

DETECÇÃO DE FLUXO INTERNO DE ÁGUA EM BARRAMENTOS DE TERRA E ENROCAMENTO COM POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP): REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Nicole Evelyn Carvalho de Oliveira^a

Luciano Soares da Cunha^a

Júlia Neves da Silva^b

10.51359/1980-8208/estudosgeologicos.v32n1p3-24

^aInstituto de Geociências, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

^bDepartamento de Geografia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

RESUMO

Com essa Revisão Sistemática de Literatura (RSL) foi possível identificar e avaliar as pesquisas mais relevantes com Potencial Espontâneo (SP) e seus avanços na detecção de fluxos preferenciais de água subterrânea em barragens de terra. De forma complementar foi identificado os parâmetros de aquisição, estratégias específicas na detecção de *pipping*, limitações e métodos complementares. Primeiro foi elaborado um protocolo de pesquisa, em que são definidas a questão principal, palavras chaves, critérios de inclusão e exclusão. Após a busca na base dados foram extraídas as informações de interesse e elaboradas as tabelas-síntese e gráficos metanalítico. Foram obtidos 266 artigos das bases de dados e 31 artigos após utilizar os critérios de inclusão e exclusão. Com a sumarização das principais informações extraídas dos artigos selecionados foram elaboradas duas tabelas-síntese com dados de pesquisas com o SP e a outra com os dados de pesquisas com integração de SP com algum método geofísico complementar. Nestas tabelas foram selecionados parâmetros considerados fundamentais e que deveriam estar explícitos nos artigos. Assim, foi possível realizar uma análise das características de aquisição, estrutura e técnicas geofísicas complementares e direcionamento das linhas de pesquisas. Com isso, a técnica de revisão de literatura representou grande potencial para a sistematização metodológica visando a melhoria da qualidade das pesquisas de SP aplicado em pesquisas de detecção de fluxos preferenciais em barragens de terra e enrocamento.

Palavras-chave: Erosão Interna, Potencial Espontâneo, Barragem, Fluxos Preferenciais.

ABSTRACT

With this Systematic Literature Review (SLR) it was possible to identify and evaluate the most relevant research with Spontaneous Potential (SP) and its advances in the detection of preferential groundwater flow in earth dams. Complementarily the acquisition parameters, specific strategies in pipping detection, limitations, and complementary methods were identified. First, a search protocol was developed, in which the main question, keywords, inclusion, and exclusion criteria were defined. After the database search, the information of interest was extracted and the summary tables and meta-analytic charts were prepared. We obtained 266 articles from the databases and 31 articles after using the inclusion and exclusion criteria. With the summarization of the main information extracted from the selected articles, two summary tables were prepared with data from research with SP and the other with data from research with the integration of SP with some complementary geophysical method. In these tables parameters considered fundamental and that should be explicit in the articles were selected. Thus, it was possible to perform an analysis of the characteristics of acquisition, structure, and complementary geophysical techniques and the

direction of the lines of research. Thus, the literature review technique represented the great potential for methodological systematization aimed at improving the quality of SP research applied to surveys of preferential flow detection in earth and rockfill dams.

Keywords: Internal Erosion, Spontaneous Potential, Dam, Preferential Flows.

INTRODUÇÃO

A pesquisa por buscas de erosões internas e/ou pipping associadas à utilização do método geofísico, Potencial Espontâneo (SP), avança em várias áreas das ciências sendo incorporada em diferentes linhas de pesquisa como detecção de fluxos preferenciais em barragens (Hu et al., 2020; Ahmed et al., 2020; Pratap, 2020; Lu et al., 2020; Walid, 2019; Ahmed et al., 2019; Nwokebuihe et al., 2017; Wang et al., 2018; Giampaolo et al., 2016; Lee & Kim, 2015; Rittgers et al., 2015; Ikard et al., 2015; Ikard & Revil, 2014; Ikard et al., 2014; Kang et al., 2014; Ikard et al., 2012; Bolève et al., 2012; Thompson et al., 2012; Minsley et al., 2011; Moore et al., 2011; Bolève et al., 2011; Bolève et al., 2009; Rozycki, 2009; Rozycki et al., 2006; Panthulu et al., 2001; Al-Saigh et al., 1994), experimentos em campo e laboratoriais (Hu et al., 2020; Ahmed et al., 2020; Pratap, 2020; Lu et al., 2020; Gallas, 2020; Ahmed et al., 2019; Walid, 2019; Wang et al., 2017; Nwokebuihe et al., 2017; Giampaolo et al., 2016; Ikard et al., 2015; Rittgers et al., 2015; Lee & Kim, 2015; Ikard et al., 2014; Ikard & Revil, 2014; Kang et al., 2014; Bolève et al., 2012; Ikard et al., 2012; Thompson et al., 2012; Minsley et al., 2011; Moore et al., 2011; Bolève et al., 2011; Bolève et al., 2009; Rozycki, 2009; Sheffer & Oldenburg, 2007; Rozycki et al., 2006; Rizzo et al., 2000; Panthulu et al., 2001; Al-Saigh et al., 1994), dados sintéticos (Ahmed et al., 2020; Ahmed et al., 2019; Rozycki, 2009; Bolève et al., 2009; Sheffer & Oldenburg, 2007), modelagem matemática (Ahmed et al., 2020; Rittgers et al., 2015; Minsley et al., 2011; Bolève et al., 2011; Rozycki, 2009; Rozycki et al., 2006; Panthulu et al., 2001;

Sheffer & Oldenburg, 2007; Rizzo et al., 2000), erosão interna (Gallas, 2020; Rittgers et al., 2015) e uso combinados com outros métodos geofísicos (Ahmed et al., 2020; Pratap, 2020; Lu et al., 2020; Walid, 2019; Gallas, 2020; Ahmed et al., 2019; Nwokebuihe et al., 2017; Giampaolo et al., 2016; Ikard et al., 2015; Rittgers et al., 2015; Ikard et al., 2014; Bolève et al., 2012; Thompson et al., 2012; Minsley et al., 2011; Moore et al., 2011; Bolève et al., 2011; Bolève et al., 2009; Rozycki, 2009; Rozycki et al., 2006; Panthulu et al., 2001). Essas pesquisas utilizando o SP são relativamente recentes e coincidentes com um maior e melhor desenvolvimento de equipamentos com maior impedância e com o aumento de acidentes com barragens de diversos tipos. A crescente demanda por desenvolvimento científico sobre o tema pôde ser observada pelo aumento de 120% no número de publicação de artigos científicos durante a última década em comparação com a 1ª década deste século.

Esse aumento substancial proporciona uma oportunidade e necessidade para a realização de uma revisão sistemática na literatura, pois, permite tanto identificar a evolução do conhecimento científico quanto avaliar outros aspectos relacionados à temática. Além disso, permite maior conhecimento sobre a organização estrutural dos grupos de pesquisa, artigos de referência e tendência das linhas de pesquisa que estão se consolidando.

O presente trabalho teve como objetivo principal realizar uma revisão sistemática a respeito da evolução do Potencial Espontâneo (SP) na detecção preferencial do fluxo de água subterrânea em barragens de terra e enrocamento. E como objetivos complementares,

identificar as características comuns dessas pesquisas na detecção de *pipping*, erosão interna, infiltrações e no monitoramento desses barramentos. Além disso, melhorar na identificação das limitações do uso do SP e quais métodos geofísicos complementares têm apresentado significativas contribuições nessas pesquisas.

REVISÃO SISTEMÁTICA E METANÁLISE

A revisão na literatura é uma atividade essencial no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e científicos, evitando a duplicação, reaproveitamento e/ou aplicação de pesquisas em diferentes escalas e contextos (Galvão & Ricarte, 2020).

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é uma técnica de investigação científica com objetivo de reunir, avaliar e conduzir uma síntese dos resultados de múltiplos estudos primários de um determinado assunto (Benefield, 2003). Permite, por meio de uma área do conhecimento, identificar, avaliar e interpretar os estudos mais relevantes em uma temática com a produção de uma síntese crítica das principais evidências, evolução, e ainda, acentuando temáticas negligenciadas que podem indicar futuras sugestões de temas no processo de tomada de decisão para novas pesquisas. As revisões sistemáticas da literatura concentram a identificação de pesquisas anteriores, avaliando os resultados de forma sistemática e com recursos estatísticos por meio de síntese. Tem como principais características possuir um conjunto de objetivos claramente pré-definidos, critérios de elegibilidade pré-definidos, ser explícita e reprodutível e reduzir a margem de tendência na condução de uma revisão de literatura, muito comum em revisões que não seguem essa sistemática (Petticrew & Roberts, 2006). Quando a revisão sistemática apresenta uma análise

estatística com o objetivo de integrar os resultados, é denominada metanálise ou enfoque metanalítico (Mariano & Santos, 2017).

A RSL compreende três etapas de desenvolvimento (Planejamento, Execução e Documentação). O Planejamento tem início com a definição do protocolo que por sua vez, especifica todos os passos do método que serão seguidos. A definição da questão principal e demais parâmetros orientadores da revisão, neste momento, garante com antecedência que os métodos empregados serão padronizados e com redução do risco de viés (Centre for Reviews and Dissemination, 2009). A Execução compreende objetivamente o cumprimento do protocolo por completo onde inicia-se pelo acesso às bases de dados com a utilização das palavras-chaves em processos de buscas avançadas por meio de *strings*. A Documentação apresenta o produto da revisão que deve possuir um conjunto mínimo de itens (*Checklist*) compondo o documento final de relatório (Prisma, 2015).

As etapas envolvidas são baseadas em pesquisas por evidências tendo como principais etapas (The Joanna Briggs Institute, 2014.) (Figura 01): (i) Elaboração do Protocolo da revisão que contém a formulação da Questão Principal, Palavras-Chaves, Critérios de Inclusão/Exclusão e Seleção da Bases de Dados; (ii) Busca dos estudos primários (artigos) nas Bases de Dados; (iii) Seleção dos estudos primários (baseados nos critérios de inclusão/exclusão); (iv) Extração de dados usando uma ficha-síntese elaborada paralelamente ao protocolo; (v) Análise e Síntese dos dados extraídos focados na formulação da resposta para a Questão Principal; (vi) Sugestão temática para novas pesquisas.

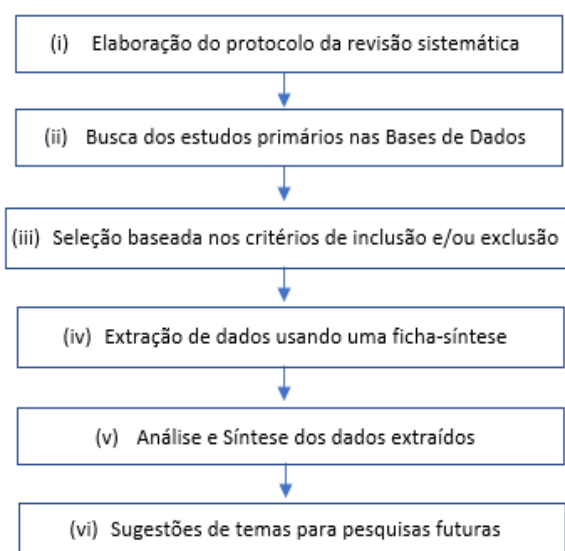


Figura 01 – Descrição das etapas gerais envolvidas no desenvolvimento de uma Revisão Sistemática de Literatura: (i) Elaboração do Protocolo. (ii) Busca nas Bases de Dados (iii) Seleção dos estudos primários. (iv) Auditoria realizada por revisores. (v) Extração de dados. (vi) Análise e Síntese. (vii) Sugestão temática para novas pesquisas.

I - Elaboração do Protocolo

O Protocolo será o documento orientador da Revisão Sistemática que contém a Questão Principal formulada, Palavras-Chaves, Critérios de Inclusão/Exclusão e Seleção da Bases de Dados. Após a definição da questão principal, a definição das palavras-chaves é uma consequência, mas, na revisão sistemática é importante a definição de combinação de palavras-chaves ou expressão de palavras com o uso de operadores booleanos (AND, OR, etc.) para serem utilizados nas buscas avançadas das bases de dados selecionadas. É necessário definir estratégias de busca por meio dos delimitadores: período, espaço geográfico, tipo de documento, etc. A definição dos critérios de inclusão ou exclusão dos artigos serão utilizado(s) pelo(s) revisores internos, normalmente, um membro da equipe, para auditar os documentos identificados nas bases de

dados e avaliar sua afinidade com o tema da revisão sistemática. Os critérios de inclusão/exclusão tornam-se um filtro efetivo para evitar a tendência de inclusão excessiva e desnecessária de artigos de áreas afins e ao mesmo tempo não pertinentes à pesquisa em questão. Permite que a abrangência do assunto a ser estudado determine o procedimento de amostragem, ou seja, quanto mais amplo for o objetivo da revisão, mais seletivo o revisor deverá ser quanto à inclusão da literatura a ser considerada (Prisma, 2015). A omissão do procedimento de amostragem pode ser a maior ameaça na validade da revisão. Esse procedimento de inclusão e exclusão de artigos deve ser conduzido de maneira criteriosa e transparente, uma vez que a representatividade da amostra é um indicador da profundidade, qualidade e confiabilidade das conclusões finais da revisão.

O ideal seria a inclusão de todos os artigos encontrados, ou até mesmo a aplicação de uma seleção aleatória. Quando isso não é possível, o revisor deve deixar claro quais são os critérios de inclusão e exclusão adotados para a elaboração da revisão (Mendes et al., 2008). A seleção das bases de dados a ser utilizada está intrinsecamente relacionada às grandes áreas de conhecimento que a pesquisa está inserida. A recomendação geral é selecionar no mínimo duas, sendo mais coerente com a sistemática de uma revisão dessa natureza selecionar todas as bases de dados na grande área de conhecimento da pesquisa em questão.

II - Busca nas Bases de Dados

O processo de seleção dos artigos é feito nas bases com a utilização das palavras-chaves em processos de buscas avançadas por meio de *strings*, compreendendo uma triagem inicial a partir do título, palavra-chave e resumo.

III - Seleção dos estudos primários

Após a busca nas bases de dados é realizada a seleção dos estudos primários por meio de uma auditoria realizada pelo revisor interno. Utilizando os critérios de inclusão/exclusão é realizada uma seleção dos artigos que serão lidos na íntegra para a extração das informações previstas na ficha-síntese, elaborada paralelamente à criação do protocolo.

IV - Extração de dados

Esta etapa consiste na definição das informações a serem extraídas dos estudos selecionados, utilizando um instrumento para reunir e sintetizar as informações-chave (Mendes et al., 2008). O nível de evidência dos estudos deve ser avaliado a fim de determinar a confiança no uso de seus resultados e fortalecer as conclusões que irão gerar o estado do conhecimento atual do tema investigado (Beck CT, 2006). É análoga à etapa de coleta de dados de uma pesquisa convencional (Mendes et al., 2008). O objetivo aqui é organizar e sumarizar as informações de maneira concisa, formando um banco de dados de fácil acesso e manejo. Assim, é elaborada uma ficha-síntese específica para cada pesquisa em que contenha campos cujas informações contemplem: amostra do estudo, tipo de estudo (experimento em campo, laboratório etc.), os objetivos, materiais, métodos, resultados e as principais conclusões de cada estudo.

V - Análise e Síntese dos dados extraídos

De posse das informações extraídas, a etapa de análise dos dados quando não envolve a metanálise é comum a qualquer tipo de pesquisa onde os dados são processados tendo em foco a questão principal fundamentada.

A revisão sistemática inicia-se pela visualização dos dados (informações) por meio de tabelas que sintetizam quais parâmetros são comuns na maioria dos

estudos primários, quais as características observadas em cada estudo, processamentos utilizados, resultados obtidos e principais conclusões alcançadas. Essa análise deve ser realizada de forma crítica, procurando explicações para os resultados diferentes ou conflitantes nos diferentes estudos (Mendes et al., 2008). Nesta etapa, a aplicação de análises estatísticas (metanálise) é uma abordagem que vem se consolidando devido à possibilidade da realização de uma análise de coautoria que é um indicativo das redes de pesquisadores existentes ou em formação, a análise de co-citação caracterizada por uma métrica de análise de artigos que frequentemente são citados juntos e o acoplamento bibliográfico que é um indicativo das temáticas que estão relacionadas a futuras pesquisas (Mariano & Santos, 2017).

VI - Sugestão temática para novas pesquisas

Esta etapa corresponde à fase de discussão dos principais resultados na pesquisa convencional. Devido à ampla revisão conduzida, é possível identificar fatores que afetam os estudos primários identificados, podendo ser realizada uma avaliação crítica com a comparação do conhecimento teórico, a identificação de conclusões e implicações resultantes da revisão integrativa.

Para obter uma visão geral da literatura por meio da metanálise sobre o tema, a nível de publicação, primeiro avalia-se a relação das publicações (Rodrigues et al., 2014). Isso é realizado com base nas relações de citação direta e indireta entre as publicações. Duas publicações têm uma relação de citação direta se uma publicação cita a outra e isto pode ser utilizado para avaliar as relações de coautoria com a unidade de pesquisa pode ser, por exemplo, artigos ou instituições de pesquisa. A citação indireta, se ambas citam a mesma

publicação, o denominado acoplamento bibliográfico. Quando analisado por conjunto de 03 a 05 anos mais recentes apresenta uma tendência das linhas de pesquisas a serem consolidadas nos próximos anos dentro daquela temática (Mariano & Santos, 2017). Já quando ambas são citadas pela mesma publicação (cocitação) são apresentadas as principais referências bibliográficas até o momento sobre determinado tema.

A identificação de novas temáticas para futuras pesquisas será complementada com todo o conjunto de produtos obtidos pela análise meta-analítica da coautoria, cocitação (autores e documentos) e acoplamento bibliográfico, além das lacunas temáticas identificadas na análise dos dados das tabelas-síntese. As análises de coautoria e cocitação permitem conhecer a estrutura da rede de pesquisadores existente atualmente e núcleos de produção de pesquisa e referências bibliográficas fundamentais. O acoplamento bibliográfico é uma técnica para medir a similaridade de duas fontes de documentos utilizando-se da contagem do número de referências bibliográficas comuns (Cardoso & Silva, et al., 2013; Kessler, 1963). Na análise de cocitação, tanto de documentos quanto de autores, as técnicas utilizadas são as mesmas, o

que muda é a unidade de análise ou de contagem (Cardoso & Silva, et al., 2013).

A Análise de Cocitação de Autores (ACA) é baseada na suposição de que a cocitação é uma medida da percepção de semelhança, ligação conceitual ou relação cognitiva entre dois itens cocitados (documentos ou autores) (Cardoso & Silva, et al., 2013). Nesta técnica, uma matriz compilada desse parâmetro é normalizada para uma medida de similaridade, assim, pode-se realizar as análises de núcleos (*cluster*) e de escala multidimensional (Cardoso & Silva, et al., 2013). A ACA seleciona apenas os autores que possuem um elevado grau de interconexão com outros pesquisadores.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para essa pesquisa foi utilizado o software StArt (State of the Art) – Figura 02, versão 3.3 beta 03 (Lapes/UFScar). Apesar de opções com interfaces aparentemente mais amigáveis e com perspectiva de possuir mais ferramentas, optou-se pelo apoio e fortalecimento do uso de um software nacional, desenvolvido em uma Universidade Federal.

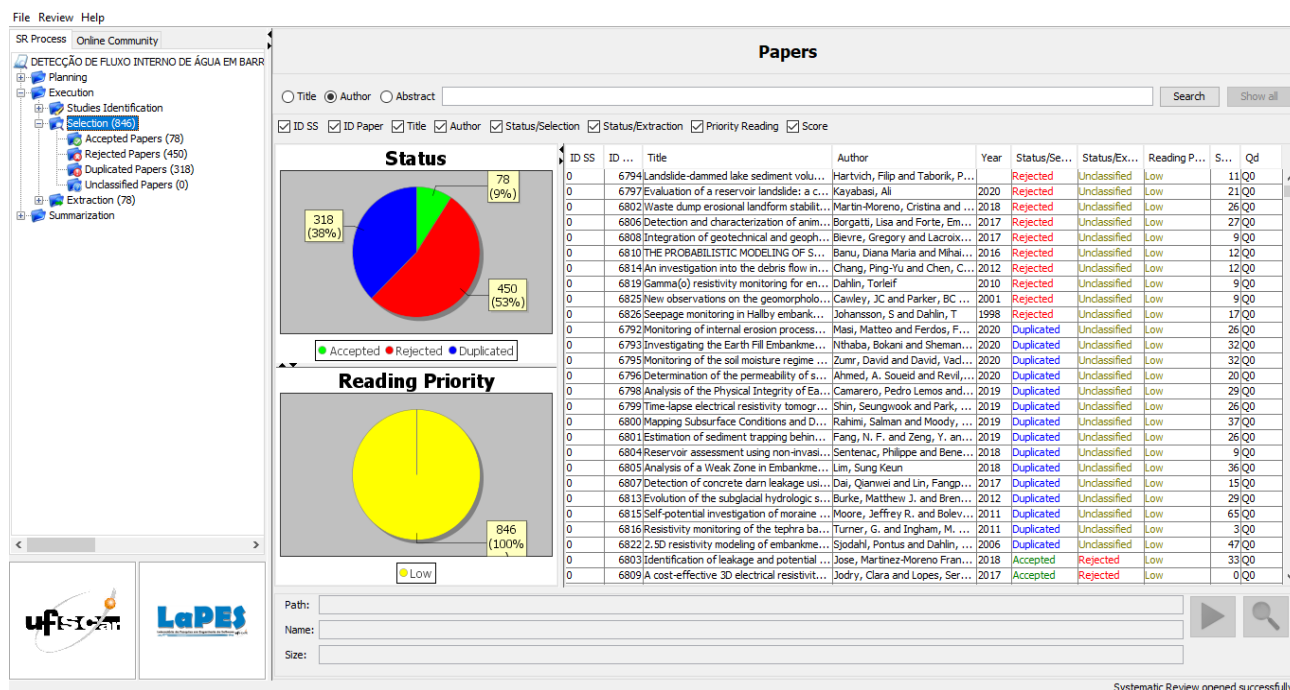


Figura 02 -Interface do StArt ressaltando a segunda etapa (Execução) no processo de visualização gráfica das porcentagens de artigos que foram selecionados após o processo de triagem utilizando os critérios de inclusão/exclusão, além dos percentuais de artigos excluídos e repetidos (duplicados).

Os passos executados nesta pesquisa foram os mesmos passos realizados seguidos no StArt, em que iniciam-se pela (i) definição do protocolo de pesquisa; (ii) importar os dados dos artigos obtidos nas bases de dados; (iii) seleção dos artigos; (iv) classificação dos artigos a serem lidos na íntegra; (v) sumarização por meio de gráficos com ênfase estatística dos resultados.

Protocolo de pesquisa

Neste tópico define-se a questão principal da revisão sistemática, palavras-chave utilizadas, bases de dados e os critérios de inclusão/exclusão para a seleção e classificação dos artigos (Quadro 1).

A questão principal foi: O método geofísico do Potencial Espontâneo (SP) é eficiente na detecção preferencial do fluxo de água subterrânea em barragens de terra e enrocamento?

Posteriormente, as palavras-chave foram definidas pelo grupo de

pesquisadores e estruturadas na *string* [(SP OR self potential) AND seepage AND dam; (SP OR self potential) AND erosion AND dam]. Após essa definição, as bases de dados foram incorporadas a partir de uma análise prévia de alguns artigos que abordam a temática de forma menos sistematizada em bases menos restritivas como o Google Acadêmico.

A definição de critérios de inclusão (Quadro 01) teve como objetivo orientar a pesquisa, selecionando os artigos em função dos resultados pretendidos e da principal questão formulada. Além dos critérios de inclusão foram selecionados artigos publicados em língua inglesa no período de 1990-2020.

As buscas foram realizadas nas Bases de Dados: Scopus, Science Direct e Web of Science, considerando a combinação de palavras-chave e os delimitadores orientadores que funcionam como um primeiro processo de filtragem da busca (Quadro 01).

Quadro 01 - Parâmetros do Protocolo definidos para a pesquisa.

Parâmetros aplicados à Revisão Sistemática	
Membros do Grupo de Pesquisa	Revisora A e Revisor B
Tipo de Pesquisa	Estudos em campo e em laboratório.
Palavras-Chave estrutura em <i>string</i>	(SP OR self-potential) AND seepage AND dam (SP OR self-potential) AND erosion AND dam
Base de Dados	Science Direct Scopus Web of Science
Delimitadores	Ano de publicação: 1990 a 2020. Tipo de publicação: Apenas artigos disponíveis <i>online</i> . Idioma: Inglês. Área da pesquisa: sem restrição.
CrITÉRIOS de Inclusão (I)/ Exclusão (E)	(E) Serão excluídos trabalhos somente acerca de tomografia elétrica em barragens. (E) Serão excluídos os trabalhos que não façam uso de SP. (E) Serão excluídos trabalhos que não utilizem SP nas pesquisas geofísicas de barragem e enrocamento. (E) Serão excluídos trabalhos que não apresentem resumo/abstract. (I) Serão incluídos trabalhos publicados e disponíveis integralmente nas bases científicas buscadas. (I) Serão incluídos trabalhos que utilizem SP em pesquisas geofísicas em barragens de terra e enrocamento. (I) Serão incluídos trabalhos sobre barragens. (I) Serão incluídos trabalhos sobre erosão interna.

Como resultado das buscas, obteve-se um total de 266 artigos: 100 na Science Direct, 82 no Scopus e 84 na Web of Science. Para cada base de dados, as buscas contendo o registro do título, abstract e palavras-chave foram exportadas em formato “.bibtext” e importadas no StArt 3.0.3.

A seleção dos artigos ocorreu em duas etapas realizadas pelos dois revisores envolvidos. A Revisora A faz a seleção por meio da leitura do título, do abstract e das palavras-chave e com a utilização dos critérios de inclusão/exclusão classificando-os em aceitos ou rejeitados. Os artigos duplicados/repetidos são classificados automaticamente e referem-se aos artigos

que aparecem duplicados em uma mesma base de dados devido às diferentes referências do mesmo artigo ou artigos repetidos que aparecem em diferentes bases de dados. Coube ao Revisor B o procedimento de revisar/auditar a seleção realizada pela Revisora A de forma a evitar tendência ou equívocos na seleção e exclusão dos artigos. Sabe-se que, devido às diferentes experiências dos revisores, esta etapa é de suma importância, pois dessa forma os procedimentos irão conter uma menor quantidade de erros, visto que, as seleções dos revisores envolvidos são distintas.

Como resultado dessa etapa, 119 artigos foram rejeitados e 118 estavam

duplicados, resultando assim em 29 artigos aceitos para a etapa posterior. Os rejeitados compõem-se de artigos que não se tratam sobre o SP (seja como método primário ou secundário) e pesquisas com SP tratando-se inversões de dados sem aquisição de novos dados de SP em condições reais ou de laboratório. A etapa de extração das informações dos artigos ocorreu com a busca dos textos completos pelo acesso a Comunidade Acadêmica Federada (CAFE) via Portal CAPES/MEC (BRASIL-RNP, Acesso em: 16 jun. 2021).

Para efeito de organização na extração dos dados, os artigos foram divididos em 02 Grupos Temáticos: Método de Potencial Espontâneo (SP) como método único de investigação (13) e método de Potencial Espontâneo (SP) com outros métodos geofísicos associados (18). Essa divisão teve o objetivo de permitir a elaboração de uma ficha-síntese de extração específica para cada grupo. Posteriormente, foi criada uma tabela-síntese para cada grupo temático que permitisse sintetizar as principais informações extraídas de cada grupo.

RESULTADOS

A análise de coautorias foi realizada com as publicações utilizando a força total de ligação (total link strength) como unidade de quantificação. Essa relação reflete como estão estruturadas as redes de pesquisadores quando

considerada no mínimo 02 documentos por autor e no mínimo 01 citação da publicação para o período de 1990-2020. Nesta forma gráfica o tamanho do símbolo reflete o número de publicações.

A intensidade das relações está refletida na proximidade entre os centros dos núcleos (círculos). Entre os diversos núcleos (*clusters*) identificados, 01 apresentou-se mais estruturado e centrado no autor Revil, A (Figura 03). As relações entre eles são computadas como as mais fortes considerando o número de citações e a média normalizada de citações como peso e o *score*, respectivamente, utilizados na determinação da intensidade entre as relações de coautorias. A Figura 04 ressalta a composição do Núcleo 1 (*Cluster*) composto por 10 pesquisadores de diferentes instituições e centrado no pesquisador com mais coautoria dentro do núcleo quando a temática é a pesquisa com detecção de fluxos preferenciais de água subterrânea com o método SP em barramentos (Quadro 02).

As relações de associação e intensidade de coautoria podem ser avaliadas considerando os institutos de pesquisas como a unidade de análise, mas aqui não será apresentado o gráfico correspondente. As informações extraídas desses produtos foram acrescidas no Quadro 02 onde observa-se que os núcleos de pesquisadores estão muito concentrados em instituições da França com a presença minoritária de instituições da América do Norte e do Sul.

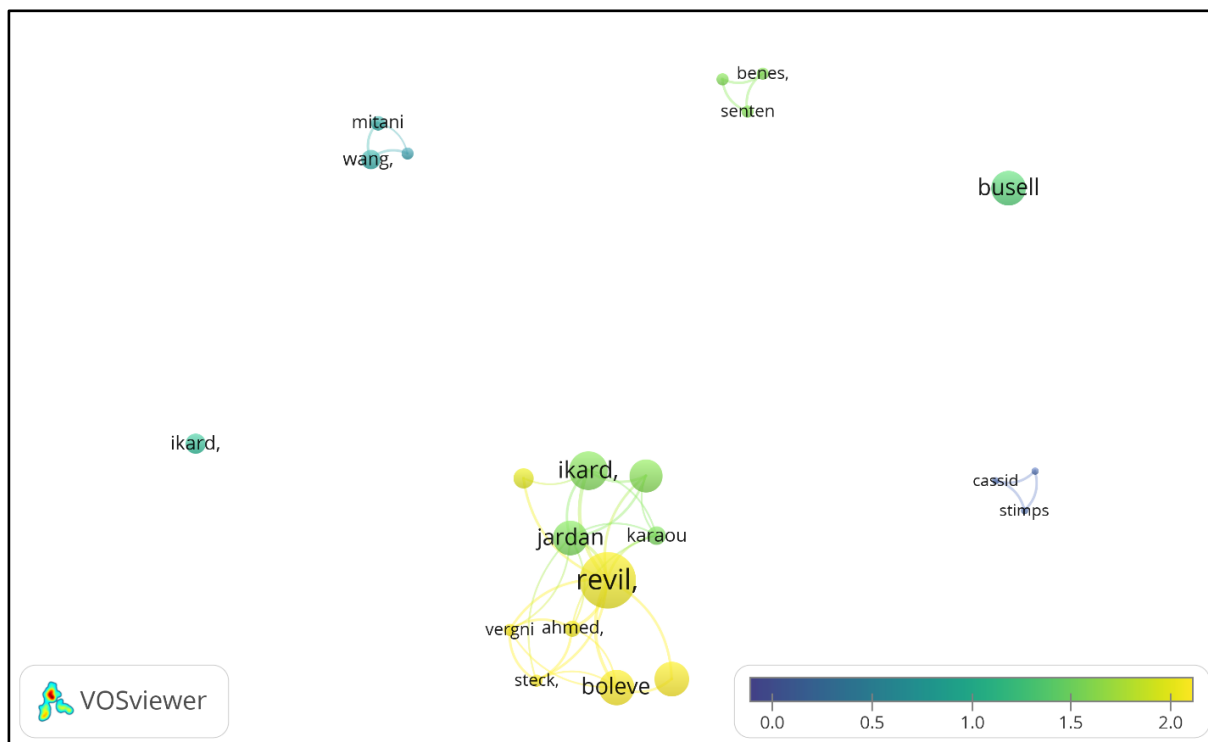


Figura 03 - Mapa de rede de coautorias entre autores dos artigos selecionados para o período de 1990-2020, com o número de citações e a média normalizada de citações como peso e o score, respectivamente, utilizados na determinação da intensidade entre as relações de coautorias. pelo elaborado no Voxviewer (Van Eck & Waltman, 2010). A escala que aparece na figura refere-se ao score da média normalizada de citações.

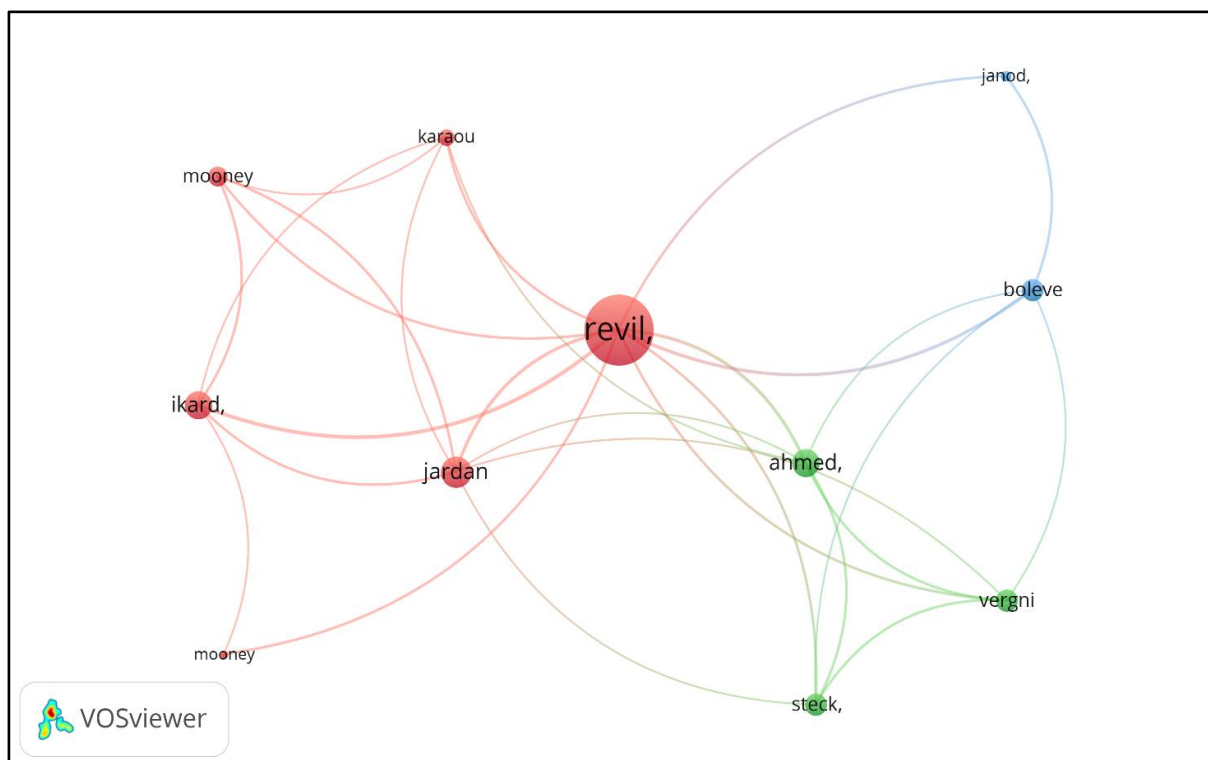


Figura 04 - A rede de coautoria mais estruturada está centrada no pesquisador com coautoria sobre o tema objeto desta RSL. As cores definem os clusters internos de pesquisadores dentro da rede mais estruturada de coautoria

Quadro 02 – Identificação dos núcleos de pesquisadores (clusters) associados em relação à coautoria.

Cluster	Pesquisador	Instituição	País
1	Revil, A.	Université Grenoble Alpes	França
1	Ikard, S.J.	Colorado School of Mines	EUA
1	Jardani, A.	Université de Rouen	França
1	Karaoulis, M.	Universidad Nacional de Colômbia	Colômbia
1	Mooney, M.A.	Colorado School of Mines	EUA
1	Ahmed, A.S.	Université Grenoble Alpes	França
1	Steck, B.	EDF R&D (Électricité de France)	França
1	Vergniault, C.	EDF DI-TEGG (Électricité de France)	França
1	Boleve, A.	Université de Savoie	França
1	Janod, F.	Fugro	França

Para esse mesmo período foi elaborado um mapa de cocitação (Figura 05) para identificar os autores e/ou artigos relevantes na temática a partir dos documentos selecionados. A unidade de análise considerada foi de cocitação, quando um artigo cita dois artigos em comum. Os parâmetros utilizados foram

de, no mínimo, 08 cocitações sobre a referência e o peso das relações sendo calculado para o número dessas cocitações (Quadro 03). De forma a não filtrar artigos que possam ser referências de citações, o período utilizado não computou o ano inicial, somente o final, 2020.

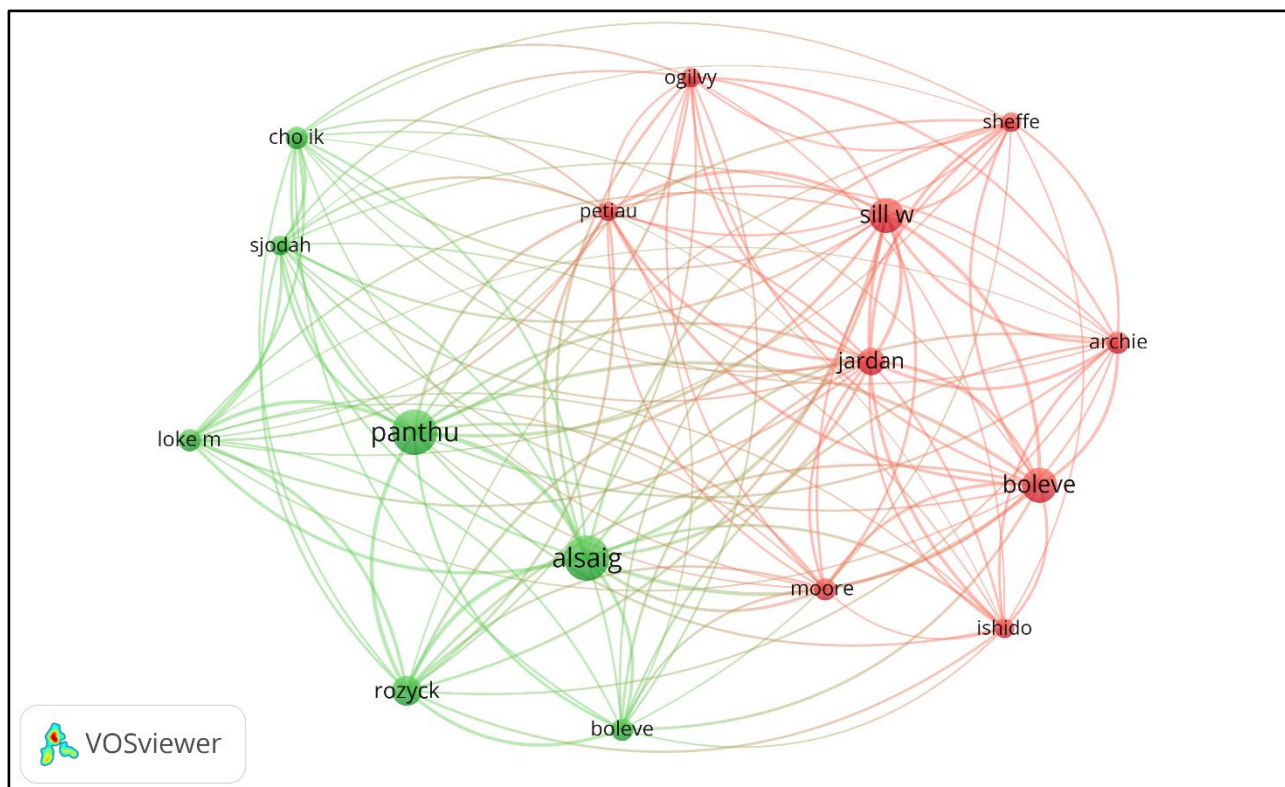


Figura 05 – Intensidade na rede de cocitação entre documentos das pesquisas na temática em questão para o período até 2020 (Fonte: Web of Science). Observação: Essa análise só considera o primeiro autor de cada citação. Essa é uma limitação dos dados exportados a partir do Web of Science.

Quadro 03 – Referência das publicações com no mínimo 08 citações (Fonte: Web of Science).

Referência	Citações
Al-Saigh et al., 1994	18
Panthulu et al., 2001	18
Bolève et al., 2009	14
SILL, 1983	14
Rozycki et al., 2006	12
Jardani et al., 2007	11
Archie, 1942	9
Bolève et al., 2011	9
Cho & Yeom, 2007	9
Loke, 1996	9
Moore et al., 2011	9
Ishido et al., 1983	8
Ogilvy et al., 1969	8
Petiau, 2000	8
Sheffer & Oldenburg, 2007	8
Sjodahl et al., 2006	8

Assim, a partir dos 16 artigos mais cocitados mostrados acima, observa-se que 06 (Archie, 1942; Sill, 1983; Loke, 1996; Petiau, 2000; Sjodahl, 2006; Jardani, 2007; Cho, 2007) são associados a pesquisas somente com resistividade elétrica ou proposição de métodos alternativos de inversão de dados, assim, não foram incluídos no conjunto de artigos anteriormente selecionados. Sete artigos dos mais cocitados (Al-Saigh et al., 1994; Panthulu et al., 2001; Bolève et al., 2009; Rozycki et al., 2006; Bolève et al., 2011; Moore et al., 2011; Sheffer & Oldenburg, 2007) já estavam dentro do conjunto de publicações obtido nas bases de dados. Outros 02 artigos (Ogilvy, 1969; Ishido, 1983) foram somados aos 29 artigos que atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos no protocolo, totalizando assim 31 artigos. Sendo esses, divididos em 02 Grupos Temáticos: Método de Potencial Espontâneo (SP) como método

único de investigação, 13 artigos e método de Potencial Espontâneo (SP) com outros métodos geofísicos associados, 18 artigos.

O grupo de artigos relacionados às pesquisas com uso somente do método SP representa 42% do total e tiveram as principais informações extraídas nos artigos e nas fichas sínteses sintetizadas na Tabela 01. O grupo de artigos relacionados a pesquisas com mais de um método geofísico representa 58% do total e tiveram as principais informações extraídas nos artigos e nas fichas sínteses sintetizadas na Tabela 02. Os itens que estão apresentados nessas tabelas foram selecionados observando-se a Questão Principal desta RSL. Implicitamente, esses itens relacionam-se a aspectos diretos da pesquisa (modalidade de pesquisa, tipo de barramento e suas características), a aspectos diretos da RSL (parâmetros de aquisição, características instrumentais e filtragem de ruídos). Além dos itens citados, na Tabela 02, foram adicionados itens relacionados a aspectos diretos das outras técnicas geofísicas complementares.

SP como único método de investigação

Grupo com 13 artigos representando 42% do total de artigos extraídos nesta RSL. As publicações deste grupo ocorreram entre os anos de 1969 e 2020. Apresentam uma síntese dos principais parâmetros condicionantes na maioria das pesquisas desenvolvidas na detecção de fluxos preferenciais com o uso de SP.

A maioria das pesquisas desenvolveram os estudos em campo (73%), laboratório (19%) e com dados sintéticos (8%). Sendo as estruturas pertencentes às pesquisas realizadas em barragens experimentais e de rejeito (46%), campos experimentais (15%), caixa de areia (15%), túneis (8%) e outros tipos (dique marítimo e aquífero termal) (8%), com materiais argilosos (36%),

arenosos (17%), de maiores granulometrias (ex.: cascalhentos a matacões) (9%) e o restante não informado (36%). Além disso, o nível d'água a montante apresenta-se em grande parte elevado (50%) e em menor parte baixo (19%). Trinta e um por cento não era aplicável ou não foi informado. Metade das pesquisas que envolvem barragens não apresentaram informações sobre sua fundação. Os eletrodos tem sua composição diversificada em Cu/CuSO₄ (38%), Ag/AgCl₂ (15%), Pb/PbCl₂ (8%) e outros (aço inoxidável e não polarizável) (16%). E o tipo de configuração geométrica dos eletrodos subdivididos em base fixa (62%) e base móvel (15%). Cerca de 23% das pesquisas não apresentam dados relacionados ao tipo de eletrodo utilizado e do tipo de configuração geométrica dos eletrodos. O uso de soluções eletrolíticas é em grande parte por CuSO₄ (15%), não utilizado (15%), NaCl (8%) e H₂O com condutividade (8%), e aproximadamente 54% das pesquisas não informam se há ou não o uso de alguma solução. Informações sobre características instrumentais do equipamento utilizado como, por exemplo, a impedância instrumental, está ausente em 77% dos artigos. Os principais resultados das pesquisas mostram-se positivos no uso de SP com relação ao objetivo traçado.

SP associado a outros métodos de investigação

Grupo com 18 artigos representando 58% do total de artigos extraídos nesta RSL. As publicações deste grupo ocorreram entre os anos de 2000 e 2020. Apresentam uma síntese dos principais parâmetros condicionantes na maioria das pesquisas desenvolvidas na detecção de fluxos preferenciais com o uso de SP e outros métodos geofísicos associados.

A maioria das pesquisas desenvolveram os estudos em campo (86%), com dados sintéticos (11%) e em

laboratório (3%). Sendo as estruturas pertencentes às pesquisas realizadas em barragens (60%), diques naturais (15%) e experimentais (5%), lagos (15%) e grutas (5%), com materiais siltosos à argilosos (51%), arenosos (16%), morainas (11%), não aplicado (11%) e o restante não informado (11%). Além disso, o nível d'água a montante apresenta-se em grande parte elevado (80%) e em menor parte baixo (5%). Quinze por cento não era aplicável ou não foi informado. Apenas 36% das pesquisas que envolvem barragens não apresentaram informações sobre sua fundação. Os eletrodos tem sua composição diversificada em Pb/PbCl₂ (44%), Cu/CuSO₄ (11%), Ag/AgCl₂ (6%), não polarizável (22%) e o restante não foi informado (17%). E o tipo de configuração geométrica dos eletrodos foi dividida em base fixa (83%) e base móvel (11%), sendo apenas 6% não informado. Cerca de 72% das pesquisas não apresentam

dados relacionados ao uso ou não de soluções eletrolíticas, sendo que a solução informada em grande parte é por CuSO₄ (10%), H₂O (6%), solução salina (6%) e bentonita com sal (6%). Existe uma predominante ausência de informações mais precisas sobre as características do equipamento de medida de SP (44%) e as informações disponibilizadas em maior parte são de impedância instrumental (39%). A maior parte da filtragem de ruído realizada foi de *drift* eletrolítico (39%), telúrico (22%) e a partir de um eletrodo fixo (17%), sendo o restante não informado (22%). O caráter inovador com a inserção de outras técnicas geofísicas concentra-se ainda no uso predominante da tomográfica elétrica (69%) com utilizações integradas com sísmica (11%), ressonância magnética nuclear (5%), cartografia hidroacústica (4%), sondagem elétrica vertical (4%), traçador salino (4%) e polarização induzida (3%).

Tabela 01 – Principais parâmetros utilizados nas pesquisas com uso somente de uma técnica geofísica Potencial Espontâneo.
N.I. = Não Informado; N.A.= Não Aplicado.

Referência	Objetivo	Tipo de Pesquisa	Eletrodo	Arranjo	Solução Eletrolítica	Características Instrumentais	Tipo de Estrutura	Material da Estrutura	Nível da água à montante	Fundação	Principais Resultados
Hu et. al., 2020	Avaliar SP sobre fluxos verticais na zona vadosa.	Experimento em Campo	Pb/PbCl ₂	Profundidades diferentes.	NaCl	N.I.	Campo experimental	N.I.	N.I.	Solo argiloso	Anomalias SP são sensíveis à saturação de água.
Ahmed et al., 2019	Avaliar a sensibilidade do método SP.	Dados Sintéticos e de Campo	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	Barragem Experimental	Núcleo argiloso	Elevado	N.I.	Êxito na abordagem numérica.
Gallas, 2020	Identificar zonas anômalas relacionadas à erosão interna	Experimento em Campo	Cobre	Base Fixa	CuSo ₄	Alta impedância	Barragem de Rejeito	Argila, areia, cascalho e granito	Rebaixado	N.I.	Dados SP indicaram a origem dos fluxos anômalos.
Wang et al., 2017	Identificar a relação entre deformação turbidez e SP.	Experimento em Campo	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	Barragem Experimental	Argila, areia e cascalho.	Elevado	N.I.	Êxito em identificar uma relação inversa entre valores SP e turbidez.
Lee & Kim, 2015	Comparação de SP com outros métodos geofísicos.	Experimento em Campo	N.I.	Base Fixa	Água com elevada condutividade.	N.I.	Túnel	N.A.	N.A.	Granito	Êxito na localização de zonas fraturadas com uso de SP.
Ikard & Revil, 2014	Localizar caminho de fluxo preferencial em uma caixa de areia.	Laboratório	Ag–AgCl	Base Fixa	N.I.	N.I.	Caixa de Areia	N.A.	Elevado	N.A.	Sinais SP sensíveis a fluxo de calor em poros saturados.
Kang et all., 2014	Avaliar o uso de SP para delimitar zonas anômalas de infiltração.	Experimento em Campo	Aço inoxidável	Base Fixa	N.I.	N.I.	Dique Marítimo	Areia e cascalho	Elevado e Rebaixado	N.I.	Dados SP otimizados para o nível da maré máx/mín.
Ikard et al., 2012	Propor um novo método com monitoramento de SP.	Laboratório e Experimento em Campo	Ag/AgCl	Base Fixa	N.I.	Taxa de amostragem de 512 Hz.	Caixa de Areia	Areia fina e canal com areia grossa.	Alto	N.A.	Dados SP sensíveis para detectar fluxos preferenciais.
Sheffer & Oldenburg, 2007	Desenvolver algoritmos de modelagem direta 3-D.	Dados sintéticos e Laboratório	Cobre	Base Fixa	CuSo ₄	N.I.	Barragem	Núcleo Argiloso	Elevado e Rebaixado	Depósitos aluviais	Distribuições heterogêneas detectáveis por SP.
Rizzo et al., 2000	Desenvolvimento de um novo protótipo de aquisição.	Experimento em Campo	Cobre	N.I.	N.I.	N.I.	Campo experimental	N.I.	N.A.	N.I.	Êxito no desenvolvimento de um protótipo de aquisição.
Al-Saigh et al., 1994	Delimitar áreas de infiltração em barragens.	Experimento em Campo	Cu/CuSO ₄	Base Fixa	Não foi utilizada.	Alta impedância.	Barragem	Núcleo Argiloso	Elevado e Rebaixado	Rochas calcárias	Êxito em delimitar áreas preferenciais de infiltração.
Ishido et al., 1983	Detectar potenciais de fluxo induzidos por fluxos de água.	Experimento em Campo	Cu/CuSO ₄	Base Móvel	N.I.	N.I.	Aquífero termais	N.A.	N.A.	Rochas vulcânicas	É possível fazer interpretações quantitativas de SP pela atividade geotérmica.
Ogilvy et al, 1969	Identificar zonas anômalas relacionadas a fluxos subterrâneos	Laboratório e Experimento em Campo	Não polarizável	Base Fixa	Medidas dentro do reservatório	N.I.	Barragem	Núcleo Argiloso	Elevado	Rochas e sedimentos	Êxito em delimitar áreas preferenciais de infiltração com SP, temperatura e taxas de fluxo.

DETECÇÃO DE FLUXO INTERNO DE ÁGUA EM BARRAMENTOS DE TERRA...

Tabela 2 – Principais parâmetros utilizados nas pesquisas com uso de outras técnicas geofísica integradas ao SP. N.I. = Não Informado; N.A.= Não Aplicado.

Referência	Objetivo	Tipo de Pesquisa	Eletrodo	Arranjo	Solução Eletrolítica	Características Instrumentais	Filtragem de Ruído	Técnica complementar	Objetivo - técnica complementar	Tipo de Estrutura	Material da Estrutura	Fundação	Nível da água à montante	Resultados Principais
Ahmed et al., 2020	Apresentar processo estocástico para inversão.	Dados Sintéticos e Experimento de Campo	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	Tomografia Elétrica (ER)	Delimitar os caminhos preferenciais.	Experimento executado em 03 Barragens	Mistura de areia, silte e argila.	Gnaiss e xisto fraturado	N.I.	Êxito na localização de infiltrações e determinação da permeabilidade.
Pratap, 2020	Delimitar caminhos preferenciais de infiltração.	Experimento em Campo	Não polarizável com grande área de contato	Base Fixa	N.I.	Acurácia de 0.1mV	N.I.	Tomografia Elétrica (ER)	Delinear as condições hidrogeológicas.	Lago Natural com recarga artificial.	Arenito e Folhelho	Arenito e Folhelho	N.I.	Êxito na delimitação dos caminhos preferenciais.
Kai et al., 2020	Delimitar caminhos preferenciais.	Experimento de Campo	Não polarizável	Base Fixa	N.I.	Resolução 1microV	A partir do eletrodo fixo	Ressonância Magnética Nuclear (NMR)	Delimitar os caminhos preferenciais saturados de escoamento.	Grutas	N.A.	Calcário	N.A.	O método MRS identificou a posição das áreas saturadas mais elevadas que atingiram a gruta.
Walid, 2019	Delimitar caminhos preferenciais.	Experimento de Campo	Não polarizável	Base Fixa	CuSO ₄	N.I.	N.I.	Tomografia Elétrica (ER)	ER= Definir as unidades hidroestratigráficas	Barragem	Cobertura de areia compactada e núcleo argiloso.	Materiais aluvionares	Elevado	Êxito na localização de zonas anômalas associadas a
Nwokebuihe et al., 2017	Identificar caminhos preferenciais.	Experimento de Campo	Cu/CuSO ₄	Base Fixa	CuSO ₄	Voltímetro com alta impedância	Drift eletrônico.	Tomografia Elétrica (ER) Polarização Induzida (IP)	ER= caminhos preferenciais . IP= Identificar a posição do canal.	Barragem	Núcleo argiloso	Rochas Calcárias e Folhelhos	Elevado	A integração dos dados ERT, IP e SP foi muito útil.
Giampaolo et al., 2016	Investigar as origens de sumidouros.	Experimento de Campo	N.I.	Base Fixa	N.I.	N.I.	Drift eletrônico.	Tomografia Elétrica (ER)	Determinar a estratigrafia	Lago	N.A.	Rochas Calcárias.	Elevado	As secções aquáticas de ER conseguiram delimitar melhor.
Ikard et al., 2015	Avaliar o uso de SP para delimitar zonas anômalas de infiltração.	Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	N.I.	Impedância de 100MOhm	A partir do eletrodo fixo	Tomografia Elétrica (ER) e sísmica (Sis)	ER= unidades hidroestratigráficas. Sis= determinar a geometria.	Barragem	Areia com o núcleo argiloso	Argilito	Elevado	A integração dos dados ER, Sis e SP detectou uma via de fluxo preferencial.
Rittgers et., 2015	Elaborar um algoritmo para localizar fontes sísmicas.	Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	N.I.	N.I.	N.I.	Tomografia Elétrica (ER) e Sísmica Passiva (SisP)	Delimitar os caminhos preferenciais de escoamento.	Dique Experimental	Núcleo argiloso	Areia compactada	Elevado	Demonstraram a eficácia de uso conjunto das técnicas passivas.

Ikard et al., 2014	Avaliar um escoamento interno anômalo.	Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	N.I.	>10 M	A partir do eletrodo fixo	Tomografia Elétrica (ER)	Delimitar os caminhos preferenciais de escoamento.	Barragem	Núcleo argilo-siltoso	N.I.	Elevado	Êxito na identificação de caminhos anômalos.
Bolève et al., 2012	Determinar a correlação entre magnitude SP e permeabilidade hidráulica.	Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	N.I.	Alta impedância.	Telúrico	Cartografia Hidro-acústica	Detectar atividade acústica potencial da infiltração.	Dique	Areia e cascalho com o núcleo argiloso	Areia e silte	Elevado	Êxito em correlacionar a magnitude SP com valores de permeabilidade.
Thompson et al., 2012	Delimitar caminhos preferenciais.	Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	Solução salina.	Voltímetro com alta impedância.	Drift eletródico.	Tomografia Elétrica (ER)	Delimitar os caminhos preferenciais de escoamento.	Diques naturais	Morainas	Morainas	Elevado	Êxito em definir o mapa de potencial de fluxo residual.
Minsley et al., 2011	Utilizar modelamento numérico para avaliar o fluxo.	Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	Bentonita com sal.	Voltímetro com alta impedância.	Telúrico e Drift eletródico.	Tomografia Elétrica (ER)	Delimitar os caminhos preferenciais de escoamento.	Barragem	Núcleo argiloso	Rochas graníticas	Elevado	SP e ER confirmaram as áreas de escoamento.
Moore et al., 2011	Delimitar caminhos preferenciais.	Experimento de Campo	Cu/CuSO ₄	Base Fixa	N.I.	N.I.	Drift eletródico e monitoramento telúrico.	Sondagem Elétrica (SEV)	Determinar a estratigrafia	Diques naturais	Morainas	Rochas intrusivas intermediárias	Elevado	Indicaram a presença de fluxos de água subterrânea descendentes.
Bolève et al., 2011	Desenvolver um novo protocolo de medidas SP. com injeção de	Experimento em Laboratório e em Campo	Laboratório = Ag/AgCl Campo= Pb/PbCl ₂	Base Fixa	Água	Voltímetro com alta impedância.	Drift eletródico.	Traçador salino	Estimar a permeabilidade.	Barragem	N.I.	N.I.	Elevado	Êxito no uso de SP associado a uma injeção de salmoura.
Bolève et al., 2009	Inverter dados SP para localizar caminhos preferenciais.	Dados Sintéticos e Experimento de Campo	Pb-PbCl ₂	Base Fixa	N.I.	Voltímetro com impedância de 100MΩ	Drift eletródico.	Tomografia Elétrica (ER)	Obter a distribuição da resistividade elétrica.	Barragem	Núcleo argiloso	Aluvião	Elevado	Êxito em inverter dados anômalos SP.
Rozycki, 2009	Desenvolver uma fórmula para potencial de fluxo SP..	Dados Sintéticos e Experimento de Campo	Pb/PbCl ₂	Base Móvel	N.I.	N.I.	Telúrica	Tomografia Elétrica (ER)	Definir as unidades hidroestratigráficas.	Barragem	N.I.	N.I.	Elevado	Fenômenos de pipping curtos e profundos passam despercebidos.
Rozycki et al., 2006	Elaborar uma equação que permita determinar o perfil SP.	02 Experimentos em Campo	Não polarizável	Base Móvel	N.I.	N.I.	Telúrica	Tomografia Elétrica (ER)	Delimitar os caminhos preferenciais saturados de escoamento.	Barragem	Núcleo Argiloso	N.I.	1o) Elevado 2o) Rebaixado	Anomalias SP podem ser aproximadas por modelos geométricos.
Panthulu et al., 2001	Delimitar caminhos preferenciais de fluxo.	Experimento de Campo	N.I.	Base Fixa	N.I.	N.I.	Drift eletródico.	Tomografia Elétrica (ER)	ER= Delimitar os caminhos preferenciais de escoamento.	Barragem	Núcleo argiloso	Quartzitos micáceos	Elevado	Métodos SP e ER tiveram êxito em delinear os caminhos preferenciais.

DISCUSSÃO

As pesquisas com SP e/ou SP integrado à outros métodos geofísicos apresentam excelente informação sobre as características construtivas e de materiais utilizados na construção dos barramentos e na aquisição dos dados, além de considerarem que obtiveram êxito em detectar fluxos preferenciais anômalos em barragens e em outros ambientes. Além disso, foi possível observar uma ausência de informações em características específicas nos dois grupos de pesquisa.

Após a análise da tabela, nota-se tendências nas características de aquisição, estrutura e técnicas geofísicas complementares e linhas de pesquisas indicadas pela análise das tabelas-síntese. Em ambos os grupos de pesquisa são realizados experimentos de campo em barragens com material da estrutura composto por núcleos argilosos, com fundação em solos e sedimentos com medição de nível d'água a montante elevado. A composição e solução eletrolítica dos eletrodos é constituída por Pb/PbCl₂ e Cu/CuSO₄ com configuração geométrica de base fixa, com características instrumentais de alta impedância e filtragem de ruído de *drift* eletrolítico e telúrico. Além disso, grande parte das pesquisas que tiveram uso de outros métodos geofísicos utilizaram como técnica geofísica complementar a tomografia elétrica, como forma de conhecer a proporção dos materiais lateral e verticalmente, sendo extremamente útil e auxiliando no cumprimento do objetivo principal. A utilização do método SP como identificador de possíveis zonas de infiltração e erosão interna (*pipping*) foi de suma importância para o produto final das investigações.

Pela análise da tabela-síntese e dos mapas metanalíticos identificou-se que pesquisas recentes em barramentos se concentrando em temas sobre

comportamento de diferentes composições de eletrodos e na determinação da influência dos ruídos telúricos, culturais/antrópicos e eletródicos em levantamentos e monitoramentos com o método SP.

Por meio das tabelas-síntese foi observada que uma quantidade considerável de ausência de informações a respeito de parâmetros singulares como: a solução eletrolítica utilizada, características do equipamento de medição (resolução, sensibilidade etc.), tipo de filtragem executada nos dados SP, material da fundação e estrutura quando relacionada a pesquisas em barragens, nível d'água à montante e material e configuração geométrica da disposição dos eletrodos.

A totalidade das pesquisas obteve resultados positivos no uso do método SP na delimitação de caminhos preferenciais de fluxo de água quando relacionadas a pesquisa em barragens de terra e enrocamento, e tiveram seus objetivos atingidos. Os métodos associados mostraram-se úteis e comprobatórios na utilização do método para tal finalidade.

CONCLUSÕES

A geofísica tem importante contribuição na investigação da subsuperfície, principalmente por ser um método não destrutivo, em que sua utilização ganha mais espaço em áreas de obras de engenharia, como no monitoramento de barragens.

Este estudo forneceu uma revisão sobre a estrutura específica da literatura sobre o uso do método passivo de Potencial Espontâneo na detecção de fluxos anômalos em barramentos, analisando uma grande quantidade de literatura usando dados bibliométricos.

Esta abordagem da Revisão Sistemática da Literatura pode ser muito útil para melhorar a compreensão de um tópico de pesquisa complexo, como a detecção de fluxos anômalos de água

subterrânea com métodos indiretos. Podendo auxiliar na sugestão de novas direções de pesquisa ou prioridades de pesquisa alternativas. Para essa pesquisa em particular, permitiu identificar as linhas de pesquisa mais recorrentes e as tendências metodológicas, e ainda possibilitou identificar a ausência de informações essenciais na aquisição e processamento dos dados. Percebeu-se ainda que esse método sugere que a pesquisa sobre a utilização integrada a outras técnicas consagradas e inovadoras recebe atenção relativamente limitada.

Assim, através da aplicabilidade e dos resultados obtidos com essa técnica de Revisão Sistemática da Literatura percebeu-se grande importância em sua utilização nos estudos científicos, corroborando desse modo, os resultados alcançados.

Apesar da aplicabilidade e dos resultados obtidos com essa técnica de Revisão Sistemática da Literatura terem sido muito satisfatórios, recomenda-se, uma leitura dos artigos de interesse especial para aprofundamento detalhado do conteúdo.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder a oportunidade de participar da elaboração deste artigo e ter conhecido os profissionais que fizeram parte da realização deste.

À minha família, pelo apoio e incentivo.

À Universidade de Brasília (UnB), em especial ao Instituto de Geociências (IGD/UnB).

Ao meu orientador Dr. Luciano Soares da Cunha, que me deu todo o suporte necessário para a realização do artigo e do desenvolvimento dessa área temática.

Ao Programa de Iniciação Científica (ProIC) pelo apoio e incentivo à pesquisa brasileira.

Aos meus amigos e colegas, em especial, Júlia Neves, Kimberly e Luís Fernando pela colaboração de informações e auxílio no desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- Ahmed, A. S., Revil, A., Bolève, A., Steck, B., Vergnault, C., Courivaud, JR, & Abbas, M. (2020). Determinação da permeabilidade de caminhos de escoamento de percolação em barragens a partir de medições de autopotencial. *Geologia de Engenharia*, 268, 105514.
- Ahmed, A. S., Revil, A., Steck, B., Vergnault, C., Jardani, A., & Vincelas, G. (2019). Sinais de autopotencial associados a vazamentos localizados em barragens e diques de aterro. *Geologia de Engenharia*, 253, 229-239.
- Al-Saigh, N. H., Mohammed, Z. S., & Dahham, M. S. (1994). Detecção de vazamento de água de barragens pelo método de autopotencial. *Geologia de Engenharia*, 37(2), 115-121.
- Benefield, L. (2003). Implementando Práticas Baseadas em Evidências em Cuidados Domiciliares. *Enfermeira de assistência domiciliar. The Journal for the Home Care and Hospice Professional*, 21 (12), 804–809.
- Boleve, A., Janod, F., Revil, A., Lafon, A., & Fry, JJ (2011). Localização e quantificação de vazamentos em barragens usando medidas de autopotencial de lapso de tempo associadas à injeção de traçador de sal. *Journal of Hydrology*, 403(3-4), 242-252.
- Bolève, A., Vandemeulebrouck, J., & Grangeon, J. (2012). Localização de vazamento de dique e estimativa de permeabilidade hidráulica através de medições de autopotencial e

- hidroacústicas: Diagrama 'ábaco' de autopotencial para estimativa de permeabilidade hidráulica e cálculo de incerteza. *Journal of Applied Geophysics*, 86, 17-28.
- Bolève, J., Revil, A., Janod, F., Mattiuzzo, J. L., & Fry, J. J. (2009). Vias preferenciais de fluxo de fluido em barragens de aterro fotografadas por tomografia de autopotencial. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), 447-462.
- BRASIL. (2021). Rede Nacional de Pesquisa. (org.). Comunidade
- CAPES/MEC - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/Ministério da Educação. Portal de Periódicos, 2021. Comunidade Acadêmica Federada (CAFe).
- Cardoso, A. L. J., da Silva, W. V., da Silva, E. D., & Del Corso, J. M. (2013). Análise das publicações mais citadas da revista *Gestão Estratégica* entre 2001 e 2010. *Revista Ibero-Americana de Estrategia*, 12(3), 281-312.
- Centre for Reviews and Dissemination (2009). *Systematic Reviews (2009): CRD's guidance for undertaking reviews in health care*. [s.l: s.n.].
- Gallas, J. D. F. (2005). O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23, 133-144.
- Gallas, J. D. F. (2020). Self-potential (SP) generated by electrokinesis – Efficiency and low cost dam safety. *Journal of Applied Geophysics*, 180, 104122.
- Galvão, M. C. B., & Ricarte, I. L. M. (2019). Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da informação*, 6 (1), 57-73.
- Giampaolo, V., Capozzoli, L., Grimaldi, S., & Rizzo, E. (2016). Sinkhole risk assessment by ERT: The case study of Sirino Lake (Basilicata, Italy). *Geomorphology*, 253, 1–9.
- Hu, K., Jougnot, D., Huang, Q., Looms, M. C., & Linde, N. (2020). Advancing quantitative understanding of self-potential signatures in the critical zone through long-term monitoring. *Journal of Hydrology*, 585, 124771.
- Ikard, S. J., & Revil, A. (2014). Self-potential monitoring of a thermal pulse advecting through a preferential flow path. *Journal of Hydrology*, 519, 34–49.
- Ikard, S. J., Revil, A., Jardani, A., Woodruff, W. F., Parekh, M., & Mooney, M. (2012). Monitoramento de teste de pulso salino com o método de autopotencial para determinar de forma não intrusiva a velocidade da água dos poros em áreas de vazamento de barragens de terra e aterros. *Pesquisa de Recursos Hídricos*, 48 (4).
- Ikard, S. J., Revil, A., Schmutz, M., Karaoulis, M., Jardani, A., & Mooney, M. (2014). Characterization of Focused Seepage Through an Earthfill Dam Using Geoelectrical Methods. *Groundwater*, 52(6), 952–965.
- Ikard, S. J., Rittgers, J., Revil, A., & Mooney, M. A. (2015). Geophysical investigation of seepage beneath an earthen dam. *Groundwater*, 53(2), 238–250.
- Kang, H. J., Cho, I. K., Kim, J. H., Yong, H. H., Song, S. H., & Park, Y. G. (2014). SP Monitoring at a Sea Dike. *Near Surface Geophysics*, 12(1), 83–92.
- Kessler, M. M. (1963). Acoplamento bibliográfico entre artigos científicos. *Documentação americana*, 14(1), 10-

25.

- Lee, H. B., & Kim, B. W. (2015). Characterisation of hydraulically- active fractures in a fractured granite aquifer. *Water SA*, 41(1), 139–148.
- Lu, K., Li, Z., Niu, R., Li, F., Pan, J., Li, K., & Chen, L. (2020). Using surface nuclear magnetic resonance and spontaneous potential to investigate the source of water seepage in the JinDeng Temple grottoes, China. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 142–151.
- Mariano, A. M., Santos, M. R. (2017). Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. XXVI Congreso Internacional de la Academia Europea de Dirección y Economía de la Empresa (AEDEM), Reggio Calabria, 26.
- Mendes, K. D. S., Silveira, R. C. de C. P., & Galvão, C. M. (2008). Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto & Contexto - Enfermagem*, 17(4), 758–764.
- Minsley, B. J., Burton, B. L., Ikard, S., & Powers, M. H. (2011). Hydrogeophysical investigations at hidden Dam, Raymond, California. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 16(4), 145–164.
- Moore, J. R., Boleve, A., Sanders, J. W. & Glaser, S. D. (2011). Self- potential investigation of moraine dam seepage. *Journal of Applied Geophysics*,
- Nwokebuihe, C. S., Alotaibi, M. A., Elkrry, A., V. Torgashov, E., & Anderson, L. N (2017). Dam Seepage Investigation of an Earthfill Dam in Warren County, Missouri Using Geophysical Methods. *AIMS Geosciences*, 3(1), 1–13.
- Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., & Shirke, J. M. (2001). Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. *Engineering Geology*, 59(3–4), 281–295.
- Petticrew, M.; Roberts, H. Systematic reviews in the social science: a practical guide. Malden: Blackwell Publishing, 2006.
- Polit, D. F., & Beck, C. T. (2006). Usando a pesquisa na prática de enfermagem baseada em evidências. Fundamentos da pesquisa em enfermagem. Métodos, avaliação e utilização. Filadélfia (EUA): Lippincott Williams & Wilkins, 12, 457-94.
- Pratap, B. (2020). Detection of water leakage paths using self-potential and geoelectrical resistivity methods: A case study of Kailana Lake-Takht Sagar in the Jodhpur City, Rajasthan, India. *HydroResearch*, 3, 166–174.
- Prisma Group (2015). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses. (s.l.): University of Ottawa/Oxford University.
- Rittgers, J. B., Revil, A., Planes, T., Mooney, M. A., & Koelewijn, A. R. (2015). 4-D imaging of seepage in earthen embankments with time- lapse inversion of self-potential data constrained by acoustic emissions localization. *Geophysical Journal International*, 200(2).
- Rizzo, E., Binieris, K., Di Bello, G., Lapenna, V., Piscitelli, S., & Telesca, V. (2000). New prototype for 4D self-potential tomography in near-surface
- Rozycki, A. (2009). Evaluation of the streaming potential effect of piping phenomena using a finite cylinder model. *Engineering Geology*, 104(1–2), 98–108.

- Rozycki, A., Ruiz Fonticiella, J. M., & Cuadra, A. (2006). Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method. *Engineering Geology*, 82(3), 145–153.
- Sheffer, M. R., & Oldenburg, D. W. (2007). Three-dimensional modelling of streaming potential. *Geophysical Journal International*, 169(3), 839–848.
- StArt – LaPES – Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software. Software State of the Art through Systematic Review. Versão 3.3 Beta 03 Ufscar.br.
- The Joanna Briggs Institute & The University of Adelaide (2014). *The Systematic Review of Economic Evaluation Evidence*.
- Thompson, S., Kulesa, B., & Luckman, A. (2012). Integrated electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) techniques for assessing hydrological processes within glacial lake moraine dams. *Journal of Glaciology*, 58(211), 849–858.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538.
- Walid, F. A. (2019). Caracterização do problema de vazamento na barragem de terra do Salhab usando tomografia de resistividade elétrica e medições de SP, Síria. *Contribuições para Geofísica e Geodésia*, 49(4), 441-458.
- Wang, F., Dai, Z., Okeke, C. A. U., Mitani, Y., & Yang, H. (2018). Experimental study to identify premonitory factors of landslide dam failures. *Engineering Geology*, 232, 123–134.