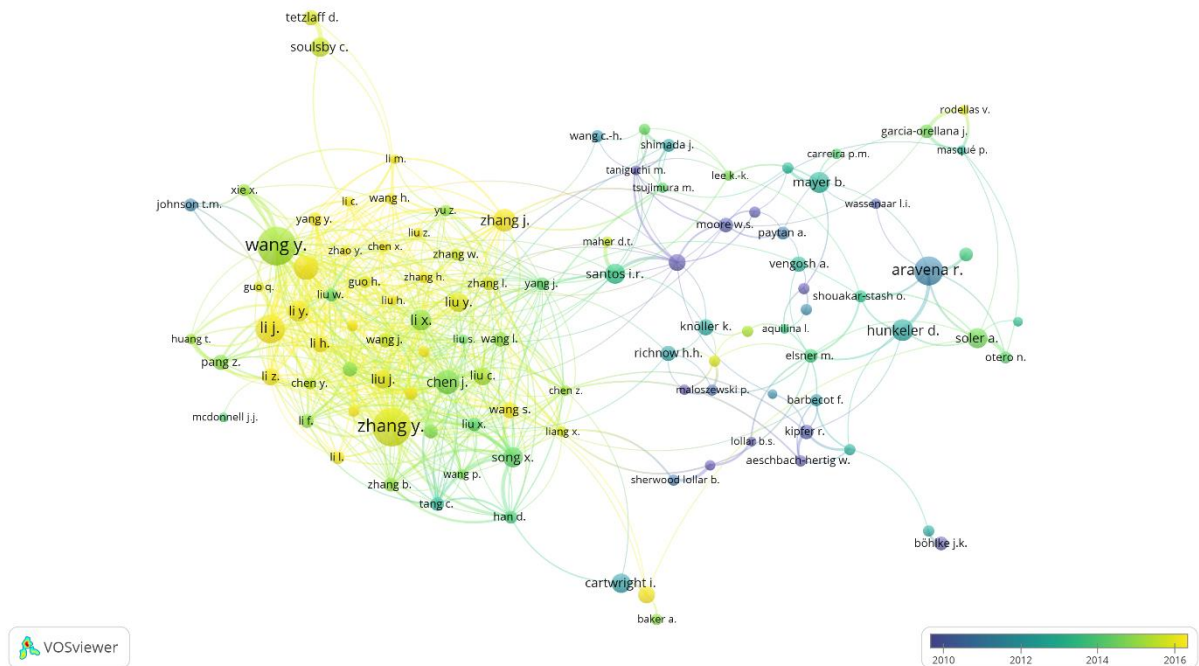


Figure 9: Coauthorship network weighted by the number of papers (the size of the circle is positively correlated with the number of papers, the lines show coauthorship between authors, and the colors indicate the time that authors produced the most). Generated by the VOSViewer tool 2021-08-01 from Scopus merged csv.

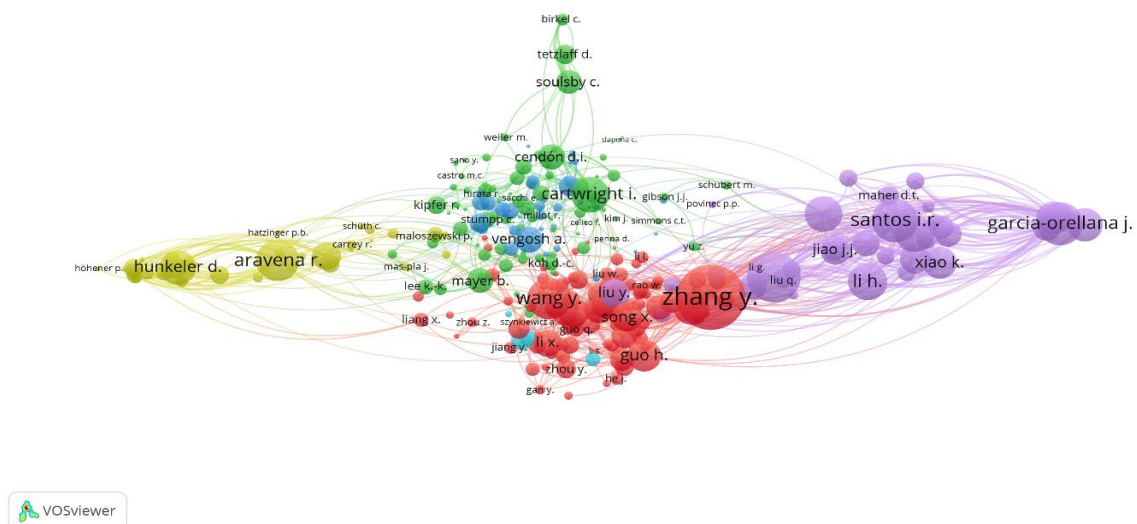


Figure 10: Citation network of the main author community weighted by total link strength (circle size is positively correlated with the number of citations, lines show co-authorship among authors, and colors represent clusters). Generated by the VOSViewer tool 2021-08-01 from Scopus merged csv.

In Figure 11, the network was constructed with co-citation network due to the missing links between citations among author's community. It is interesting to notice a

pattern with 5 main clusters and some dominant names such as Moore W., Craig H., Gat J., Aravena R. and Vengosh A. The majority of the names seen in this figure were not seen in the above networks from Scopus, which shows how bibliometric databases can perhaps give different ratings to their publications and their authors.

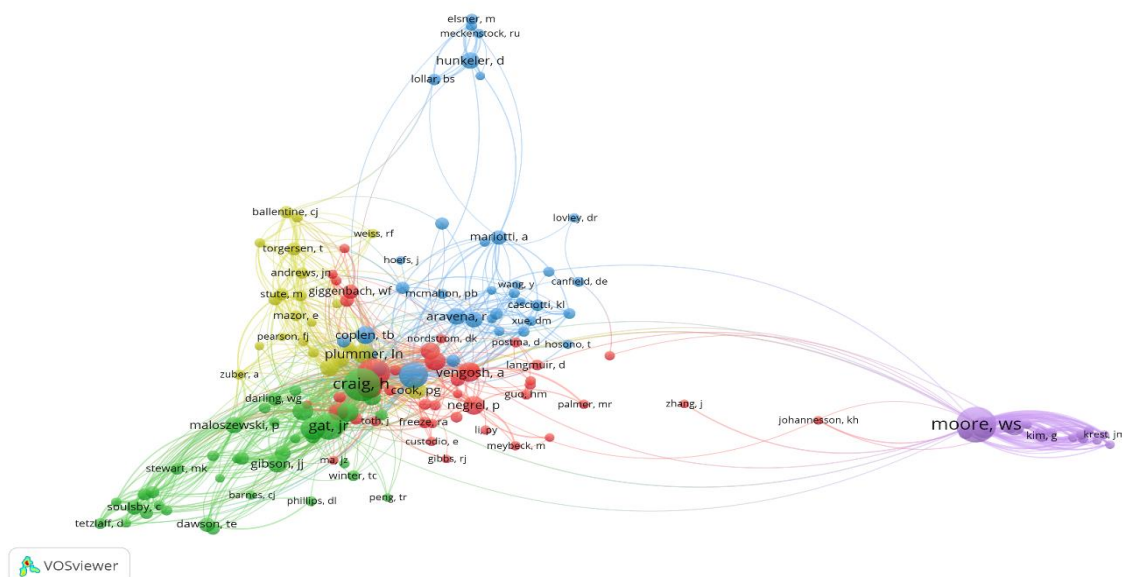


Figure 11: Co-Citation network of the cited authors weighted by citations (circle size is positively correlated with the number of citations, lines show co-authorship among authors, and colors represent clusters) and normalized by fractionalization. Generated by the VOSviewer tool 2021-11-26 from WoS merged csv.

3.4. Co-occurrence and keyword analysis, the most cited articles and possible emerging areas

Author keyword analysis can provide insights into major research topics and trends in the area of environmental isotope studies in groundwater. The co-occurrence network of author keywords is displayed in Figure 12. In Figure 12A, the authors' keywords were classified into four main clusters and in Figure 12B, the keywords were organized into a temporal analysis of occurrence and the main links between them. It is worth noting that the keywords on the borders between clusters bring some intersections between the subfields of isotope application studies in hydrogeology.

The yellow cluster, presents the most prominent keywords as "agriculture", "nitrate", "arsenic", "denitrification", "nitrate contamination" and "shallow groundwater". These subjects are strongly related to remediation of contaminated areas dominated by cultivation and agriculture, where contamination predominates in soil and shallow groundwater. The blue cluster features words such as "submarine groundwater discharge", "water quality", "strontium isotopes", "radium isotopes", "biodegradation", and "bioremediation" related to the contamination of groundwater by surface water

bodies in coastal environments. Such as estuaries, and bioremediation processes to contain the progress of these contaminations in discharge areas and to degrade, transform, and/or remove contaminants from these environmental matrices by the use of biological processes.

The red cluster, includes the dominance of the subjects "Hydrochemistry", "Geochemistry", "groundwater recharge" and the "tritium". Recent tritium-based research has applied multi-tracer mixing models to quantify flow fractions derived from pre-event storage and to split the age distribution of flow into more components (Jasechko, 2019).

Finally, the green cluster features the most prominent topics such as "isotope hydrology", "oxygen-18", "deuterium", "precipitation", "evaporation", with research related to understanding discharge conditions for maintaining river base flows, the connections with climate and the hydrological cycle, and recharge and storage conditions, such as estimation and modeling of transit time in watershed hydrology.

It is also worth listing that emerging topics have progressively dealt with climate change issues, given the emergence and severity of the theme. More importantly, how it exposes significant influence on the topic addressed in this research. Advances in these techniques will make it possible to face the reality of decreasing water availability for supply and other uses, and somehow try to protect the newer, shallower groundwater that is vulnerable to surface processes and activities, as well as to promote sustainable management actions for purer, older waters with much longer recharge times.

[illegible]

C

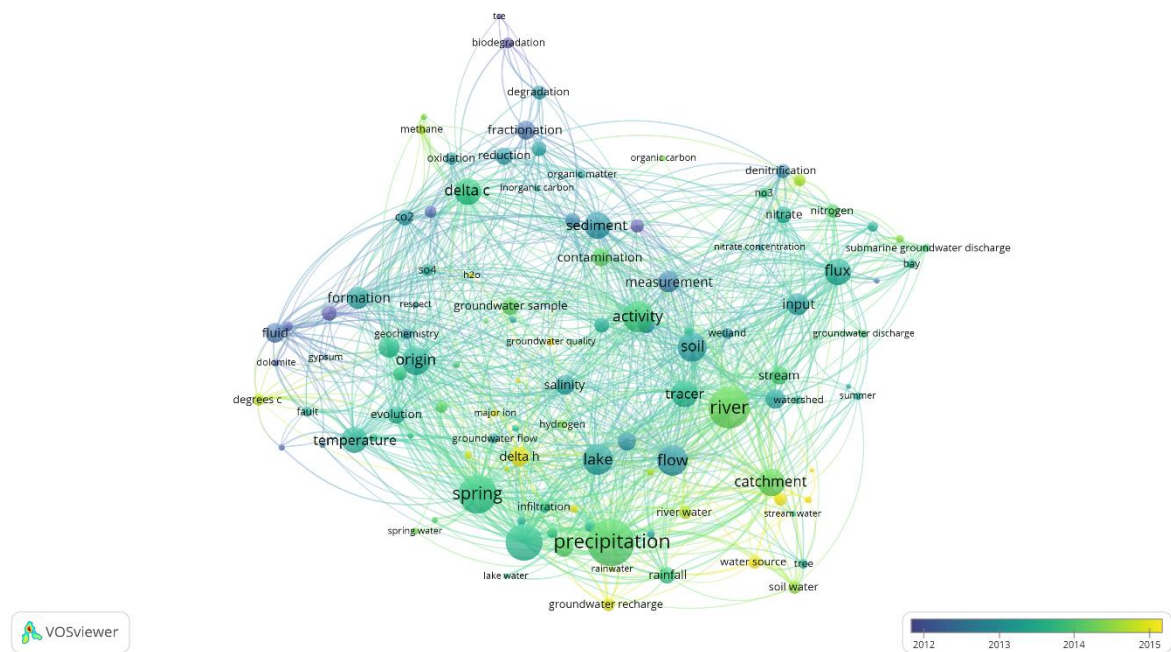


Figure 12: Co-occurrence of authors' keywords weighted by total link strength. 12A - Density Visualisation and division by clusters; 12B and 12C - Overlay Visualisation: the size of the circle is positively correlated with the number of keywords, the lines show the association between them and the colors indicate the temporal trend they appear. Generated by the VOSViewer tool 2021-11-26. A and B are networks from Scopus data and C is a network from WoS data.

Water is an abundant natural and essential resource. The water cycle shows how this resource is constantly moving between the Earth system, evaporating to the atmosphere and precipitating into the ocean and into different fresh water bodies, becoming available as surface water and groundwater. Freshwater availability and water quality are directly affected by climate, land use, local geology, and to the direct demands people place on them. This is a broad topic, encompassing the biophysical supply of water, the demand for water, and access to water. Environmental isotopes are used as indicators or tracers and their analysis makes it possible to investigate the origin, mobilization, residence time and recharge of groundwater. The advances in these techniques may be helpful to face the reality of the decrease in water availability for supply and further uses. The subjects presented in Figure 12C change a little from what were discussed before, from Scopus data, but they address what this paragraph is about with some keywords such as “temperature”, “activity”, “recharge”, “precipitation”, “river”, “spring”, “summer”, “winter”, “soil”, “contamination”, “catchment” etc.

Table 1 presents the eleven most cited articles in the world between the years 2000 and 2020, among them, 8 were published by American authors, 1 by a Lebanese

author, 1 by German authors, and 1 by South African authors. From the perspective of journals, 3 of them were published in "Nature", 2 in "Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA " and 2 in the "Journal of Hydrology", 1 in "Science", 1 in the "Journal of Contaminant Hydrology", 1 in "American Chemical Society" and 1 in "Hydrogeology Journal". As for the topics of each article, it is interesting to note the variability between subjects dealing with contamination of groundwater and surface water matrices, transit time modeling (storage information, flow paths and water source) in watersheds, to topics like denitrification, Karst groundwater as new resources and biodegradation.

Table 1: Top 11 most cited articles in the world between 2000 and 2020

Title	Journal	Year	Country	DOI	TC2020	TCper Year	NTC
A Bacterial Method for the Nitrogen Isotopic Analysis of Nitrate in Seawater and Freshwater	American Chemical Society	2001	USA	10.1021/ac010088e	1118	53.2	24.76
Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading	Nature	2008	USA	10.1038/nature06686	861	61.5	23.56
Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing	Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA	2011	USA	10.1073/pnas.1100682108	814	74.0	27.26
Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments	Nature	2000	USA	10.1038/35000537	678	30.8	13.13
A review and evaluation of catchment transit time modeling	Journal of Hydrology	2006	USA	10.1016/j.jhydrol.2006.04.020	550	34.4	12.66
Karst groundwater: a challenge for new resources	Hydrogeology Journal	2005	Lebanon	10.1007/s10040-004-0402-9	525	30.9	12.41
The salinity, temperature, and delta18O of the glacial deep ocean	Science	2002	USA	10.1126/science.1076252	500	25.0	10.13
The late Precambrian greening of the Earth	Nature	2009	USA	10.1038/nature08213	382	29.4	11.46
Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction	Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA	2013	USA	10.1073/pnas.1221635110	359	39.9	15.14
Stable isotope fractionation analysis as a tool to monitor biodegradation in contaminated aquifers	Journal of Contaminant Hydrology	2004	Germany	10.1016/j.jconhyd.2004.06.003	340	18.9	7.59
Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa	Journal of Hydrology	2001	South Africa	10.1016/S0022-1694(00)00370-X	326	15.5	7.80

TC = Total Citations

NTC = Normalized Total Citations

3.5. Overview of research in Brazil

The panorama of research in Brazil brings a still very young presence, since 2012/2013 and appearing globally in 2015/2016, in the advances of isotope studies in groundwater and the correlation among Brazilian authors is still very fragmented (Figure 15A), that is, the major research centers do not interact among themselves. In contrast, Brazilian authors have published extensively with international collaborators (Figure 13). The thickness of the lines demonstrates the strength of the links between the countries that publish with at least two countries. The most significant interactions with Brazilian research are with the United States, Canada, and the European Union. There are also important links with Argentina, Australia, New Zealand and Japan. It would be interesting to understand the reasons why Brazilian research does not collaborate significantly with the production of prominent rising continents such as Asian and African continents, especially with countries such as China and South Africa, for example.

Country Collaboration Map

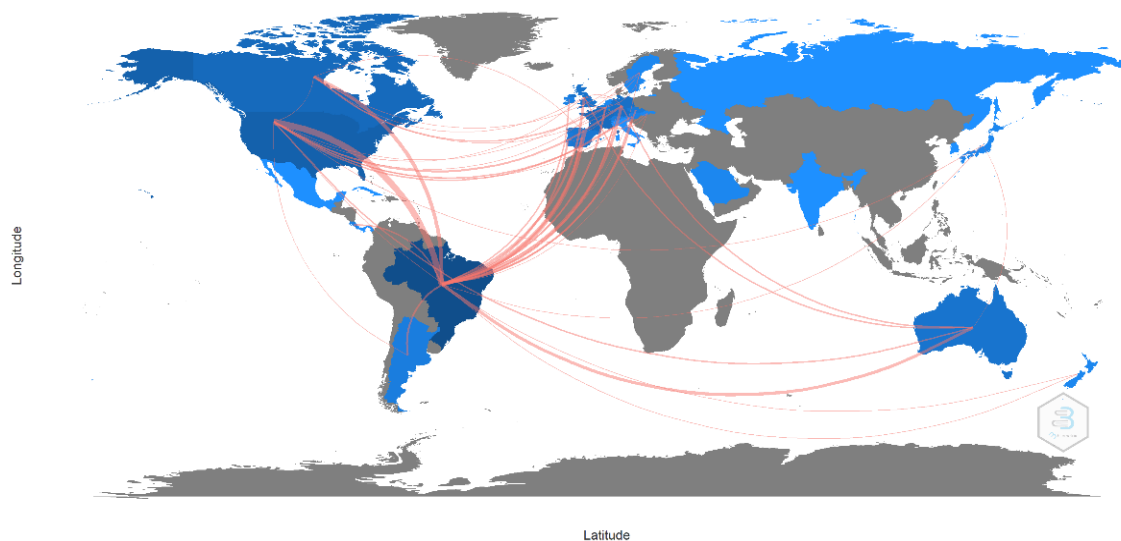


Figure 13: Global Collaboration Map focused on Brazilian publications between 2000 and 2020 (generated and visualized by the Biblioshiny-bibliometrix tool, 2021-08-20)

Of the 186 articles available, considering research for Brazil between 2000 and 2020 in the bibliometric reference bases, approximately 60% of the publications are by the major Brazilian affiliations, namely the Universidade de São Paulo (USP) and the Universidade Estadual de São Paulo (UNESP). Figure 14 demonstrates this relationship among the 10 most relevant Brazilian affiliations for this research area.

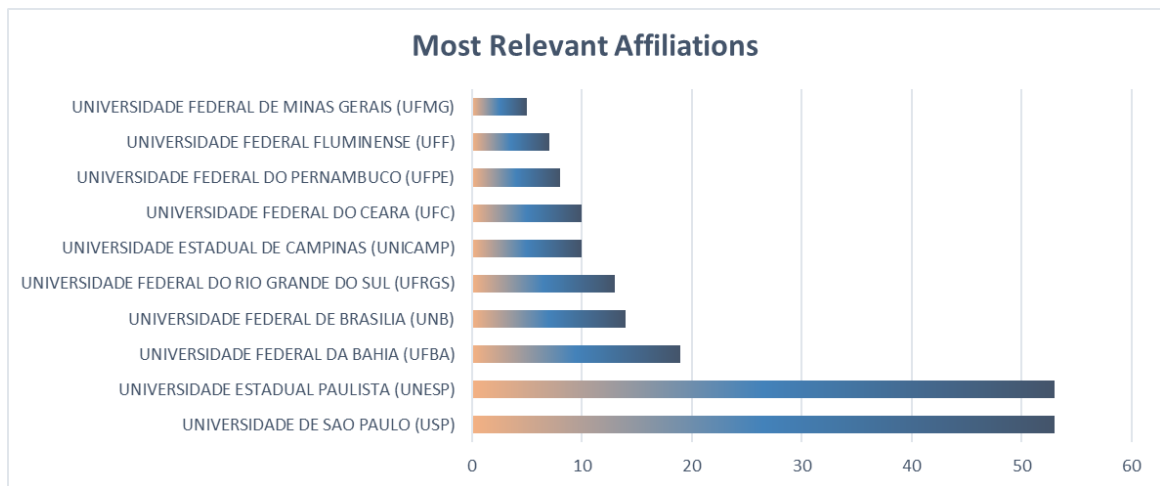
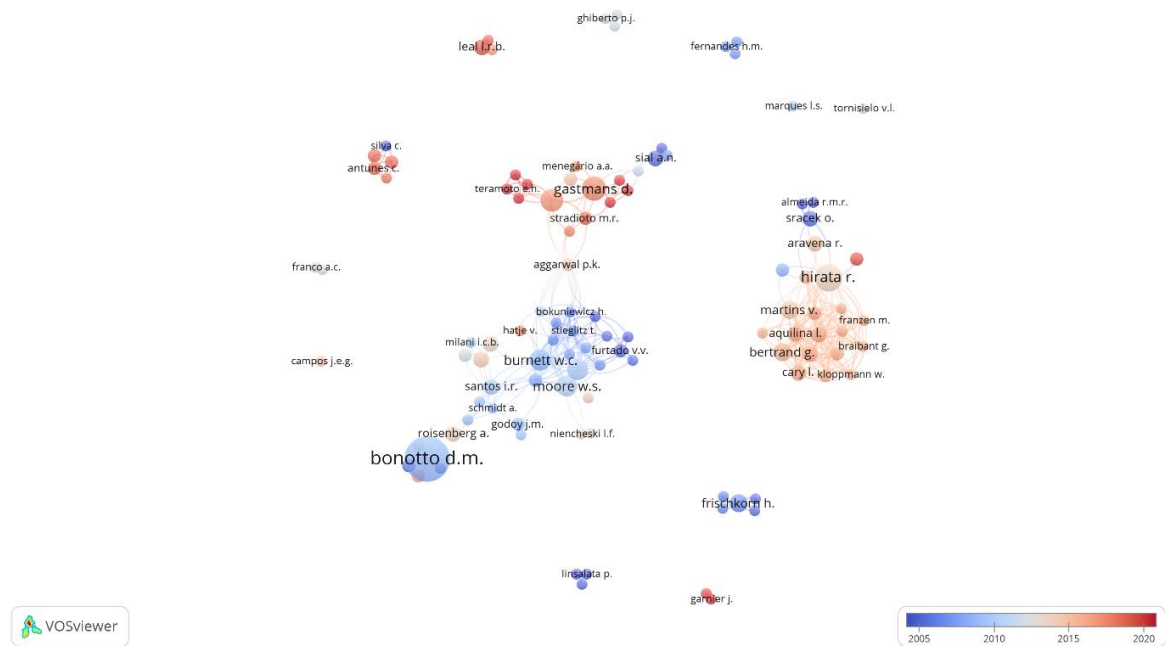


Figure 14: The 10 most relevant Brazilian affiliations for the publication of articles on the subject between the years 2000 and 2020. Generated in Excel 2021-08-20.

Figure 15A is composed of the collaboration among authors, which show only those who have published more than 2 articles and the isolated nodes have not been ignored, to show that such items represent some more recent research and publication groups. Highlighted by salmon to red colors are the authors who have produced the most recent articles, from 2015 to 2020. It is also important to note that there are two major research groups, one from the University of São Paulo (USP) and the other from the State University of São Paulo (UNESP), which seem to be unrelated. The size of the circle is positively correlated with the number of articles, so the most prominent authors in this Scopus analysis are: Bonotto D. M., Didier G. and Hirata R. Figure 13B, relies on the co-occurrence analysis of keywords and by the strength of link between them. There are 5 clusters well defined by colors: in green and with the highlighted items "uranium", "mobility", "Parana sedimentary basin", "activity concentration", "groundwater residence time"; in blue, "submarine groundwater discharge", "radon", "radium", "flux", "ocean" and "nutrient"; in purple, "depth", "oxygen", "plant", and "species"; in red, "dry season", "carbon-13", "deuterium"; and, in yellow, "guarani aquifer system", "groundwater flow", "calcite", "gas".

A



B

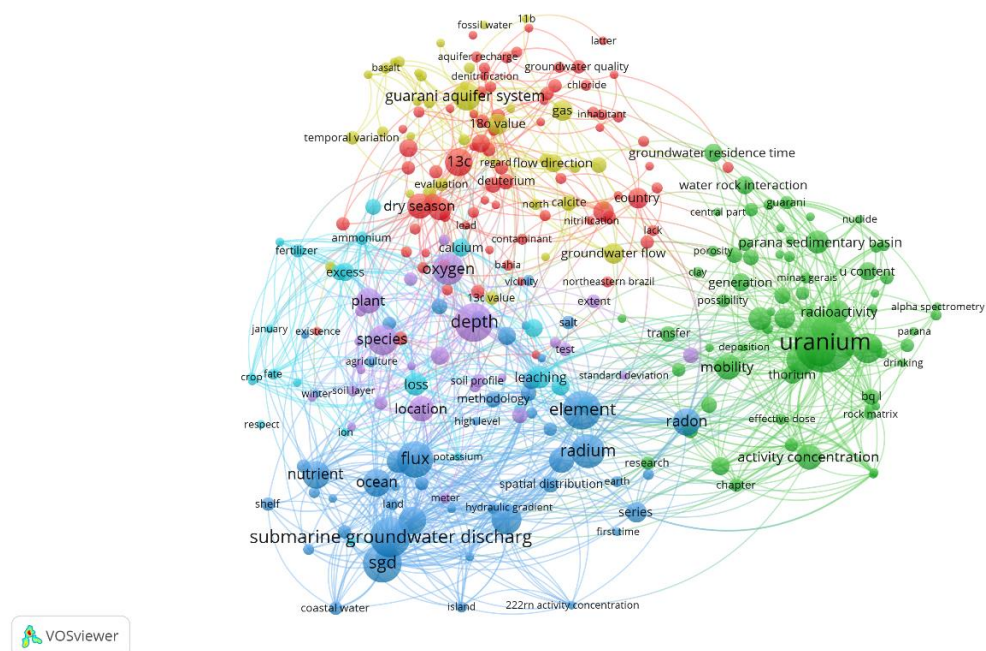


Figure 15: Figure 15A - Cluster-colors Visualisation and division by clusters Coauthorship network weighted by the average number of papers published (circle size is positively correlated with the number of papers, lines show coauthorship between authors and colors indicate the time that authors produced the most); Figure 15B - Cooccurrence of authors' keywords weighted by total link strength. Generated by the VOSViewer tool 2021-08-20.

The words described above are similar with the contents presented in Table 2, which lists the ten most cited Brazilian articles from 2000 to 2020. Among them, 5 were published in partnership with the United States, 2 in partnership with the Czech Republic, 1 in partnership with French authors, 1 with American and German authors, and only 1 article with Brazilian authors only. As for the variety of journals, we highlight

two publications in the "Journal of Hydrology", two in "Chemical Geology" and two in "Estuarine Coastal and Shelf Science". As for the themes, the articles deal with percolation of groundwater and surface water in cave environments and its implications for paleoclimate, the Guaraní aquifer system, multi-isotope analysis, salinization of groundwater in coastal environments, among others. There is also an important inter-subject variability in Brazilian research.

Table 2: Top 10 most cited articles among Brazilian publications from 2000 to 2020

Title	Journal	Year	Country	DOI	TC2020	TCperYear	NTC
Radon and radium isotopes as tracers of submarine groundwater discharge-Results from the Ubatuba, Brazil SGD assessment intercomparison	Estuarine Coastal and Shelf Science	2008	Brazil (USP) and USA	10.1016/j.ecss.2007.07.027	110	7,8571	4,4272
Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: Implications for paleoclimate inferences from speleothems	Chemical Geology	2005	Brazil (USP and UFPE) and USA	10.1016/j.chemgeo.2005.04.001	95	5,5882	3,8
Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna	Environmental and Experimental Botany	2012	Brazil (UNB) and USA	10.1016/j.envexpbot.2011.11.025	91	9,1	3,8889
Geochemical and stable isotopic evolution of the Guaraní Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil	Hydrogeology Journal	2002	Brazil (USP) and Czech Republic	10.1007/s10040-002-0222-8	86	4,3	1,3096
Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): A multi-isotope approach	Science of the Total Environment	2015	Brazil (USP and UFPE) and France	10.1016/j.scitotenv.2015.05.015	68	9,7143	3,0391
Tracing anthropogenically driven groundwater discharge into a coastal lagoon from southern Brazil	Journal of Hydrology	2008	Brazil (UFRGS), Germany and USA	10.1016/j.jhydrol.2008.02.010	65	4,6429	2,6161
Climate influence on geochemistry parameters of waters from Santana-Pérolas cave system, Brazil	Chemical Geology	2007	Brazil (USP) e USA	10.1016/j.chemgeo.2007.06.029	56	3,7333	3,3433
Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil	Journal of Environmental Radioactivity	2004	Brazil (UFF) and Czech Republic	10.1016/j.jenvrad.2003.10.006	52	2,8889	1,0783
Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guaraní aquifer, Brazil	Journal of Hydrology	2009	Brazil (UNESP)	10.1016/j.jhydrol.2005.09.007	41	2,5625	1,828
Determination of residence time and mixing processes of the Ubatuba, Brazil, inner shelf waters using natural Ra isotopes	Estuarine, Coastal and Shelf Science	2008	Brazil (IRD) and USA	10.1016/j.ecss.2007.07.042	41	2,9286	1,6502

TC = Total Citations

NTC = Normalized Total Citations

4. Conclusions

In this article, we provide a panorama-to-profile up-to-date report on the research trends topics of the use of environmental isotopes techniques applied to hydrogeology, based on a bibliometric analysis of publications in 2000 until 2020. Statistical results show a significant increase in global annual scientific production, highlighting this rise in the last five years, mainly the expressiveness and importance of the Chinese contribution on the theme. China contributed to nearly half of the increase in the last ten years. Publications in other developing countries have also increased rapidly. In South America, such as Chile, Peru, Colombia and Bolivia, giving a special glance to Brazil, there is a relevant but recent increase in the production of scientific articles in the study area from 2015. In the Asian continent, countries such as Turkey, Saudi Arabia, Iran, Oman and Pakistan, present a considerable evolution in the participation of global production. The African continent showed a significant influx of countries contributing to research on a global level since 2018. In addition, it is important to say that international research collaboration is increasing and new relationships resulting from growing capabilities in emerging economies. This analysis may be due to their increasing concerns of climate changes, water availability, water quality and water usage. The USA and China were the most productive and influential countries with the highest H-index and G-index, the most publications and the most cooperative countries. Whereas, the major Brazilians research centers do not interact with each other and Brazilian authors make numerous publications with international collaborators.

The use of isotopes in groundwater studies has presented research and development themes such as: 1) remediation of contaminated areas dominated by cultivation and agriculture, where contamination predominates in soil and shallow groundwater; 2) bioremediation processes to contain the progress of these contaminations in discharge areas and to degrade, transform, and/or remove contaminants from coastal environments matrices by the use of biological processes; 3) Tritium-based research has applied multi-tracer mixing models to quantify flow fractions derived from pre-event storage and to split the age distribution of flow into more components; 4) better understanding discharge conditions for maintaining river base flows, the connections with climate and the hydrological cycle, and recharge and storage conditions, such as estimation and modeling of transit time in watershed hydrology; 5) development of geochemical tools (e.g., radon and radium isotopes) to quantify the magnitude of SGD (submarine groundwater discharge) on a local to

regional scale, as Taniguchi et al. (2019) proposes to explore the great progress in SGD assessment methodologies with a focus on publications over the past decade.

5. REFERENCES

- Alabi, G. 1979, Bradford's law and its application, *International Library Review*, Volume 11, Issue 1, Pages 151-158, ISSN 0020-7837, [https://doi.org/10.1016/0020-7837\(79\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0020-7837(79)90044-X).
- Allaire, J.J., 2009, RStudio: Inc, RStudio, <https://www.rstudio.com/>.
- Aria, M. & Cuccurullo, C., 2017, Biblioshiny: Bibliometrix for no coders: Bibliometrix.org, <https://www.bibliometrix.org/biblioshiny/assets/player/KeynoteDHTMLPlayer.html#0> (accessed August 2021).
- Aria, M., and Cuccurullo, C., 2017, bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis: *Journal of Informetrics*, v. 11, p. 959–975, doi:10.1016/j.joi.2017.08.007.
- Broadus, R.N., 1987, Toward a definition of “bibliometrics”: *Scientometrics*, v. 12, p. 373–379, doi:10.1007/BF02016680.
- Clarivate, 2021, WEB OF SCIENCE® CORE COLLECTION (W of Science) Web of Science Core Collection: Web of Science, p. 1–4, <http://apps.webofknowledge.com/> (accessed April 2021).
- Cook, P.G., 2020, Introduction to Isotopes and Environmental Tracers as Indicators of Groundwater Flow: v. 1, 74 p.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters: *Science*, v. 133, doi:10.1126/science.133.3465.1702.
- van Eck, N.J., and Waltman, L., 2013, {VOSviewer} manual: Leiden: Univeriteit Leiden, http://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.1.pdf.
- Elsevier, 2020, Content Coverage Guide: , p. 1–24, https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0017/114533/Scopus_GlobalResearch_Factsheet2019_FINAL_WEB.pdf.
- Gleeson, T., Befus, K.M., Jasechko, S., Luijendijk, E., and Cardenas, M.B., 2016, The global volume and distribution of modern groundwater: *Nature Geoscience*, v. 9, p. 161–164, doi:10.1038/ngeo2590.
- Hirsch, J. E. (15 November 2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *PNAS* 102 (46): 16569–16572
- Harzing, A.W. (2007) Publish or Perish, Tutorial: <https://harzing.com/resources/publish-or-perish/tutorial/metrics/h-and-g-index> and available from <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- Jasechko, S., 2019, Global Isotope Hydrogeology—Review: *Reviews of Geophysics*, v. 57, p. 835–965, doi:10.1029/2018RG000627.
- National Science and Engineering Indicators, 2020, Publications Output: U.S. Trends and International Comparisons: nces.nsf.gov, <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20206/executive-summary> (accessed August 2021).
- Taniguchi, M., Dulai, H., Burnett, K.M., Santos, I.R., Sugimoto, R., Stieglitz, T., Kim, G., Moosdorf, N., and Burnett, W.C., 2019, Submarine Groundwater Discharge: Updates on Its Measurement Techniques, Geophysical Drivers, Magnitudes, and

Effects: *Frontiers in Environmental Science*, v. 7, doi:10.3389/fenvs.2019.00141.
White, Gilbert F.; Gleick, P.H., 1993, *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, p. Capítulo 2, 13-24, 1051-0761.

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Antes de entrar especificamente nas discussões sobre a análise, visualização e interpretação dos dados, vale destacar um importante ponto na etapa de coleta de dados que é o quanto as bases de dados são limitadas por possuírem um filtro de indexação de títulos de revistas muito restritivo, o que não propicia uma análise exaustiva sobre o tema. Portanto, é muito provável que existam muitas outras revistas espalhadas pelo mundo que abordam publicações sobre o tema, mas não estão indexadas. Não nos permitindo fazer uma análise 100% real. Há também subtemas que podem ser bastante regionalizados, e por isso a dificuldade de publicar em grandes revistas.

Durante a elaboração dos arquivos de trabalho em .csv para trabalhar com as ferramentas bibliométricas, enfrentou-se certa dificuldade na padronização das nomeações das colunas e das informações que cada fonte disponibiliza e como disponibiliza. Existem informações relevantes para geração correta dos mapas interativos, portanto fez-se necessário uma reorganização, pois os arquivos fontes da Scopus e WoS continham dados, por vezes, organizados de maneira distinta. Também foi proposta a utilização do banco de teses e dissertações da NDLT, porém não foi possível utilizar as informações extraídas do site.

Ainda assim, essa análise possibilitou observar algumas tendências interessantes como a expressiva participação e contribuição de países emergentes sobre o tema. Quanto maior a colaboração entre países aumenta-se as possibilidades de progredir em uma linha de pesquisa e identificar mudanças nas fronteiras dos temas. Há uma grande necessidade de mapear os corpos aquáticos subterrâneos e superficiais ao redor do mundo por meio de coletas de água e geofísica, por exemplo. Apesar das claras conexões entre as águas subterrâneas e superficiais ainda não há uma perfeita integração entre ambas. É preciso entender esse elo e essa interdependência. As medições de ^3H e ^{14}C permitiram, no passado, avançar nas medições da idade das águas subterrâneas, porém, com as novas técnicas analíticas que estão em ascensão, provavelmente ajudarão a continuar a mapear as

distribuições das idades das águas subterrâneas, como por exemplo, os próximos passos da análise de gases nobres dissolvidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabi, G. 1979, Bradford's law and its application, *International Library Review*, Volume 11, Issue 1, Pages 151-158, ISSN 0020-7837, [https://doi.org/10.1016/0020-7837\(79\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0020-7837(79)90044-X).
- Allaire, J.J., 2009, RStudio: Inc, RStudio, <https://www.rstudio.com/>.
- Aria, M., and Cuccurullo, C., 2017, bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis: *Journal of Informetrics*, v. 11, p. 959–975, doi:10.1016/j.joi.2017.08.007.
- Broadus, R.N., 1987, Toward a definition of “bibliometrics”: *Scientometrics*, v. 12, p. 373–379, doi:10.1007/BF02016680.
- Bartling, S., and Friesike, S., 2014, *Opening Science The Evolving Guide on How the Internet is Changing Research, Collaboration and Scholarly Publishing* (S. Bartling & S. Friesike, Eds.): Heidelberg, Germany, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 339 p., doi:10.1007/978-3-319-00026-8.
- Bautista-Puig, N., De Filippo, D., Mauleón, E., and Sanz-Casado, E., 2019, Scientific landscape of citizen science publications: Dynamics, content and presence in social media: *Publications*, v. 7, doi:10.3390/publications7010012.
- Clarivate, 2021, WEB OF SCIENCE® CORE COLLECTION (W of Science) Web of Science Core Collection: Web of Science, p. 1–4, <http://apps.webofknowledge.com/> (accessed April 2021).
- Clark, I.D., and Fritz, P., 1997, *Environmental Isotopes in Hydrogeology: Environmental Isotopes in Hydrogeology*, doi:10.1201/9781482242911.
- Cook, P.G., 2020, *Introduction to Isotopes and Environmental Tracers as Indicators of Groundwater Flow*: v. 1, 74 p.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters: *Science*, v. 133, doi:10.1126/science.133.3465.1702.
- Ding, Y., and Rousseau, R., 2014, Measuring Scholarly Impact: 35–55 p., doi:10.1007/978-3-319-62543-0_4.
- van Eck, N.J., and Waltman, L., 2013, {VOSviewer} manual: Leiden: Univeriteit Leiden, http://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.1.pdf.
- Elsevier, 2020, Content Coverage Guide: , p. 1–24, https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0017/114533/Scopus_GlobalResearch_Factsheet2019_FINAL_WEB.pdf.
- Gingras, Y., 2016, *Bibliometric and Research Evaluation Uses and Abuses*: Québec, Canadá, MIT Press, 119 p., doi:10.7710/2162-3309.2286.
- Gleeson, T., Befus, K.M., Jasechko, S., Luijendijk, E., and Cardenas, M.B., 2016, The global volume and distribution of modern groundwater: *Nature Geoscience*, v. 9, p. 161–164, doi:10.1038/ngeo2590.
- Gleick, P. H., 1993. *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Pacific Institute for Studies in Dev., Environment & Security. Stockholm Env. Institute, Oxford Univ. Press. Capítulo 2, p. 13-24, 1051-0761.
- Hirsch, J. E. (15 November 2005). An index to quantify an individual's scientific

- research output. PNAS 102 (46): 16569–16572
- Harzing, A.W. (2007) Publish or Perish, Tutorial: <https://harzing.com/resources/publish-or-perish/tutorial/metrics/h-and-g-index> and available from <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- Jasechko, S., 2019, Global Isotope Hydrogeology—Review: Reviews of Geophysics, v. 57, p. 835–965, doi:10.1029/2018RG000627.
- Mongeon, P., e Paul-Hus, A., 2016, The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis: Scientometrics, v. 106, p. 213–228, doi:10.1007/s11192-015-1765-5.
- National Science and Engineering Indicators, 2020, Publications Output: U.S. Trends and International Comparisons: [nces.nsf.gov](https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20206/executive-summary), <https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20206/executive-summary> (accessed August 2021).
- Thelwall, M. (2008). Bibliometrics to webometrics. Journal of Information Science, v. 34, n. 4, p.605 - 621. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0165551507087238>
- Vinkler, P., 1988, An attempt of surveying and classifying bibliometric indicators for scientometric purposes: Scientometrics, v. 13, p. 239–259, doi:10.1007/BF02019961.
- White, Gilbert F.; Gleick, P.H., 1993, Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources: , p. Capítulo 2, 13-24, 1051-0761.