

# Supporting decision-making processes in the assessment of water-related risks: a review of models and methods

Caterina Caprioli<sup>1,\*</sup>, Chiara D'Alpaos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Torino, Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning (DIST), Viale Mattioli 39, 10125 Turin, Italy; caterina.caprioli@polito.it

<sup>2</sup> Università degli Studi di Padova, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering (Dept. ICEA), Via Venezia 1, 35131, Padova, Italy; chiara.dalpaos@unipd.it

\* corresponding author

## Keywords

Systematic literature review; risk assessment; evaluation models; multi-criteria decision making; hydrological hazard and risk; hydrogeological hazard and risk

## Abstract

The whole world is experiencing the impact of climate change, with an increase in the severity and frequency of water-related hazards and risks at different territorial levels. Consequently, enhancing territorial resilience and reducing these risks have emerged as one of today's biggest challenges. Within this context, policymakers and planners need robust and transparent decision-making tools to effectively solve and rapidly respond to water-related hazards. This paper reviews the literature on these issues with the aim of providing a systematic overview of the current assessment of water-related hazards and risks. This review can afford an in-depth understanding of the role of evaluation methods in supporting policymakers in the design of cost-effective risk management strategies. We first provide an overview of the procedures for the assessment of hydrological and hydrogeological hazards and risks. We then identify gaps in current evaluation methods, particularly in terms of the economic consequences of these risks. Finally, we list the criteria from the literature that can be successfully adopted to assess water-related risks and to evaluate mitigation actions and interventions. Our findings reveal that significant advances are still needed to improve the robustness of the evaluation of the economic and financial impacts of water-related risks. The study can offer some important insights into decision-making and management processes for water-related risks, as well as a guide for future research focused on the multidimensionality of these issues.

## 1. Introduction

The rapid increase in the frequency and severity of hydrogeological and hydrological threats is generating ever-growing concerns worldwide. These phenomena affect both territories and their population. As a result, improving territorial resilience and mitigating risk have become priority challenges. Different geo-hydrologic processes are involved, such as flash floods, shallow landslides and debris flows, mudflows, surface runoff and time of concentration, inadequate discharge

capacity, instability and terraced slopes (Paliaga et al., 2019). These events are related to natural factors and some territories are more vulnerable than others are. However, anthropogenic modifications and climate change have a strong influence on the increase in the number of these events worldwide, as well as in their severity and occurrence. Some examples of these phenomena are the alterations of catchments or hydrographic networks, urban sprawl, fragmentation, soil consumption, and abandonment (Maragno et al., 2018; Guido Paliaga et al., 2019; Pellicani et al., 2018). Consequently, impacts of growing magnitude affect populations, buildings, natural and artificial infrastructures, and economic activities prone to water-related hazards.

Within this context, the success of public decision-making processes in facing the challenges discussed above becomes essential. To accurately address and promptly react to these increasing natural threats, policymakers and planners require reliable and transparent decision-making tools (D'Alpaos & Bottacin, 2021; Datola et al. 2024). These tools are crucial to the design and implementation of long-term risk-mitigation strategies, which need to account for natural hazards, potential populations affected, and the availability of funds and financial resources. One of the major policy challenges is indeed to prioritize alternative investments intended to mitigate different risks, which in turn requires improved knowledge to inform successful governance (OECD, 2020).

The main research questions that motivated our work are the following: a) Is there already a review of the state of the art, systematizing and discussing existing methods and tools for the assessment of water-related hazards and risks? b) What are the emerging trends in risk evaluation? c) How can frontier research effectively support decision-makers in improving policy coherence across different sectors and domains?

In spite of the growing interest in this research during the last decade, our investigation reveals that there is a lack of structured reviews. A systematic review of existing methods and tools can significantly support decision-making and policy coherence across different sectors and domains, taking into account climate change adaptation, disaster risk management, and water management, which affect the resilience of territories and, consequently, the quality of life of populations.

This paper provides a state-of-the-art review of the literature on the main issues and recent trends in the analysis of water-related hazards and risks and their assessment. It aims to fill the above-mentioned gap in current research. We propose a conceptual framework to analyze, organize, and discuss existing literature in this domain, by implementing a systematic literature search protocol based on bibliographic analyses (Bottero, Caprioli, et al., 2021; Bottero, Dell'Anna, et al., 2021; D'Alpaos & Andreolli, 2020; D'Alpaos & Bragolusi, 2018) and the PRISMA approach (Moher et al., 2009; Page et al., 2021). In our search, we included both "hazard" and "risk" to account for the potential damage to the environment, people and objects and its probability of occurrence, and account as well for both qualitative and quantitative measurement and assessment approaches. Additionally, we also focused on the adjectives "hydrological" and "hydrogeological", to consider the effects at surface and underground level, respectively, of excess water from one or multiple sources (e.g. coastal, fluvial, or surface/sub surface water) or deficit of river flow or precipitation over a prolonged period (Lindsay Beevers et al., 2019). From preliminary investigations, it emerged indeed that many authors refer to the so-called water-related hazards and risks by adopting the wording "hydrological" and "hydrogeological". Consequently, we adopted both to cover comprehensively the domain of extreme events associated with water occurrence, movement, and distribution (including flooding and drought), and their cause-effect events such as landslides, debris-flows, soil erosion, etc. It is worth mentioning, though, that the term hydrogeological is mainly adopted in the Italian context, for two main reasons. Firstly, in Italy, hydrogeological instability is a long-standing and serious issue, for its natural conformation, its complex orography and (generally) small catchment areas. For these reasons, the topic has attracted great interest in academic research as well as in the political and public debate. Secondly, as it will emerge in Section 3, the reference to the adjective "idrogeologico" has been recurring in the Italian legislation starting from 1923 (R.D.L. 30/12/1923 n. 3267), and it has been translated into "hydrogeological" and, in turn, into "hydrogeological risk", which is between nowadays e is commonly used when referring to "hydrological risk", "landslide risk", or "flood risk".

The aim of this paper is threefold. First, we aim to contribute to the existing literature and to support public decision-makers by providing a systematization of the wealth of assessment methods of water-related hazards and risks. Second, based on the results of a preliminary literature review, we aspire to draw policymakers' attention to the multidimensional nature of the assessment of risks and hazards related to both surface water and groundwater. Third, we intend to provide a preliminary checklist of criteria that can be successfully adopted in the assessment of water-related risks and their mitigation strategies. To pursue these objectives, we plan to: i) identify the gap in the existing literature on the differences between the concepts and treatment of hazard and risk; ii) review assessment methods conventionally used in the context of water-related hazards and risks; iii) discuss the relevance of environmental, economic and social criteria in informing sustainable risk mitigation strategies via a proper and comprehensive assessment of water-related hazards and risk.

In detail, to conduct our systematic review, we implemented a multi-step procedure. We started by examining existing reviews on these issues. This preliminary search revealed a substantial lack of reviews, particularly on the assessment of hydrological and hydrogeological hazards and risks from a management and planning perspective. Then, we explored the topic according to the country and year of publication of the selected contributions. Finally, we examined and discussed evaluation tools and methods for the assessment of hydrological and hydrogeological hazards and risks to provide a set of assessment criteria and useful insights to inform public policy and support policymakers and decision-makers in public decision processes. We deem that this systematic literature review can contribute to identifying future research perspectives and improve the dialectic relationships between research and real-world policy actions, favoring the successful implementation of adaptation and mitigation strategies.

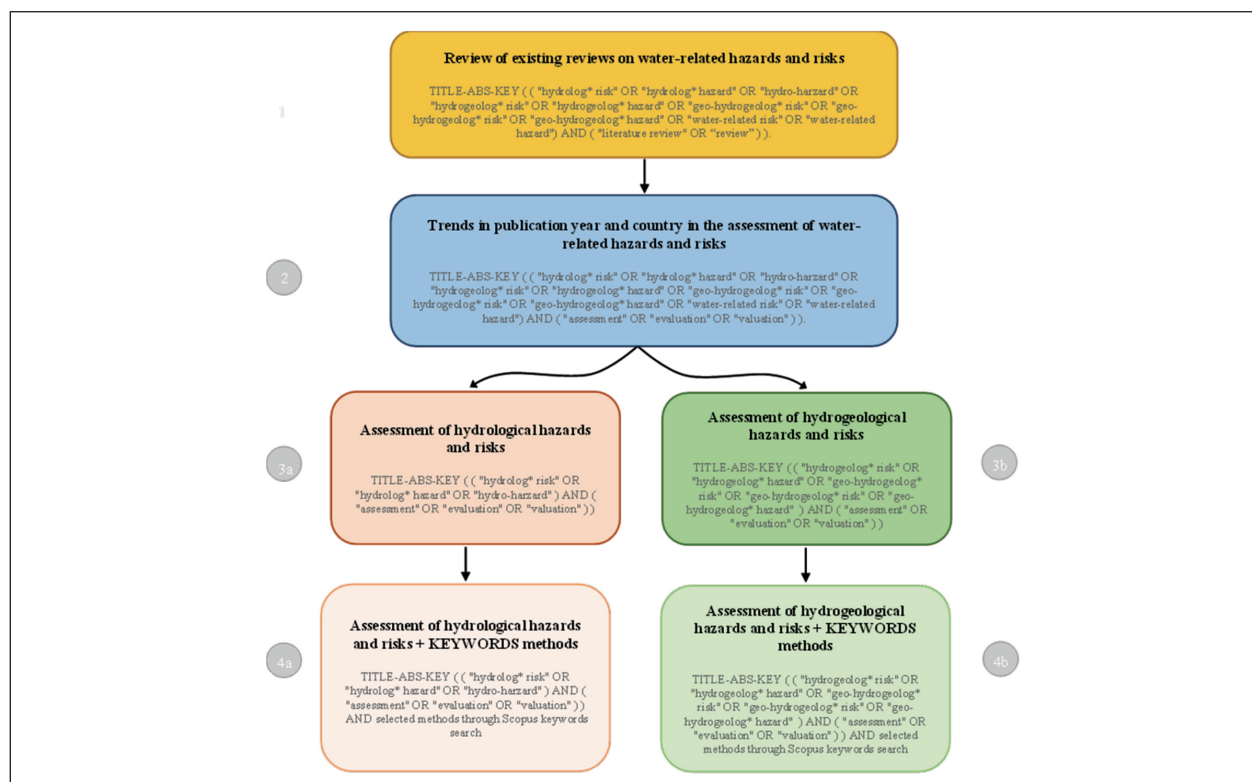
The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 describes the procedure adopted to conduct the literature review and the different stages of the analysis; Section 3 presents the main findings of the literature search, by focusing on publication year, country, hazards and risks investigated, aims and methods/models reported and described in the contributions analyzed; Section 4 discusses main findings, identifies literature gaps in the assessment of hydrological/hydrogeological risk, and proposes a list of criteria to be adopted in future risk-assessment applications; finally, Section 5 provides some concluding remarks and suggestions for future developments.

## 2. Methodology

The database Scopus was used to conduct the literature review and the PRISMA diagram (Moher et al., 2009; Page et al., 2021) to clearly report our systematic review. Data collection and analysis of publications were performed between September 2022 and August 2023. To conduct our literature review, a multi-step approach was adopted. The approach is schematized in Figure 1. The first step consists of analyzing existing literature reviews on water-related hazards and risks, to identify potential literature gaps, susceptible to further investigation. The second step focuses on the trends of publications on the assessment of water-related hazards and risks by publication year and country, whereas the third step analyzes the results of the search conducted specifically on hydrological and hydrogeological hazards and risks. Finally, in the fourth step, we fine-tuned the search and examined models and methods used for the assessment of hydrological and hydrogeological hazards and risks, respectively.

In the first step, a preliminary literature review was conducted to detect which and how many literature review articles on the topic had been already published. The search was performed by implementing the following search string, i.e. TITLE-ABS-KEY ( ( «hydrolog\* risk» OR «hydrolog\* hazard» OR «hydro-hazard» OR «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» OR «water-related risk» OR «water-related hazard») AND ( «literature review» OR "review" ). From this search, we obtained 103 publications (see Figure A1 in the Appendix).

We conducted a detailed analysis of the entire set of publications resulting from this preliminary search. We excluded 33 publications from the outset, because they focus on issues that are irrelevant to the topic at hand (e.g., impact of drinking water quality, agriculture production and businesses, or many aspects involved in water use as a resource). Of the remaining, most of the papers (23 documents) are not literature reviews: they focus on a case-based assessment of a specific hydrological or hydrogeological risk or hazard in a specific area (e.g., Benvenuti and Martini, 2002; Cochard et al., 2008; Hamdani et al., 2021; Nie et al., 2021; Pierson et al., 2011), whereas 3 publications review a specific risk or hazard, namely coastal over wash (Donnelly et al., 2006), declining meltwater (Carey et al., 2017), and acid mine drainage (Acharya & Kharel, 2020). Conversely, 15 documents refer to multiple hazards or risks or in a specific territory, such as early warning systems for water-related hazards in Europe (Alfieri et al., 2012), volcanic, seismic and hydrogeological risks in the Ischia Island in Southern Italy (Paoletti et al., 2013), impacts of climate change on the hydrology of northern mid-latitude cold regions (Aygün et al., 2020). In addition, 15 reviews examine a single assessment technique, such as remote sensing (Sheffield et al., 2018), Trend Analysis (Bayazit (2015)), and citizens science (Kääb, 2008), whereas 4 documents review a set of actions or solutions to reduce water-related risks or hazards, such as blue-green infrastructures in Southeast Asia (Hamel and Tan, 2022), nature-based solutions for downstream water quantity and water quality in Africa (Acreman et al., 2021), community forests in five large Mediterranean countries (Skulska et al., 2020), and forests to regulating water fluxes and supplies in Germany (Bredemeier, 2009). Finally, the remaining 10 documents provide a more complete review of water-related hazards and risks. In detail, Pahl-Wostl et al. (2013) identify the major governance challenges for (sustainable) water security, and how their nature, perception and framing of the societal discourse have changed; Garrick and Hall (2014) collect water security indicators and indices to identify thresholds for water-related risks across multiple dimensions of water security; van den Brandeler et al. (2019) analyze the concepts of Integrated Water Resources/River Basin Management and Metropolitan/Urban Water Management; Henriksen et al. (2018) analyze web-based access to data and model simulations in Europe and the Nordic countries to add insight into participatory forms of early warnings and monitoring to reduce disaster risks; Blöschl et al. (2013) reviews methods of flood and drought risk management and emerging approaches and how



**Figure 1.** Flow chart of the multi-step approach developed for conducting the literature review

to prioritize them; Clar (2019) gives an overview over linkages between demographic and hydrological hazard research; Fasihi et al. (2021) investigate the existing multidisciplinary body of knowledge on analyzing flood and drought together; Didier et al. (2018) underline the main conditions that contribute to making Early Warning systems effective within a risk management approach; Harrington et al. (2023) reports on a meta-review of published works on water security, explicitly focus on race or ethnicity; finally, Beevers et al. (2022) review the state-of-the-art research on hotspots for floods and droughts. Nonetheless, none of these contributions provides a systematic and comprehensive literature review on water-related risks and their assessment.

To achieve our research aim, in the second step, we focused the search on the assessment of water-related hazards and risks. We investigated the number of publications per year and country to analyze the trends of scholarly research, by implementing the string TITLE-ABS-KEY ( ( «hydrolog\* risk» OR «hydrolog\* hazard» OR «hydro-hazard» OR «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» OR «water-related risk» OR «water-related hazard») AND ( «assessment» OR «evaluation» OR «valuation» ) ). In the third step, we analyzed separately “hydrolog\*” and “hydrogeol\*” hazard and risk to account for the specificity of the field literature in Italy, as previously mentioned. Since the goal of this review is to identify the most recent trends in hydrogeological and hydrological hazard and risk assessment, for the in-depth analyzes of contributions and their discussion, we limited the number of potential articles to those published after 2015. We adopted 2015 as a reference year, because in 2015 United Nations Member States adopted the “The 2030 Agenda for Sustainable Development” (United Nations, 2015a) at the core of which there are the well-known 17 Sustainable Development Goals (SDGs). De facto, in recent years, SDGs and the growing concern about the relevance and value of ecosystem services have become a hot topic and have favored an increasing debate, both at the academic and political level, on the interrelations among environmental, economic, and socio-cultural systems and their underlying value systems. The analysis of this mutual relation is crucial when we come to the assessment of water-related hazards and risks, and we aim to design sustainable and long-term actions and policies to address the issue of ensuring water security and increasing the resilience of urban and rural areas.

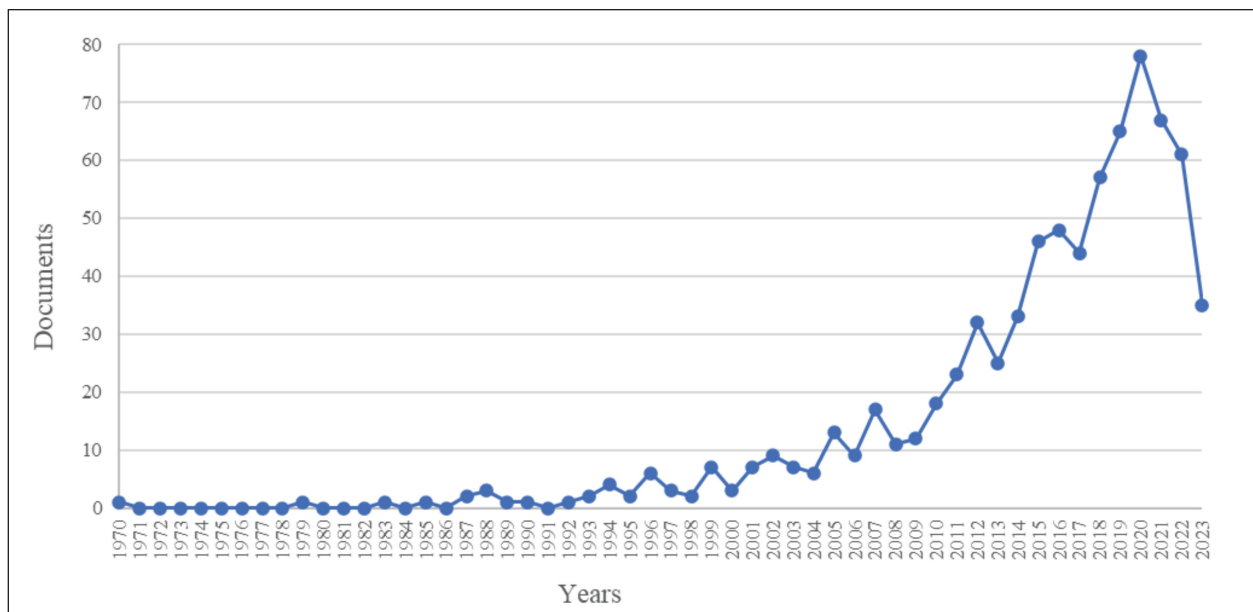
In the fourth step, we then fine-tuned the literature review by implementing a further search process. By filtering the keywords contained in the “refine result page” of Scopus, it was possible to focus the research on the most widely adopted valuation and assessment methods and models. In particular, a search was conducted on the wealth of methods and models identified via the two main strings containing “hydrolog\* hazard and risk” and “hydrogeol\* hazard and risk”, respectively (Table A.1 and Table A.2). Table A.1 and Table A.2 display the results in terms of number of publications relative to the two searches conducted on hydrological vs hydrogeological hazard and risk, respectively and obtained two sub-sample of contributions, namely the first sub-sample and the second sub-sample. We then refined our search in each sub-sample and, among the keywords reported in Table A.1 and Table A.2, we selected those keywords, which are strictly related to methods and models, and regrouped these detailed categories into broader groups of methods. As to Table A.1, we fine-tuned our review of the first sub-sample based on the keywords: GIS and Geographic Information Systems; Monte Carlo Analysis and Monte Carlo Methods; Multivariate Analysis and Multivariate Analysis; Probability and Probability Distributions; Spatial Analysis and Spatial Distribution. As to Table A.2, we fine-tuned our review on the second-subsample based on the keywords: 3-D Numerical Modeling and 3D Modeling, Analytic Equations and Analytical Formulas; Consequence Analyses and Consequence Analysis; Decision Support and Decision Support Systems; GIS and Geographic Information Systems; Ground Penetrating Radar and Ground Penetrating Radar Systems; Mapping and Maps; Numerical model, Numerical Modelling and Numerical Models; Persistent Scatterer Interferometry and Persistent Scatterer Interferometry (PSI); Stochastic Systems and Stochasticity; Surveying and Surveys. In this specific clustering, we excluded indeed keywords referring to generic topics, although related to hydrogeological or hydrological hazard and risks, such as Climate Change or Flash Flood, or related to specific territories, such as Canada or Brazil.

As to the two strings related to the assessment of hydrological and hydrogeological hazards and risks, 203 articles were analyzed in depth for this study, of which 168 related to hydrological hazard and risk (first sub-sample) and 35 pertained to hydrogeological hazard and risk (second sub-sample), respectively.

### 3. Meta-analysis

#### 3.1 Emerging trends in literature

The literature on the topic of water-related hazards and risks was first analyzed according to time and locality trends (764 documents). According to our search, the first contributions to their assessment appeared in 1970 (Figure 2). This topic, however, has only been mentioned sporadically until 1992. Starting from this date, at least one contribution per year has been recorded in the Scopus database. From 2001, the number of published works increased progressively: in 2005, the publication rate started to be around 10 per year, and it doubled starting from 2011, and finally tripled after 2014.

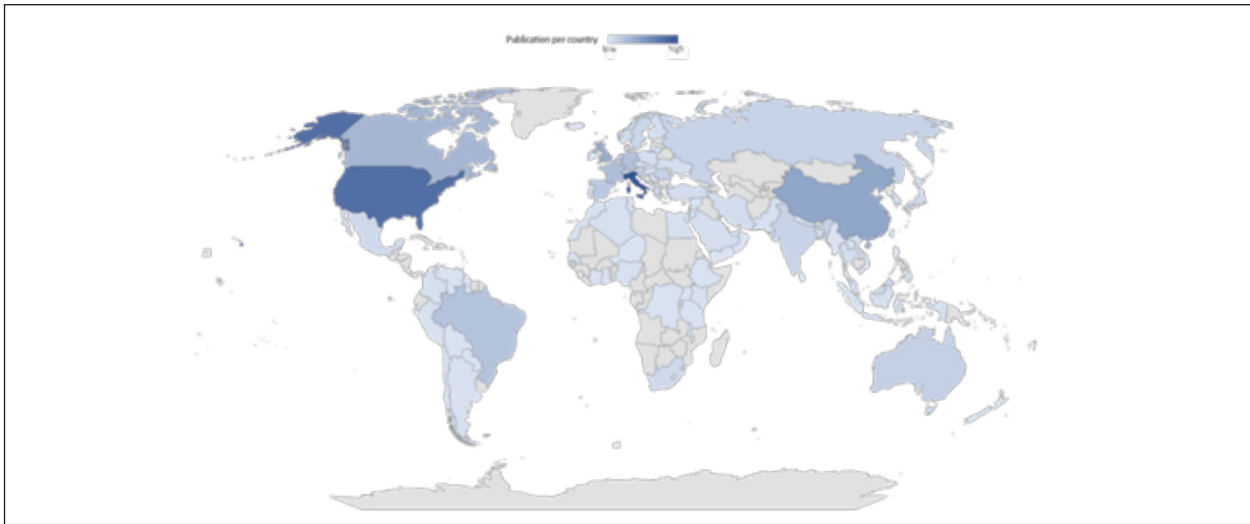


**Figure 2.** Number of publications by year obtained by quoting TITLE-ABS-KEY ( ( “hydrolog\* risk” OR “hydrolog\* hazard” OR “hydro-hazard” OR “hydrogeology\* risk” OR “hydrogeology\* hazard” OR “geo-hydrogeolog\* risk” OR “geo-hydrogeolog\* hazard” OR “water-related risk” OR “water-related hazard”) AND ( “assessment” OR “evaluation” OR “valuation” ) ).

From a country perspective (Figure 3), half of the contributions illustrate and discuss research conducted in Europe (51%). In particular, 17% of the documents resulting from the search refer to the Italian territory that is naturally characterized by instability phenomena, due to its geological, morphological and hydrographic characteristics. About one-fourth of the documents report research conducted in America (24%), whereas 20% of the documents focus on Asia. Of the remaining 6%, 4% refers to Africa and 2% to Oceania.

#### 3.2 Hydrological hazard and risk assessment

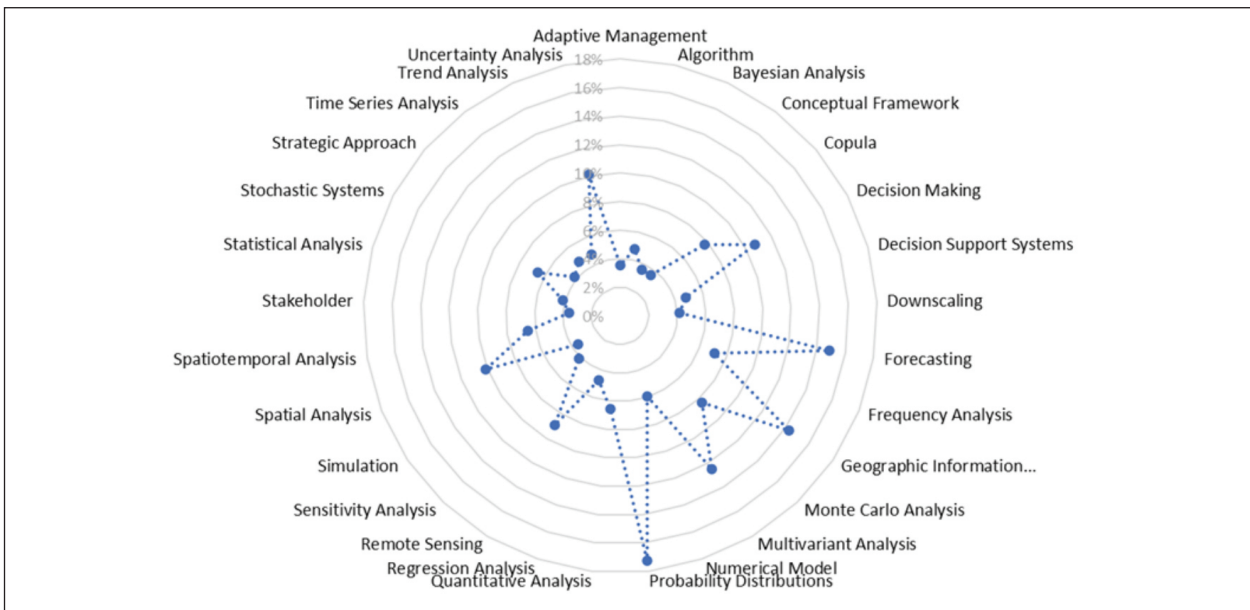
Risk is a multi-faceted concept and requires a significant effort to develop assessment tools, which can guarantee an increase in the coherence among the value systems underlying different policy objectives. The aim of this section is precisely devoted to investigating in-depth all the methodologies proposed in the literature and reporting some examples of their specific use in the evaluation of hydrological risk.



**Figure 3.** Number of publications by country obtained by quoting TITLE-ABS-KEY ( ( “hydrolog\* risk” OR “hydrolog\* hazard” OR “hydro-hazard” OR “hydrogeology\* risk” OR “hydrogeology\* hazard” OR “geo-hydrogeolog\* risk” OR “geo-hydrogeolog\* risk” OR “geo-hydrogeolog\* hazard” OR “water-related risk” OR “water-related hazard”) AND ( “assessment” OR “evaluation” OR “valuation” ) ).

The search in the Scopus database on the assessment of hydrological hazards and risks resulted, as previously mentioned, in a first sub-set of 168 publications (Figure A2 in the Appendix). To provide a general overview of the magnitude of this domain, we redirect the reader to Table A.1 and Figure 4.

In what follows, we report some exemplary articles to account for the variety of research interests testified in the literature. In particular, exemplary articles were chosen based on the multiple keywords they listed. This choice was made to account for contributions that cover various perspectives, issues, and dimensions on hydrological hazard and risk assessment, and, consequently, can provide innovative and exhaustive examples (to the authors’ best knowledge) of applications to real-world case studies.



**Figure 4.** Publications (in percentage terms) grouped by specific keywords related to methods/models adopted in the assessment of hydrol\* hazard and risk.

Probability analysis is a common technique used in risk assessment, that allows the analysts to combine normal trends and deviations for allocating probabilities of events occurring. From our literature review, it emerged that in 29 publications out of 168 (i.e., 17% of the first sub-set) Probability and Probability Distributions are used. Hariri-Ardebili (2017), for example, develops a hybrid parametric-probabilistic-statistical approach to estimate the failure probability as a function of dam size, material distributional models and external hydrological hazard. The proposed model is used for the preliminary design and evaluation of two-dimensional gravity dam models. Dehghani et al. (2019), instead, provide a hydrological drought forecasting approach based on copula functions and take meteorological droughts registered in the past as the main predictor. Another very common analysis adopted in 17 publications out of 168, associated as well with probability models, is uncertainty analysis. As an example, Fan et al. (2021) investigate various sources of uncertainty for different hydrological risks through a factorial multi-model Bayesian copula. Bayesian Analysis guides the statistical inference process, enabling the combination of previous knowledge about a population parameter with evidence from data in a sample. Excluding Fan et al. (2021), this approach is adopted in 5 additional contributions (i.e., 4% of the first sub-set). In addition, Guo et al. (2018) advance traditional flood risk analysis by proposing a univariate and copula-based bivariate hydrological risk framework that incorporates both flood control and sediment transport. They implement a Monte Carlo-based algorithm to quantify the sampling uncertainty associated with univariate and bivariate hydrological risk analyses for two catchments located in the Loess Plateau, a sandy region in China. The two contributions by Fan et al. (2021) and Guo et al. (2018) are two examples that well-represent the use of statistical methods to predict the likelihood of an event/case and assess hydrological risk, through a specific algorithm (as in 2.3% of the first sub-sample publications) and a quantitative analysis (implemented in 3.1% of the first sub-sample contributions). In particular, Fan et al. (2021) and Guo et al. (2018) used copulas (adopted in 13 publications of the first sub-sample) for a multivariate distribution. In particular, in addition to Fan et al. (2021) and Guo et al. (2018), 21 publications focus on multivariate distributions (i.e., 13% of the first sub-sample considering the keywords “Multivariate Analysis” and “Multivariate Analysis”) to account for different dependencies among variables. Conversely, Monte Carlo simulations, a class of computational algorithms that are grounded in repeated random sampling, are adopted in 14 documents out of 168 (i.e., 8% of the first sub-sample) to generate draws from a probability distribution.

Stochastic processes are implemented in 11 documents (i.e., 7% of the first sub-sample) and are generally used to assess climate effects and related hydrological risks (see e.g., Alodah and Seidou, 2020, 2019; Aranda and García-Bartual, 2020; Kuchar and Broszkiewicz-Suwaj, 2022; Leitão et al., 2017; Núñez et al., 2016). In particular, Alodah and Seidou (2019) assess the likelihood of different future states in terms of climate change impacts, by generating a large number of representative climate projections, using weather generators calibrated with regional climate models. Subsequently, they correct the raw projections obtained via downscaling techniques (reported in 7 documents, i.e., 4% of the first sub-sample), i.e., procedures to infer finer-scale information from large-scale ones.

Statistical analyses (quoted in 7 documents, i.e., 4% of the first sub-sample) are widely implemented in the assessment of natural hazards, and specifically in the assessment of the so-called “water hazards”, caused by extreme hydrologic events (see e.g., Aranda and García-Bartual, 2020; Núñez et al., 2016).

In 24 publications (i.e., 14% of the first sub-sample considering GIS, Geographic Information Systems, Maps, Spatial Analysis and Spatial Distribution), GIS and spatial analysis are adopted for the assessment of hydrological hazards and risks, which largely benefits from the analyzes of geographically referenced information and data. Alam et al. (2021) and Bakhsh et al. (2020), for example, use GIS for flood risk analysis. Specifically, Alam et al. (2021) use eighteen morphometric parameters derived from GIS to develop a forecasting model of flash floods that accounts for runoff volume, flow velocity, and inundation depth scenario, whereas Bakhsh et al. (2020) adopt GIS and simulation tools to analyze the parameters and predict the probability of the occurrence of a flood. In this respect, it is worth mentioning that forecasting models are quoted in 7% of the documents in the first sub-sample if we include also Ensemble Forecasting, Flood Forecasting and Weather

Forecasting as keywords. In addition, Cai et al. (2016) use spatial analysis for the assessment of community resilience to coastal hazards in the Lower Mississippi River Basin (LMRB) region in southeastern Louisiana. Through a regression analysis (i.e., a specific statistical method implemented in 7 other documents, with a total of 5% of applications in the list), they examine the relationship between community resilience and socio-environmental indicators. Lemus-Canovas et al. (2019) combine spatial knowledge and regression analysis for the management of hydric resources in the Eastern Pyrenees. They used numerical models, based on atmospheric patterns during the winter season (November–May) between 1990 and 2015, to provide 12 circulation weather types for the development of mean daily precipitation and daily precipitation probability maps. Numerical models, implemented in 10 contributions (i.e., 6% of the first sub-sample) are adopted for example by Greco and Pagano (2017) for forecasting and alarming exposed populations in case of catastrophic events. Prediction of extreme events is also the focus of the work by Diodato et al. (2022). Starting from time series analysis, they identify damaging hydrological hazard-prone areas that exceed warning and alert thresholds. Similarly, Belloni et al. (2021) use satellite altimetry water level data (i.e., a key technique to measure water level change) to set-up a consistent and up-to-date river discharge dataset by means of rating curves for different sites across the world. Long continuous river discharge time series obtained are used to conduct trend analysis, meant to identify patterns or trends in extreme hydrological events. According to Belloni et al. (2021), the dramatic increase in global warming and climate change has given impetus to both trend analysis, adopted in 8 publications (i.e., 5% of the first sub-sample) and simulation models, basically used for drawing predictions based on physical prototypes and quoted in 6 contributions (i.e., 4% of the first sub-sample). Among the contributions focusing on trend analysis and simulation models, Merino et al. (2018) and Grimaldi et al. (2022), deserve a mention. In detail, Merino et al. (2018) propose a novel definition of “extreme precipitation event” via analyses based on hourly precipitation, to record both intense precipitation events over a very short period and very persistent rainfall events that generate significant accumulated precipitation over several days. Both these events represent challenging hydrologic hazards, which are not considered in the definition of extreme precipitation events measured on a daily time scale. Similarly, in the domain of frontier forecasting, Grimaldi et al. (2022) focus on continuous hydrologic modelling to improve the rainfall-runoff transformation and provide policymakers with more effective output information for risk assessment, by testing eight rainfall models. To explore further the topics covered in the two contributions by Merino et al. (2018) and receive a complete overview of applications, we, indeed, suggest starting from the state-of-the-art review by Bayazit (2015).

It is worth noting, though, that the intense development of advanced technologies and research has increased the number of analyses that use satellites or drones to detect and monitor the physical characteristics of territories. Within this context, remote sensing is widely adopted (15 documents out of 168) for analyzing the hydrological risk or hazard (see e.g., Khanal et al. 2019, Sheffield et al. 2018, Barbara and Helmut 2019).

Paliaga et al. (2019) integrate spatio-temporal analysis (adopted in 11 out of 168), into a spatial multicriteria analysis technique. Multicriteria analysis is a family of methods that combine both quantitative and qualitative data and stakeholders’ opinions and values to make a rank, sort or classification of possible alternatives that respond to a specific objective. In this work, Paliaga et al. (2019) combine descriptive parameters to obtain a priority scale among 21 small catchments in Mediterranean basins. The scale is used to plan risk mitigation interventions, starting with the more critical catchments, then focusing economic resources primarily on them and obtaining an effective prevention strategy.

The involvement of stakeholders in the evaluation of hydrological risk is increasing (de Andrade and Szlafsztein, 2020; Hynds et al., 2018; Luedeling et al., 2015; Paneque Salgado and Vargas Molina, 2015; Sermet et al., 2020; Shelton et al., 2018). For instance, the work of Shelton et al. (2018) aims to explore alternative governance scenarios, by using a role-playing game to translate focus group sessions into a quantitative model algorithm. Sermet et al. (2020) apply a web-based decision support tool for hydrological multi-hazard analysis while employing gaming techniques to introduce a competitive element. The serious gaming environment provides functionalities for intuitive

management, visualization, and analysis of geospatial, hydrological, and economic data to support stakeholders in the decision-making process regarding hydrological hazard preparedness and response. Mondino et al. (2020) focus on individuals' awareness related to hydrogeological risk by collecting empirical data on human behavior dynamics during past debris flows. Then, by looking at more general keywords, such as "decision making", we verified the completeness of our analysis. Paliaga et al. (2019) and Albulescu et al. (2022) adopt multi-criteria approaches to assess hydrological risk mitigation strategies and hydrological vulnerability, respectively. In addition, Kundzewicz et al. (2017) investigate flood hazard projections over Europe to detect potential sources of a discrepancy, whereas, on the one hand, Klein et al. (2021) discuss and compare different approaches to estimate projections of future extreme rainfall rates and, on the other hand, Greco and Pagano (2017) analyze predictive models accuracy and characteristics to improve Early Warning Systems (EWS), efficacy and Sánchez-García et al. (2022) improve the accuracy of predictions of S-ClimWaRe, a predictive tool, used to support water reservoirs management in Spain. By contrast, Hou et al. (2021) focus on ecohydrological sensitivity and the factors influencing it at a seasonal scale. With respect to stakeholders' and actors' involvement in research devoted to supporting decision-makers in risk mitigation and management, it is worth mentioning the contributions by Xiao et al. (2017), Lerner et al. (2018), Shelton et al. (2018), Sermet et al. (2020).

To assess flood hazards, Xiao et al. (2017) propose a valuation framework grounded in multi-criteria analysis and incorporating GIS, fuzzy analytic hierarchy process, and spatially ordered weighted averaging method. In addition, Lerner et al. (2018) identify factors accruing water risks in megacities, such as Mexico City, via interviews with city officials to understand their different perspectives on the dynamics of socio-hydrological risk, including flooding and water scarcity. By contrast, Shelton et al. (2018) develop a role-playing game to investigate the perspective and experience of residents in reducing their exposure to risk in an agent-based model to inform water risk governance in Mexico City; whereas Sermet et al. (2020) develop a decision support system to inform planning targeted to mitigate hydrological disaster risk at community level.

Finally, 12 contributions out of 168 focus their analysis on the role of strategic approaches to the management of water-related hazards and risks, using conceptual frameworks and adaptive management techniques. As an example, Haque and Jakariya (2023) adopt an adaptive management and planning approach to determine the interactive dynamics between hydrogeology and human conditions. Mark et al. 2017 apply a multi-level conceptual framework focused on the coupled biophysical and social determinants of water access and hydro-social risks in the context of glacierized watersheds.

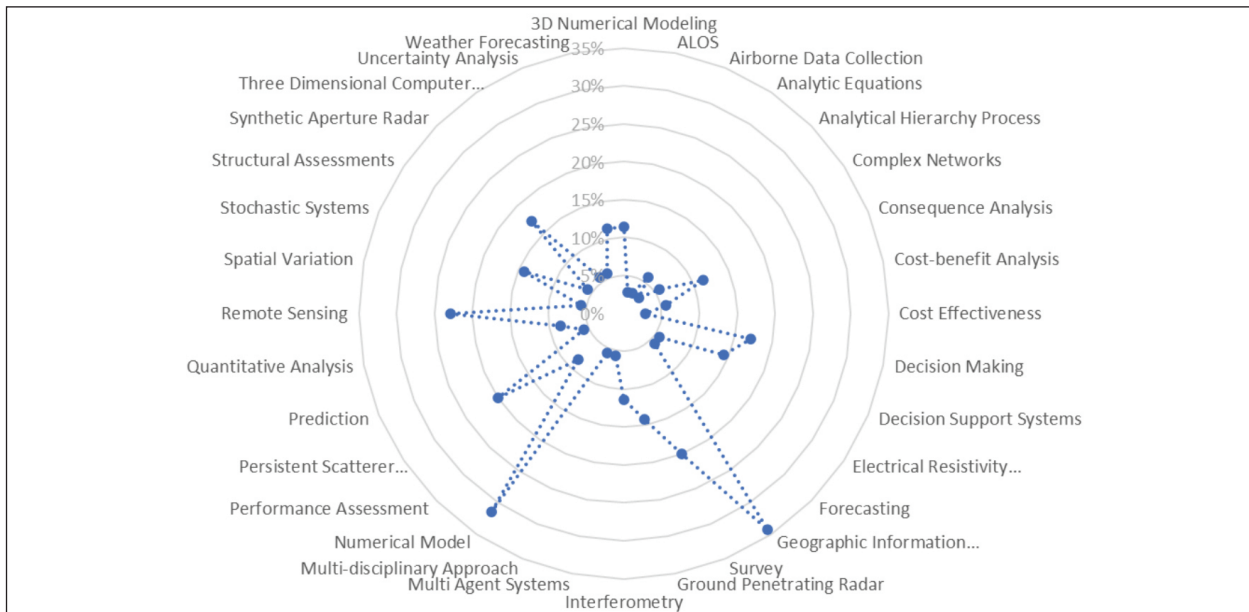
### **3.3 Hydrogeological hazard and risk assessment**

From filtering the literature search targeted to "hydrogeological" hazard and risk assessment, as mentioned in Section 2, we obtained a second sub-sample of 35 publications starting from 2015 (Figure A3 in the Appendix).

To provide a general overview of the magnitude of this research domain, we redirect the reader to Table A.2 and Figure 5.

By direct inspection of Table 1, in which contributions are listed by first author's alphabetical order, some considerations emerge. The vast majority of authors are Italian, and the case studies analyzed are located in Italy. This predominance can be explained, as previously mentioned (see Section 1 and Section 3.1), because of the specificity of the Italian territory and the national legislation that introduced the term hydrogeological.

According to the risk components analyzed in these contributions, we observe a predominance of analyses on erosion and flooding risks, i.e., 7 and 5 publications out of 35, respectively, among which we mention Bianchini et al. (2015), Covelli et al. (2020), D'Alpaos and Bottacin (2021), and Mancini et al. (2017); whereas combination of both are investigated in 5 documents out of 35 (see e.g., Pour and Hashim, 2017; Ellena et al. 2020). Extreme weather or precipitations are also covered by 3 documents (see e.g., Gentilucci et al., 2020). Other phenomenon are explored in few other publications, such as avalanches (Andrés et al., 2021), earthquakes (Khan et al., 2022; Mele et al., 2022), soil sealing (G. Pristeri et al., 2020), rise of groundwater



**Figure 5.** Publications (in percentage terms) grouped by specific keywords related to methods/models adopted in the assessment of hydrogeol\* hazard and risk.

(Colombo et al., 2018; Gattinoni & Scesi, 2017), groundwater leakage (Merisalu et al., 2021, 2023) and aquifer recharge (Zhu et al., 2020). Some contributions, nonetheless, generally speak about hydrogeological risks (i.e., Mondino et al., 2020; Pomatto et al., 2022).

Different objectives have guided the authors of the set of 35 publications in the analysis and assessment of hydrogeological hazard and risk. Many authors proposed a detailed assessment of the territory under analysis to assist urban planners and local policymakers in identifying the most critical areas and reducing hydrogeological damages (11 contributions out of 35, i.e. 31% of the second sub-sample). For example, Busico et al. (2020) proposed a methodology for management plan implementation and targeted preventive actions for those areas that are more susceptible to runoff generation. Caleca et al. (2022) implemented a quantitative risk assessment procedure to map the susceptibility hazard of slow-landslides in Central Italy. Similarly, Cardarilli et al. (2019) identified the most prone areas in Southern Italy through the implementation of stochastic analyzes and the use of spatial variables, whereas Covelli et al. (2020) obtained a map of soil erodibility through the use of a Revised Universal Soil Loss Equation. De Finis et al. (2018) and Colombo et al. (2018) simulated through numerical models the hydrogeological hazard, respectively, of an archaeological site and an underground infrastructure in Northern Italy. In addition, El Ganainy et al. (2016) investigated the risk of instability in karst cavities and Ellena et al. (2020) developed a risk score that can be used to rank assets in a screening process. Gentilucci et al. (2021) analyzed the susceptibility of territories but focused on those areas where no instability had been detected in the past. Finally, Pour and Hashim (2017) combined remote sensing data and AHP to implement landslide susceptibility maps and Pristeri et al. (2020) mapped and assessed soil sealing through the Biotope Area Factor Index, to support the definition of mitigation and compensation measures.

Other contributions provide a detailed analysis of a specific hydrogeological risk (17 papers out of 35, i.e. 49% of the second sub-sample). It is worth mentioning both Bianchini et al. (2015), who analyzed the erosional activity beneath the tunnel floor caused by water flow and the associated solid transport, and Figueroa-Miranda et al. (2020) who investigated the Structurally-Controlled Differential Subsidence evolution over the last fourteen years in the city of Morelia in Mexico. With respect to the Italian context, Gattinoni and Scesi (2020) assessed tunnel inflow and its impact on water resources; Gentilucci et al. (2020) calculated extreme precipitation indices in Central Italy from 1961 to 2017, Lentini et al. (2020) collected local data through smart technologies related to a road exposed to landslides in Southern Italy, Mazza et al. (2015) proposed a recalibrated relationship for retrieving precipitation from radar data in Tuscany (Italy). Mancini et al. (2017) proposed a methodology to estimate the average expected damage to residential buildings caused by flooding in the city of Olbia. Mele et al. (2022) analyzed the combined effects of

landslides and earthquakes on reinforced concrete (RC) buildings in Moio della Civitella, a city located in the Campania Region (Southern Italy). Pasculli et al. (2022) modelled the surface water flow dynamics of the Pescara River Basin, located in Abruzzo (Central Italy). Pristeri et al. (2020) mapped and assessed soil sealing in the municipality of Padua (northern Italy) using the Biotope Area Factor index. In Porfido et al. (2016) and Pomatto et al. (2022), a picture of the current condition of exposure to hydrogeological risk of terraced landscapes in the Piedmont Region (Northern Italy) and the Vesuvius and Salerno areas (Southern Italy), respectively. The former developed an expert-based assessment approach, which included historical analyses and field surveys, whereas the latter adopted a multidisciplinary approach developed in a GIS environment, and based on bibliographic and archival document investigation, besides geologic-geomorphologic analyses. By contrast, Sciuto et al. (2022) used GIS – based multicriteria decision analysis and remote sensing to map and quantify the spatial distribution in Calantino (Sicily) of an invasive species (i.e., the giant reed), which increases hydrogeological risk by creating obstructions to regular water flows in riverbeds. Li and Wang (2023) develop a non-parametric spatio-temporal Bayesian compressive sensing (ST-BCS) method for interpolation of spatio-temporally varying (but sparsely measured) precipitation data in the spatial domain. Zhu et al. (2020) performed statistical analyses on a large dataset consisting of hydrogeologic information, piezometric records, and land subsidence measurements carried out by Persistent Scatterer Interferometry and levelling to investigate aquifer recharge management.

Several authors focused indeed on the prioritization of adaptation measures. In this domain, Andrés et al. (2021) deserve a mention as they evaluated different solutions to mitigate hydrogeological risk. In addition, Gattinoni and Scesi (2017) investigated both the rising trend of the water table in the urban area of Milan (Northern Italy) and its impacts on increasing hydrogeological hazards for existing underground structures (e.g., metro tunnels, etc.) and discussed the effectiveness of different solutions for adaptation and risk mitigation. Merisalu et al. (2023, 2021) proposed an integrated framework to assess the profitability of interventions to mitigate hydrogeological risk and reduce potential damages to underground facilities caused by groundwater drawdown and subsidence.

Differently from other scholars, Sapienza and Falcone (2016), Falcone and Sapienza (2017), and Mondino et al. (2020), centered their research on the trustworthiness of information sources about hydrogeological phenomena and how people perceive potential threats and their awareness of and preparedness to hydrological hazards and risk change over time. Instead, Nascetti et al. (2015) propose a methodological paper that illustrates the advantages and drawbacks of the radargrammetric approach compared to the InSAR technique for DSM generation, and outline their possible joint role in mapping hydrogeological risk and strategic emergency management.

After this preliminary analysis, we clustered 8 different types of methods or models applied. The majority of this is represented by quantitative approaches, whereas a minor share (about 2%) is constituted by qualitative or quali-quantitative methods, i.e. multicriteria evaluation as defined by (Munda et al., 1994). In particular, the following authors use geomatics techniques to detect and/or monitor hydrogeological risks: Bianchini et al. (2015); Pratesi et al. 2015; Pour and Hashim (2017); Figueroa-Miranda et al. (2020); Khan et al., (2022); Lentini et al. (2020); Mele et al. (2022); Nascetti et al., (2015); Zhu et al. (2020). A great number of analyses use numerical models, both 3D and 2D, to represent the specific phenomenon under analysis: El Ganainy et al., (2016), Gattinoni and Scesi (2017), Colombo et al. (2018), De Finis et al. (2018), Pasculli et al. (2022), Li and Wang (2023; Mazza et al. (2015). Many authors indeed approach hydrogeological risk mainly through spatial analysis, such as Busico et al. (2020), Covelli et al. (2020), Gattinoni and Scesi (2020), Pristeri et al. (2020) sometimes combining it with other methodologies. Various prediction models can also be found in the literature. Then, a specific agent-based prediction model was used by Sapienza and Falcone (2016) and Falcone and Sapienza (2017) to simulate agents' behaviors when facing hydrogeological risks. Cost-Benefit Analysis is used by Merisalu et al. (2023, 2021) to evaluate risk mitigation strategies. Multicriteria analysis and a set of indicators are adopted by D'Alpaos and Bottacin (2021) and Andrés et al. (2021), respectively, to evaluate risk mitigation strategies. Multicriteria analysis is also combined with other techniques. Sciuto et al. (2022) coupled multicriteria analysis with GIS to support the development of a watercourse maintenance plan, while Pour and Hashim (2017) combined it with remote sensing to implement landslide susceptibility mapping. Finally, as previously mentioned, surveys were administered by Pomatto et al. (2022) and Mondino et al. (2020) to investigate how the awareness of hydrogeological risk and, in turn, preparedness change over time.

**Table 1.** Publications obtained from the literature search for hydrogeological hazard and risk, ranked by first authors in alphabetical order.

Reference	Analyzed issue	Method or modelling technique
Andrés et al. 2021	Rock falls and snow avalanches	Monitoring Indicators of climate change mitigation and biodiversity provision are used to analyzed different post-operation Nature-based Solution (NBS) projects.
Bianchini et al. 2015	Alterations in the water flow regime, flooding and severe damages to structures (erosional activity)	Ground Penetrating Radar (GPR), a high-frequency electromagnetic technique, is used to identify the erosional activity beneath a tunnel floor caused by water flow and the associated solid transport.
Busico et al. 2020	Short runoff generation	Soil and Water Assessment Tool (SWAT) uses input data of climate prediction models, soil characteristics and land use scenarios to forecast their effect on hydrological processes.
Caleca et al. 2022	Slow moving landslides	A landslide quantitative risk assessment (QRA) is used for slow-moving landslides, based on the application of the equation risk = hazard (H) × vulnerability (V) × exposure (E) is assigned to each cell (1 km <sup>2</sup> size).
Cardarilli et al. 2019	Slope Instability	A back-analysis is conducted for assessing hydrogeological instability by applying spatial analysis and quantifying the hydrogeological hazard through unbiased estimators.
Colombo et al. 2018	Hydrogeological hazard for the underground infrastructures caused by the rise of the groundwater level	A 3D numerical model of the groundwater flow was turned out into a stochastic model to assess the hydrogeological hazard (in probabilistic terms) for the underground infrastructures.
Covelli et al. 2020	Erosive process	An erosion prediction model, based on a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) is used to obtain a map of the erodibility of any basin, from which to derive the most vulnerable areas.
D'Alpaos and Bottacin 2021	Hydrogeological	An absolute Analytic Hierarchy Process (AHP) model is applied in the prioritization of hydrogeological risk mitigation strategies.
De Finis et al. 2018	Slopes evolution and the landslides triggering	2D and in 3D numerical modeling are used to simulate the triggering phenomena and to evaluate the stability conditions in archaeological sites.
El Ganainy et al. 2016	Karst cavities stability	A numerical study is performed to develop a set of geographic information system cavity-collapse geohazard maps.
Falcone and Sapienza 2017	Complex weather scenarios	An agent-based model is applied to consider how trustworthy the single source is with respect to each individual agent during weather extreme events.
Figueroa-Miranda et al. 2020	Structurally-Controlled Subsidence	Differential The SAR Interferometry techniques is used to detect and monitor land subsidence, using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer Interferometry (PSI).
Gattinoni and Scesi 2020	Tunnel inflow	Monitoring data are compared to the values forecasted through different approaches. Then, a stochastic approach is carried out, to assess the environmental hydrogeological risk arising from tunneling.
Gentilucci et al. 2021	Landslide	A Weight of Evidence (WoE) model-is used to calculate landslide susceptibility, using Geographic Information Systems (GIS) and mathematical operations between rasters.

Follow **Table 1**. Publications obtained from the literature search for hydrogeological hazard and risk, ranked by first authors in alphabetical order.

Reference	Analyzed issue	Method or modelling technique
Gentilucci et al. 2020	Extreme precipitation indices	Areal interpolations are performed by GIS software to spatialize extreme indices.
Khan et al. 2022	Liquefaction features on the surface due to earthquake	To track and delineate the internal architecture and coseismic changes in groundwater levels and/or pressures due to liquefaction, a ground-penetrating-radar (GPR) survey is carried out soon after an earthquake.
Lentini et al. 2020	Landslides on road network	Acquisition of local knowledge on issues related to landslide risk.
Li and Wang 2023	Precipitation	A non-parametric spatio-temporal Bayesian compressive sensing (ST-BCS) method is used to interpolate spatio-temporally varying, but sparsely measured, precipitation data in the spatial domain.
Mancini et al. 2017	Flood damage to residential buildings	A GIS-based toolbox used for the ex-ante evaluation of flood Expected Annual Damage (EAD) in an urban area.
Ellena et al. 2020	Risk of flood, landslides and avalanches over urban settlements and infrastructure systems in the mountain environment	The work calculates a risk score that can be used to rank assets for each municipality, where Risk (R) is described as a function of hazard (H), exposure (E) and vulnerability (V), which is in turn divided in sensitivity (S) and adaptive capacity (AC).
Mazza et al. 2015	Precipitation	Estimation of cumulative rainfall fields compared with coincident spatial rain gauge measurements. Then, an ordinary block kriging method is applied for rain gauge data spatialization.
Mele et al. 2022	Cumulating action of landslide and earthquake	The Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR) approach is used to monitor the evolution in time of the landslide. A non-linear static analysis procedure is implemented for the code-based seismic safety assessment, in two different scenarios (with or without landslide).
Merisalu et al. 2023	Groundwater leakage	A probabilistic cost-benefit analysis approach is used to assess the economic profitability of investing in different risk mitigation alternatives.
Merisalu et al. 2021	Groundwater leakage	A probabilistic risk estimation is adopted to assess the entire cause-effect chain from groundwater leakage to the consequences of damage. Additionally, expert elicitation is combined with data-driven and process-based methods.
Mondino et al. 2020	Hydrological hazards (in general)	A survey collects empirical data on human behavior dynamics due to past debris flows.
Nascetti et al. 2015	Hydrological and hydrogeological risks (in general)	A high-resolution SAR satellite imagery is adopted for DSM generation using an interferometric (InSAR) technique and a revitalized radargrammetric stereo-mapping approach.
Pasculli et al. 2022	Water flow of river basin	A mathematical-numerical models is applied to model the surface water flow dynamics.
Pomatto et al. 2022	Hydrogeological risk (general) of abandoning terraces	A survey is administered to experts to evaluate their perceptions about the landscape's historical elements and dynamics.

Follow **Table 1**. Publications obtained from the literature search for hydrogeological hazard and risk, ranked by first authors in alphabetical order.

Reference	Analyzed issue	Method or modelling technique
Porfido et al. 2016	Flooding and landslide	A bibliographic and archival documents investigation is used to perform geologic-geomorphologic analyses in GIS.
Pour Hashim 2017	Flooding and landslide	Remote sensing data are used to map geologic structural and topographical features. Then, an analytical hierarchy process (AHP) is implemented for landslide susceptibility mapping.
Pratesi et al. 2015	Seismic and hydrogeological risk assessment of historical buildings in urban areas	C-band medium-resolution Persistent Scatterer Interferometry (PSI) data from ERS-1/2, ENVISAT and RADARSAT-1 is used to establish a classification method preparatory to seismic and hydrogeological risk assessment of historical buildings in urban areas.
Pristeri et al. 2020	Soil sealing	The consolidated ecological urban index called Biotope Area Factor is adopted for mapping soil sealing. It expresses the ratio of the ecologically effective surface area in relation to the total land area according to land cover classes.
Sapienza and Falcone 2016	Different hydrogeological phenomena	An Agent-based model with an <i>ad-hoc</i> Bayesian trust model simulates cognitive agents that have to learn how their different information sources can be more or less trustworthy in different situations and with respect to different hydrogeological phenomena.
Sciuto et al. 2022	Flooding	A GIS-based multicriteria decision analysis is used to develop a watercourses maintenance plan to reduce the risk of streams flooding in valley areas and at intersections with infrastructure works, due to Giant reed (invasive species) in watercourses embankments. Its distribution is mapped through Remote Sensing (RS) techniques applied in GIS.
Zhu et al. 2020	Aquifer recharge	A large dataset is integrated and statistically analyzed based on hydrogeologic information, piezometric records, and land subsidence measurements carried out by Persistent Scatterer Interferometry and levelling.

## 4. Discussion

The analysis of the literature we conducted has shown that a variety of methods and models are implemented to assess hydrogeological and hydrological hazards and risks. Most of the publications used quantitative approaches, while an increasing amount recently made use of qualitative or quali-quantitative methods. These two ways of assessing hydrogeological/hydrological risk reflect the two approaches to facing it. On the one hand, the technical analysis of the impacts is the domain of engineers, geologists and hydrologists. Through quantitative and statistical models and generally, in specific territories, they often assess the effects of climate change and related hydrological and hydrogeological hazards and risks (see e.g., Núñez et al., 2016; Leitão et al. 2017; Gattinoni and Scesi, 2017; Alodah and Seidou, 2019 and 2020; Aranda and García-Bartual, 2020; Kuchar and Broszkiewicz-Suwaj, 2022), identify warning, damage and alert areas (see e.g., Belloni et al., 2021, Ellena et al., 2020; Diodato et al., 2022) and forecast phenomena (see e.g., Greco and Pagano, 2017; Lemus-Canovas et al., 2019; Busico et al., 2020).

On the other hand, strategic planning and governance represent a wide context of analysis of hydrological and hydrogeological risk. Concerning the latter, increasing attention is being paid to socio-cultural aspects, the development of risk maps, the direct involvement stakeholders in decision-making processes and the development of sustainable awareness in citizens (see e.g., Luedeling et al., 2015; Paneque Salgado and Vargas Molina, 2015; Shelton et al., 2018; Ciampalini et al., 2019; Hynds et al., 2018; Guido Paliaga et al., 2019; Buurman et al., 2020; de Andrade and Szlafsztajn, 2020; Mondino et al., 2020; Sermet et al., 2020; D'Alpaos and Bottacin, 2021; Tananaev et al., 2021; Albuлесcu et al., 2022; Paliaga et al., 2022; Pomatto et al., 2022; Sciuto et al., 2022). To this end, qualitative and quali-quantitative methods are often the only way to assist public bodies, decision-makers and policymakers in analyzing the effects of hydrogeological/hydrologic risk and defining sustainable and prior actions and strategies to address these issues. Their ability to also use narratives, qualitative data, and individual or group preferences makes possible to expand the perspective on this topic and include different competences and knowledge. Moreover, they often represent replicable methodologies that can be applied in different contexts and for different hydrogeological/hydrological risks by adjusting properly and/or integrating the set of criteria or the input data.

Concerning the assessment of hazards and risks, the analysis of the literature does not allow us to generalize and find trends. This is because authors often refer to both hazard and risk in their contributions or use the terms as synonyms to some extent. This definitional issue is a long-standing problem. In 1979, the United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) tried to avoid the conflicts of nomenclature that emerged for example in seismic studies in UNESCO publications and UNDRO reports on Disaster Prevention and Mitigation and proposed to establish a set of terms that could be widely adopted and easily understood. As a result of this review process, UNDRO classified hazard and risk as two different concepts. According to UNDRO, hazard is “the probability of occurrence within a specific period of time in a given area of a potentially damaging natural phenomenon”, whereas risk is “the expected number of lives lost, persons injured, damage to property and disruption of economic activity due to a particular natural phenomenon” and, in turn, it accounts for the value of elements at risk (UNDRO, 1979; p.5). Consequently, the identification and assessment of water-related hazards should be preliminary to the assessment of water-related risks. Methods and models for the assessment of water-related hazards are quite robust, but there might be a deficiency in terms of quantity and quality of basic data. Data requirements should be better formulated and detected gaps closed.

We also investigated the main aspects involved in the assessment of hydrogeological and hydrological risk and hazard as they emerged from the literature review. In particular, aspects of high relevance in the existing literature are listed in Table 2. This list can be used as a check list for the criteria to be considered in the assessment of hydrological and hydrogeological risk according to the specific context of the analysis and the risk/problem to be evaluated, as well as to the time of evaluation (i.e., before, during and after the event or the phenomenon, respectively called the *ex-ante*, *in-itinere* or *ex-post* evaluation).

**Table 2.** Relevant aspects/criteria emerging from the literature review

Aspects/Criteria	Description	References
Carbon sequestration	Capacity of soil to sequestered carbon	Andrés et al. 2021
Soil physical resilience	Erosion, stability, runoff and holding capacity of the soil	Andrés et al. 2021; Busico et al. 2020; Caleca et al. 2022; Cardarilli et al. 2019; Colombo et al. 2018; Covelli et al. 2020; El Ganainy et al. 2016; Figueroa-Miranda et al. 2020; Gentilucci et al. 2021; Pasculli et al. 2022; Pour and Hashim 2017; Alam et al. 2021; Paliaga et al. 2019; Albuлесcu et al., 2022; Pamukcu et al., 2016; Diodato et al. 2022; Hou et al. 2021; Xiao et al. 2017
Soil fertility	Total nutrients in the soil	Andrés et al. 2021; Pamukcu et al. 2016
Biodiversity provision	Flora and fauna species diversity and exotic and invasive ones	Andrés et al. 2021
Biological resilience	Food web stability	Andrés et al. 2021
Vegetation cover	Vegetation cover of both woody and non-woody plants	Albuлесcu et al. 2022; Andrés et al. 2021; Covelli et al. 2020; Ellena et al. 2020; Pour and Hashim 2017; Sciuto et al. 2022; Albuлесcu et al. 2022; Hou et al. 2021; Pamukcu et al. 2016
Wildfire risk	Wildfire risk based on the plant moisture, flammability and surface	Andrés et al. 2021
Ground motions, landslides location or inundation zone	Location of areas characterized by ground motions, landslides pr inundation zone (and their impact and velocity)	Bianchini et al. 2015; Caleca et al. 2022; Gentilucci et al. 2021; Mele et al. 2022; Cai et al. (2016); Paliaga et al. 2019; Albuлесcu et al. 2022; Greco and Pagano 2017; Pamukcu et al. 2016; Xiao et al. 2017
Cultural or protected sites of interest	Distance to risk areas from cultural and protected sites	Bianchini et al. 2015; Ellena et al. 2020; Pomatto et al. 2022
Slope and/or elevation	Gradient of slope or elevation	Busico et al. 2020; Covelli et al. 2020; Gentilucci et al. 2021; Pour and Hashim 2017; Cai et al. (2016); Paliaga et al. 2019; Albuлесcu et al. 2022; Cai et al., 2016;; Greco and Pagano 2017; Hou et al. 2021; Xiao et al. 2017;
Land cover	Land use and land cover distributions and typologies	Busico et al. 2020; Caleca et al. 2022; Covelli et al. 2020; Gentilucci et al. 2021; Ellena et al. 2020; Pomatto et al. 2022; Pour and Hashim 2017; Pratesi et al. 2015; Sciuto et al. 2022; Paliaga et al. 2019; Heng et al. 2016; Pamukcu et al. 2016; Isensee et al., 2021
Building or inhabitants distribution and characteristics	Distance to or density of risk areas from buildings/inhabitants	Caleca et al. 2022; Ellena et al. 2020; Mele et al. 2022; Mondino et al. 2020; Pomatto et al. 2022; Cai et al. (2016); Hynds et al. 2018; Albuлесcu et al. 2022; Heng et al. 2016; Pamukcu et al. 2016
Market value of buildings or land use	Market value of buildings, areas and land use	Caleca et al. 2022
Aquifers, Water or precipitation data	Hydraulic conductivity	Colombo et al. 2018; Gattinoni and Scesi 2017; Gentilucci et al. 2021; Gentilucci et al. 2020; Ellena et al. 2020; Pasculli et al. 2022; Pour and Hashim 2017; Sciuto et al. 2022; Bakhsh et al. 2020; Lemus-Canovas; Greco and Pagano 2017; Diodato et al. 2022; Belloni et al. 2021; Aranda and Garcia-Bartual 2020; Alodah and Seidou, 2020; Botai et al., 2018; Buurman et al., 2020; Kusangaya et al., 2018; Heng et al. 2016; Diodato et al. 2022; Hou et al. 2021; Isensee et al. 2021
Infrastructural network	Location of the infrastructural network	Colombo et al. 2018; Gattinoni and Scesi 2017; Ellena et al. 2020; Pour and Hashim 2017

Follow **Table 2**. Relevant aspects/criteria emerging from the literature review

Aspects/Criteria	Description	References
Extreme events	Location of extreme events	Gentilucci et al. 2021; Mondino et al. 2020; Pomatto et al. 2022; Buurman et al. 2020; Heng et al. 2016; Kusangaya et al 2018; Pamukcu et al. 2016
Sustainability topic awareness	Citizens' awareness about sustainability	Ellena et al. 2020; Mondino et al. 2020; Hynds et al. 2018; Buurman et al. 2020
Fault	Distance to fault	Pour and Hashim 2017
Location of waterways	of Distance or distribution of waterways	Pour and Hashim 2017; Alam et al. 2021; Paliaga et al. 2019; Albulescu et al. 2022; Pamukcu et al. 2016; Xiao et al 2017
Land loss	Soil consumption due to natural and artificial activities	Ellena et al. 2020; Cai et al. (2016); Paliaga et al. 2019
Damage cost	Damage cost affected by households/municipalities	Buurman et al. 2020

Table 2 reports the most relevant aspects/criteria that are included in many of the applications analyzed such as vegetation cover, soil physical resilience, and distribution, density and characteristics of buildings in a specific territory. By direct inspection of Table 2, we can identify some clusters that can be referred to as the “triple bottom line framework”, characterized by three components: social, economic, and environmental or ecological. As an example, among the above-listed criteria/aspects, the market value of buildings affected by hydrogeological/hydrological risk relate to an economic perspective, the distribution, density and population demographics to a social perspective, whereas soil resilience and fertility or vegetation refer to an environmental perspective.

Based on evidence reported in Table 2, environmental aspects/criteria are predominant in current literature. Nonetheless, as previously mentioned, the concept of sustainability grounds in three main pillars represented by the environment, economics, and the society. Our findings reveal indeed a literature gap to fill and the need for advances and insights in future applications and analyses. Specifically, accounting for socio-economic components should represent a priority in future research. To address the issue of sustainable risk management strategies and policies, academics and practitioners should consider their environmental, economic, and social dimensions and impacts on local territories and communities. Indeed, the 2030 Agenda for Sustainable Development and the 17 Sustainable Development Goals (set by the United Nations) express the UN representatives' commitment to “achieving sustainable development in its three dimensions – economic, social and environmental – in a balanced and integrated manner” (United Nations, 2015b). Nevertheless, our findings reveal that economic and social aspects/criteria are little accounted for in the assessment of water-related hazard and risk mitigation strategies. To support our conclusion, we interviewed a panel of experts in the domain of water-related hazards and risks, to assess the importance of environmental, economic, and social criteria in informing risk assessment and mitigation strategies. Following D'Alpaos & Andreolli, 2020 and De Felice et al., 2018, we implemented a methodological approach that combines a bibliometric analysis and the Analytic Hierarchy Process (AHP, proposed by Saaty in the Eighties (Saaty, 1980)). In detail, we developed a simple AHP model to rank the three above-mentioned criteria by relative importance. We identified a group of nine experts among international academics and administered them via a Delphi-survey process a questionnaire to elicit the criteria relative importance. The AHP permits to evaluate quantitative and/or qualitative criteria on the same measurement scale, and their relative importance is determined through pairwise comparisons expressed in semantic judgments. These judgements are then converted into numerical values according to Saaty's fundamental

scale (Saaty, 2000; Saaty & Peniwati, 2012; Saaty, 1980). In detail, we opted for a Delphi survey process to collect data from respondents and easily deal with potential divergent opinions and thus create consensus on the hierarchy and the relative importance of environmental, economic, and social criteria. The Delphi process here implemented resulted in a two-round survey. First, we developed the questionnaire according to usual AHP elicitation questions (Figure 6). In the first round, the questionnaire was sent to the experts and responses were analyzed. In the second round, descriptive statistics were reported to the experts along with the cut-value of the median for agreement (i.e., 51%) and consensus was reached. Our results show that although experts attribute an almost equal relative importance to environmental criteria (i.e., 0.44) and economic criteria (i.e., 0.42), nonetheless social criteria prove a non-negligible relative importance (i.e., 0.14). Indeed, the criteria final ranking in terms of relative importance in informing risk assessment and policy design: environmental criteria, economic criteria, and social criteria. Due to the undoubted importance of economic and social criteria in informing public decision processes meant to mitigate water-related risk, it emerges an urgent need to fill the gap ascertained in the literature in order to support policy makers and public decision-makers.

In this context, Multiple-Criteria Decision Aiding (MCDA) methods are promising in accounting for the various stakeholders and objectives, often conflicting, involved. MCDA provides a proper theoretical and methodological framework to address the complexity of economic, social, and environmental factors, that characterize the design of water-related risk mitigation strategies and policies (D’Alpaos & Bottacin, 2021). In addition, as MCDA is meant to support the decision-maker in structuring the decision problem and identifying the different stakeholders and actors involved (whose stakes are high and may have conflicting objectives), the opportunity offered by multicriteria techniques of accounting for actors’ and stakeholders’ opinions and values, can enhance the legitimacy, accountability, and transparency of public decision processes. Nonetheless, an important factor in the assessment of risk is time. In this respect, MCDA approaches do not focus specifically on the time dimension and the effect of time on value judgements and criteria and sub-criteria definition. To address the time issue, MCDA approaches can be combined with other methods or models, which account for the time dimension such as Cost-Benefit Analysis. Some authors have already implemented MCDA approaches in combination with other methods and tools (e.g., Pamukcu et al., 2016; Paliaga et al., 2019; D’Alpaos and Bottacin, 2021; Albuлесcu et al., 2022; Sciuto et al., 2022). Advances regarding the inclusion in the structuring phase of the decision problem of focus groups and interviews to stakeholders have been already proposed in some contributions (e.g., Luedeling et al., 2015; Paneque Salgado and Vargas Molina, 2015; Hynds et al., 2018; Shelton et al., 2018; Ciampalini et al., 2019; Buurman et al., 2020; de Andrade and Szlafsztein, 2020; Mondino et al., 2020; Sermet et al., 2020; Tananaev et al., 2021; Paliaga et al., 2022; Pomatto et al., 2022).

In the light of the above considerations, to provide a valuable and useful support to decision-makers and policymakers, a deep investigation of the economic and social aspects related to the implementation of risk mitigation strategies should be promoted in current and future research. In addition, as investments in structural and non-structural solutions require a fairly large initial expenditure, these investments are undertaken in sequential phases due to the persistent lack of public financial resources. Consequently, it is crucial ranking investments by priority of interventions, which turn involves considering economic, social, and environmental concerns.

With respect to goal, please express your opinion on the relative importance of environmental criteria vs economic criteria, environmental criteria vs social criteria, and economic criteria vs social criteria, by flagging on the blue cells below expressing your value judgements whether criteria in blue are more important than criteria in red and vice versa:

Environmental	Extreme importance	Very strong importance	Strong importance	Moderate importance	Equal importance	Moderate importance	Strong importance	Very strong importance	Extreme importance	Economic
Environmental	Extreme importance	Very strong importance	Strong importance	Moderate importance	Equal importance	Moderate importance	Strong importance	Very strong importance	Extreme importance	Social
Economic	Extreme importance	Very strong importance	Strong importance	Moderate importance	Equal importance	Moderate importance	Strong importance	Very strong importance	Extreme importance	Social

Figure 6. AHP elicitation questions, phrased according to Saaty’s fundamental scale.

## 5. Conclusions

The study provided an overview of methods, models and tools used in water-related hazard and risk assessment. The aim was twofold: firstly, to promote a deeper awareness of how to use assessment techniques as a tool to account for the complexity of the issues to be addressed; secondly, to better understand the most significant concerns associated with water-related hazards and risks. Specifically, the study found a gap in the existing literature and therefore organized the review into the following three areas: a) a presentation of the procedures currently adopted for the assessment of hydrological and hydrogeological risk; b) the identification of current drawbacks and shortcomings of its evaluation, mainly related to the multidimensionality embedded in these issues; c) a list of criteria and its discussion, emerging from the literature review, to be used in multi-criteria valuation approaches for water-related hazards and risks assessment in different contexts.

The analysis of existing documents showed that quantitative and statistical models are generally used for forecasting or describing phenomena in specific contexts. Conversely, qualitative and qualitative-quantitative methods are replicable methodologies that can be used in a wealth of contexts and for the assessment of various hydrogeological and hydrological hazards and risks.

The review underlines the following areas of importance. Firstly, the growing importance of topics such as the resilience of territories and the sustainability of policy and risk management and mitigation strategies has shed light on social and economic issues in addition to the environmental ones, which have so far been predominant in this field. Secondly, qualitative and qualitative-quantitative methods often represent the only way to support public authorities and administrations, decision-makers and policymakers when defining sustainable and prior actions and strategies. Nonetheless, advances are needed with respect to the evaluation of the economic and social impact of water-related hazards and risks. Experimentation of innovative and comprehensive models is also required to take into account the full range of objectives, opinions, stakes, and underlying value systems involved.

The findings of this study suggest that a comprehensive view of all input and output impacts, both environmental and socio-economic, correlated to water-related hazards and risks should be included in the evaluation. These aspects are particularly relevant for supporting decision-makers and policymakers in making the right choice in complex decision-making environments. On the one hand, large investments are required to develop strategies and solutions to contrast hydrological and hydrogeological risks. On the other hand, an increasing share of the world population is experiencing increasingly frequent water-related damages caused by exposure to water-related risks due to climate change.

These findings are in line with the proposal of the Statistical Commission of the Economic and Social Council of the United Nations (ECOSOC) and prepared by the special Committee of Experts of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations (DESA), which proposed the so-called System of Environmental Economic Accounting - Ecosystem Accounting (SEEA EA). This is an integrated statistical framework aimed at systematically organizing and analyzing information and data on ecosystem services to be integrated into economic planning to monitor the sustainability of economic activities. In light of the above considerations, innovative and holistic methods should be developed to support policymakers in the design of long-term resilient and sustainable risk-mitigation strategies. Furthermore, the adoption of a mixed-method approach can represent a powerful choice for the integration of systematic quantitative and qualitative data, the opinions and behaviors of the different stakeholders involved in complex decision-making processes, such as those related to risk mitigation and management. Within this context, the integration of Multiple-Criteria Decision Aiding approaches with other methods, as proposed by some authors mentioned before, such as GIS, agent-based models or Cost-Benefits Analysis, can be successfully explored and experimented with the assessment of diverse risk components in different contexts.

However, the current study is firstly limited by the fact that it was restricted to the analysis of a single database, i.e., Scopus. Although Scopus represents one of the most complete databases, the collection of articles from Google Scholar and Web of Science could enlarge the sample of documents. Secondly, although the "refine result page" of Scopus is a useful tool provided by the database to find relevant keywords, nonetheless, in the presence of a large number of contributions some keywords

remain hidden, as they are associated with a very low number of documents. Thirdly, the use of “umbrella” terms such as “hydrolog\*” and “hydrogeol\*” may have generated a loss in terms of documents that have only used specific terms such as “avalanch\*” or “flood\*”.

In spite of its limitations, the study offers important insights into decision-making and management processes for water-related hazards and risks. It could also serve as a guide for future in the multidimensional nature of the concepts of hazard and risk.

## Acknowledgments

The authors acknowledge financial support by the Veneto Region under the research agreement CUP: H15F21001670002.

## Authors contribution

The authors have equally worked in the research/application development and paper writing. Caterina Caprioli: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization. Chiara D’Alpaos: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Writing – Review & Editing, Visualization, Funding acquisition.

## Bibliography

- Acharya, B. S., & Kharel, G. (2020). Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. *Journal of Hydrology*, 588, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>
- Acreman, M., Smith, A., Charters, L., Tickner, D., Opperman, J., Acreman, S., Edwards, F., Sayers, P., & Chivava, F. (2021). Evidence for the effectiveness of nature-based solutions to water issues in Africa. *Environmental Research Letters*, 16(6), 063007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0210>
- Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575–576, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.047>
- Albulescu, A.-C., Minea, I., Boicu, D., & Larion, D. (2022). Comparative Multi-Criteria Assessment of Hydrological Vulnerability—Case Study: Drainage Basins in the Northeast Region of Romania. *Water (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/w14081302>
- Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., & Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.01.008>
- Alodah, A., & Seidou, O. (2019). Assessment of climate change impacts on extreme high and low flows: An improved bottom-up approach. *Water (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/w11061236>
- Alodah, A., & Seidou, O. (2020). Influence of output size of stochastic weather generators on common climate and hydrological statistical indices. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(7), 993–1021. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01825-w>
- Andrés, P., Doblas-Miranda, E., Mattana, S., Molowny-Horas, R., Vayreda, J., Guardiola, M., Pino, J., & Gordillo, J. (2021). A battery of soil and plant indicators of nbs environmental performance in the context of global change. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13041913>
- Aranda, J. A., & García-Bartual, R. (2020). Effect of seasonality on the quantiles estimation of maximum floodwater levels in a reservoir and maximum outflows. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020519>
- Aygün, O., Kinnard, C., & Campeau, S. (2020). Impacts of climate change on the hydrology of northern midlatitude cold regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(3), 338–375. <https://doi.org/10.1177/0309133319878123>
- Bakhsh, S. T., Basher, M., Ahmed, N., & Shahzad, B. (2020). A flood forecasting model based on wireless sensor and actor networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(8), 438–446. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110856>

- Bayazit, M. (2015). Nonstationarity of Hydrological Records and Recent Trends in Trend Analysis: A State-of-the-art Review. *Environmental Processes*, 2(3), 527–542. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0081-7>
- Beevers, Lindsay, Popescu, I., Pregnoiato, M., Liu, Y., & Wright, N. (2022). Identifying hotspots of hydro-hazards under global change: A worldwide review. *Frontiers in Water*, 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.879536>
- Beevers, Lindsay, White, C., & Pregnoiato, M. (2019). Special Issue “Impacts of Compound Hydrological Hazards or Extremes.” *Geosciences*.
- Belloni, R., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2021). Towards the continuous monitoring of the extreme events through satellite radar altimetry observations. *Journal of Hydrology*, 603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126870>
- Benvenuti, M., & Martini, I. P. (2002). Analysis of terrestrial hyperconcentrated flows and their deposits. *International Association of Sedimentologists Special Publications*, 32, 167–193.
- Bianchini, S., Ciampalini, A., Raspini, F., Bardi, F., Di Traglia, F., Moretti, S., & Casagli, N. (2015). Multi-Temporal Evaluation of Landslide Movements and Impacts on Buildings in San Fratello (Italy) By Means of C-Band and X-Band PSI Data. *Pure and Applied Geophysics*, 172(11), 3043–3065. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0839-2>
- Blöschl, G., Viglione, A., & Montanari, A. (2013). Emerging Approaches to Hydrological Risk Management in a Changing World. In *Climate Vulnerability* (pp. 3–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00505-0>
- Botai, C. M., Botai, J. O., & Adeola, A. M. (2018). Spatial distribution of temporal precipitation contrasts in South Africa. *South African Journal of Science*, 114(7–8). <https://doi.org/10.17159/sajs.2018/20170391>
- Bottero, M., Caprioli, C., & Oppio, A. (2021). *A Literature Review on Construction Costs Estimation: Hot Topics and Emerging Trends* (pp. 117–131). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4_9)
- Bottero, M., Dell’Anna, F., & Morgese, V. (2021). Evaluating the Transition Towards Post-Carbon Cities: A Literature Review. *Sustainability*, 13(2), 567. <https://doi.org/10.3390/su13020567>
- Bredemeier, M. (2009). Contributions of forests and forestry to regulating water fluxes and supplies. *GWF, Wasser - Abwasser*, 150(11), 904–909.
- Busico, G., Colombani, N., Fronzi, D., Pellegrini, M., Tazioli, A., & Mastrocicco, M. (2020). Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin. *Journal of Environmental Management*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110625>
- Buurman, J., Bui, D. D., & Du, L. T. T. (2020). Drought risk assessment in Vietnamese communities using household survey information. *International Journal of Water Resources Development*, 36(1), 88–105. <https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1557038>
- Cai, H., Lam, N. S.-N., Zou, L., Qiang, Y., & Li, K. (2016). Assessing community resilience to coastal hazards in the Lower Mississippi River Basin. *Water (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/w8020046>
- Caleca, F., Tofani, V., Segoni, S., Raspini, F., Rosi, A., Natali, M., Catani, F., & Casagli, N. (2022). A methodological approach of QRA for slow-moving landslides at a regional scale. *Landslides*, 19(7), 1539–1561. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01875-x>
- Cardarilli, M., Lombardi, M., & Corazza, A. (2019). Landslide risk management through spatial analysis and stochastic prediction for territorial resilience evaluation. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 9(2), 109–120. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V9-N2-109-120>
- Carey, M., Molden, O. C., Rasmussen, M. B., Jackson, M., Nolin, A. W., & Mark, B. G. (2017). Impacts of Glacier Recession and Declining Meltwater on Mountain Societies. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 350–359. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1243039>
- Ciampalini, A., Frodella, W., Margottini, C., & Casagli, N. (2019). Rapid assessment of geo-hydrological hazards in Antananarivo (Madagascar) historical centre for damage prevention. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1102–1124. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1564375>
- Clar, C. (2019). How demographic developments determine the management of hydrometeorological hazard risks in rural communities: The linkages between demographic and natural hazards research. *WIREs Water*, 6(6). <https://doi.org/10.1002/wat2.1378>
- Cochard, R., Ranamukhaarachchi, S. L., Shivakoti, G. P., Shipin, O. V., Edwards, P. J., & Seeland, K. T. (2008). The 2004 tsunami in Aceh and Southern Thailand: A review on coastal ecosystems, wave hazards

- and vulnerability. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 10(1), 3–40. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.11.001>
- Colombo, L., Gattinoni, P., & Scesi, L. (2018). Stochastic modelling of groundwater flow for hazard assessment along the underground infrastructures in Milan (northern Italy). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 79, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.05.007>
- Covelli, C., Cimorelli, L., Pagliuca, D. N., Molino, B., & Pianese, D. (2020). Assessment of erosion in river Basins: A distributed model to estimate the sediment production over watersheds by a 3-dimensional LS factor in RUSLE model. *Hydrology*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology7010013>
- D'Alpaos, C., & Andreolli, F. (2020). Urban quality in the city of the future: A bibliometric multicriteria assessment model. *Ecological Indicators*, 117, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106575>
- D'Alpaos, C., & Bottacin, G. (2021). Social Choices and Public Decision-Making in Mitigation of Hydrogeological Risk. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 12956 LNCS*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87010-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87010-2_20)
- D'Alpaos, C., & Bragolusi, P. (2018). Buildings energy retrofit valuation approaches: State of the art and future perspectives. *Valori e Valutazioni*, 20, 79–92.
- de Andrade, M. M. N., & Szlafsztein, C. F. (2020). Coping and adaptation strategies and institutional perceptions of hydrological risk in an urban Amazonian city. *Disasters*, 44(4), 708–725. <https://doi.org/10.1111/disa.12414>
- De Felice, F., Petrillo, A., & Zomparelli, F. (2018). A Bibliometric Multicriteria Model on Smart Manufacturing from 2011 to 2018. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1643–1648. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.221>
- De Finis, E., Gattinoni, P., Scesi, L., & Valletta, A. (2018). Conceptual and numerical modelling for hydrogeological hazard assessment in the unesco site of castelseprio (Northern Italy). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 18(1.2), 161–176. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.2/S02.021>
- Dehghani, M., Saghafian, B., & Zargar, M. (2019). Probabilistic hydrological drought index forecasting based on meteorological drought index using Archimedean copulas. *Hydrology Research*, 50(5), 1230–1250. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.051>
- Didier, D., Bernatchez, P., & Dumont, D. (2018). Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique ? *Revue Des Sciences de l'eau*, 30(2), 115–146. <https://doi.org/10.7202/1042922ar>
- Diodato, N., Borrelli, P., Panagos, P., & Bellocchi, G. (2022). Global assessment of storm disaster-prone areas. *PLoS ONE*, 17(8 August). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272161>
- Donnelly, C., Kraus, N., & Larson, M. (2006). State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. *Journal of Coastal Research*, 22(4), 965–991.
- El Ganainy, H., Demirkan, M. M., Gutierrez, J. J., Ramanathan, R., Hatipoglu, B., Adib, M. E., & Barton, D. (2016). Stability of Solution Cavities in Urban Developments: A Case Study Towards Enhancing Geohazard Risk Assessment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 125–141. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9933-1>
- Ellena, M., Ricciardi, G., Barbato, G., Buffa, A., Villani, V. & Mercogliano, P. (2020). Past and future hydrogeological risk assessment under climate change conditions over urban settlements and infrastructure systems: the case of a sub-regional area of Piedmont, Italy. *Natural Hazards*, 102(1), 275–305. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03925-w>
- Falcone, R., & Sapienza, A. (2017). Interactions among information sources in weather scenarios: The role of the subjective impulsivity. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 10349 LNCS*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59930-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59930-4_5)
- Fan, Y., Yu, L., & Shi, X. (2021). Uncertainty quantification and partition for multivariate risk inferences through a factorial multimodel Bayesian copula (FMBC) system. *Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126406>
- Fasihi, S., Lim, W. Z., Wu, W., & Proverbs, D. (2021). Systematic Review of Flood and Drought Literature Based on Science Mapping and Content Analysis. *Water*, 13(19), 2788. <https://doi.org/10.3390/w13192788>

- Figuerola-Miranda, S., Hernández-Madriral, V. M., Tuxpan-Vargas, J., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2020). Evolution assessment of structurally-controlled differential subsidence using SBAS and PS interferometry in an emblematic case in Central Mexico. *Engineering Geology*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105860>
- Garrick, D., & Hall, J. W. (2014). Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 611–639. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817>
- Gattinoni, P., & Scesi, L. (2017). The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 62, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.001>
- Gattinoni, P., & Scesi, L. (2020). From hydrogeological hazard identification to risk assessment in tunnelling: An example in northern Italy. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2020-August(1.1)*, 519–530. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.1/s02.064>
- Gentilucci, M., Barbieri, M., D'Aprile, F., & Zardi, D. (2020). Analysis of extreme precipitation indices in the Marche region (central Italy), combined with the assessment of energy implications and hydrogeological risk. *Energy Reports*, 6, 804–810. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.006>
- Gentilucci, M., Materazzi, M., & Pambianchi, G. (2021). Statistical analysis of landslide susceptibility, Macerata Province (Central Italy). *Hydrology*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010005>
- Greco, R., & Pagano, L. (2017). Basic features of the predictive tools of early warning systems for water-related natural hazards: Examples for shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(12), 2213–2227. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2213-2017>
- Grimaldi, S., Volpi, E., Langousis, A., Michael Papalexiou, S., Luciano De Luca, D., Piscopia, R., Nerantzaki, S. D., Papacharalampous, G., & Petroselli, A. (2022). Continuous hydrologic modelling for small and ungauged basins: A comparison of eight rainfall models for sub-daily runoff simulations. *Journal of Hydrology*, 610, 127866. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127866>
- Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q., & Zhou, S. (2018). Flood risk analysis for flood control and sediment transportation in sandy regions: A case study in the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 560, 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.076>
- Hamdani, R. S., Hadi, S. P., & Rudiarto, I. (2021). Progress or Regress? A Systematic Review on Two Decades of Monitoring and Addressing Land Subsidence Hazards in Semarang City. *Sustainability*, 13(24), 13755. <https://doi.org/10.3390/su132413755>
- Hamel, P., & Tan, L. (2022). Blue-Green Infrastructure for Flood and Water Quality Management in Southeast Asia: Evidence and Knowledge Gaps. *Environmental Management*, 69(4), 699–718. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01467-w>
- Hariri-Ardebili, M. A. (2017). Analytical failure probability model for generic gravity dam classes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 231(5), 546–557. <https://doi.org/10.1177/1748006X17712663>
- Harrington, C., Montana, P., Schmidt, J. J., & Swain, A. (2023). Race, Ethnicity, and the Case for Intersectional Water Security. *Global Environmental Politics*, 23(2), 1–10. [https://doi.org/10.1162/glep\\_a\\_00702](https://doi.org/10.1162/glep_a_00702)
- Henriksen, H. J., Roberts, M. J., van der Keur, P., Harjanne, A., Egilson, D., & Alfonso, L. (2018). Participatory early warning and monitoring systems: A Nordic framework for web-based flood risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1295–1306. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.01.038>
- Hou, Y., Zhang, M., Wei, X., Liu, S., Li, Q., Cai, T., Liu, W., Zhao, R., & Liu, X. (2021). Quantification of ecohydrological sensitivities and their influencing factors at the seasonal scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1447–1466. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1447-2021>
- Hynds, P., Naughton, O., O'Neill, E., & Mooney, S. (2018). Efficacy of a national hydrological risk communication strategy: Domestic wastewater treatment systems in the Republic of Ireland. *Journal of Hydrology*, 558, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.041>
- Isensee, L. J., Pinheiro, A., & Detzel, D. H. M. (2021). Dam Hydrological Risk and the Design Flood Under Non-stationary Conditions. *Water Resources Management*, 35(5), 1499–1512. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02798-3>
- Kääb, A. (2008). Remote sensing of permafrost-related problems and hazards. *Permafrost and Periglacial*

- Processes*, 19(2), 107–136. <https://doi.org/10.1002/ppp.619>
- Khan, M. Y., Hwang, J., Min, D. J., Turab, S. A., & Jan, I. U. (2022). Synthetic modeling and field GPR survey to understand the near-surface deformation induced by coseismic groundwater dynamics following the 2019 Mirpur earthquake in Pakistan. *The Leading Edge*, 41(8), 529–539. <https://doi.org/10.1190/tle41080529.1>
- Klein, C., Jackson, L. S., Parker, D. J., Marsham, J. H., Taylor, C. M., Rowell, D. P., Guichard, F., Vischel, T., Famien, A. M., & Diedhiou, A. (2021). Combining CMIP data with a regional convection-permitting model and observations to project extreme rainfall under climate change. *Environmental Research Letters*, 16(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac26f1>
- Kuchar, L., & Broszkiewicz-Suwaj, E. (2022). QUANTILE ESTIMATION OF PROBABILITY DISTRIBUTIONS FOR MAXIMUM DAILY PRECIPITATION AND SHORT TIME SERIES OF OBSERVATIONAL DATA FOR ENGINEERING DESIGN. *Environment Protection Engineering*, 48(1), 35–50. <https://doi.org/10.37190/epe220103>
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., Huang, S., Milly, P. C. D., Stoffel, M., Driessen, P. P. J., Quevauviller, P., & Schellnhuber, H.-J. (2017). Differences in flood hazard projections in Europe—their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
- Kusangaya, S., Warburton Toucher, M. L., & van Garderen, E. A. (2018). Evaluation of uncertainty in capturing the spatial variability and magnitudes of extreme hydrological events for the uMngeni catchment, South Africa. *Journal of Hydrology*, 557, 931–946. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.017>
- Leitão, J. P., Simões, N. E., Pina, R. D., Ochoa-Rodriguez, S., Onof, C., & Sá Marques, A. (2017). Stochastic evaluation of the impact of sewer inlets' hydraulic capacity on urban pluvial flooding. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(8), 1907–1922. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1283-x>
- Lemus-Canovas, M., Ninyerola, M., Lopez-Bustins, J. A., Manguan, S., & Garcia-Sellés, C. (2019). A mixed application of an objective synoptic classification and spatial regression models for deriving winter precipitation regimes in the Eastern Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2244–2259. <https://doi.org/10.1002/joc.5948>
- Lentini, V., Castelli, F., & Distefano, G. (2020). Management of Transport Infrastructures: A Procedure to Assess the Landslide Risk. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 40). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6_13)
- Lerner, A. M., Eakin, H. C., Tellman, E., Bausch, J. C., & Hernández Aguilar, B. (2018). Governing the gaps in water governance and land-use planning in a megacity: The example of hydrological risk in Mexico City. *Cities*, 83, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.06.009>
- Li, P., & Wang, Y. (2023). Interpretation of spatio-temporal variation of precipitation from spatially sparse measurements using Bayesian compressive sensing (BCS). *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(3), 554–571. <https://doi.org/10.1080/17499518.2023.2188464>
- Luedeling, E., Oord, A. L., Kiteme, B., Ogalleh, S., Malesu, M., Shepherd, K. D., & de Leeuw, J. (2015). Fresh groundwater for Wajir-ex-ante assessment of uncertain benefits for multiple stakeholders in a water supply project in Northern Kenya. *Frontiers in Environmental Science*, 3(MAR). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00016>
- Mancini, M., Lombardi, G., Mattia, S., Oppio, A., & Torrieri, F. (2017). An integrated model for Ex-ante evaluation of flood damage to residential building. In *Green Energy and Technology* (Vol. 0, Issue 9783319496). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49676-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49676-4_12)
- Maragno, D., Gaglio, M., Robbi, M., Appiotti, F., Fano, E. A., & Gissi, E. (2018). Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. *Ecological Modelling*, 386, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.08.002>
- Mazza, A., Antonini, A., Melani, S., & Ortolani, A. (2015). Recalibration of cumulative rainfall estimates by weather radar over a large area. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 095993. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095993>
- Mele, A., Miano, A., Di Martire, D., Infante, D., Ramondini, M., & Prota, A. (2022). Potential of remote sensing data to support the seismic safety assessment of reinforced concrete buildings affected by slow-

- moving landslides. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(2). <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00407-7>
- Merino, A., Fernández-González, S., García-Ortega, E., Sánchez, J. L., López, L., & Gascón, E. (2018). Temporal continuity of extreme precipitation events using sub-daily precipitation: application to floods in the Ebro basin, northeastern Spain. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1877–1892. <https://doi.org/10.1002/joc.5302>
- Merisalu, J., Sundell, J., & Rosén, L. (2021). A Framework for Risk-Based Cost–Benefit Analysis for Decision Support on Hydrogeological Risks in Underground Construction. *Geosciences*, 11(2), 82. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020082>
- Merisalu, J., Sundell, J., & Rosén, L. (2023). Probabilistic cost-benefit analysis for mitigating hydrogeological risks in underground construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104815. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104815>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, 339(jul21 1), b2535–b2535. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Mondino, E., Scolobig, A., Borga, M., Albrecht, F., Mård, J., Weyrich, P., & Di Baldassarre, G. (2020). Exploring changes in hydrogeological risk awareness and preparedness over time: a case study in northeastern Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 65(7), 1049–1059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1729361>
- Munda, G., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (1994). Qualitative multicriteria evaluation for environmental management. *Ecological Economics*, 10(2), 97–112. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0921-8009(94)90002-7)
- Nascetti, A., Capaldo, P., Porfiri, M., Pieralice, F., Fratarcangeli, F., Benenati, L., & Crespi, M. (2015). Fast terrain modelling for hydrogeological risk mapping and emergency management: the contribution of high-resolution satellite SAR imagery. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 554–582. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.904824>
- Nie, Y., Pritchard, H. D., Liu, Q., Hennig, T., Wang, W., Wang, X., Liu, S., Nepal, S., Samyn, D., Hewitt, K., & Chen, X. (2021). Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 91–106. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w>
- Núñez, J., Hallack-Alegría, M., & Cadena, M. (2016). Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: The Latin America and the Caribbean Drought Atlas. *Journal of Hydrology*, 538, 515–538. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.025>
- OECD. (2020). *Nature-based solutions for adapting to water-related climate risks*.
- Pahl-Wostl, C., Palmer, M., & Richards, K. (2013). Enhancing water security for the benefits of humans and nature—the role of governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 676–684. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.018>
- Paliaga, G., Faccini, F., Luino, F., & Turconi, L. (2019). A spatial multicriteria prioritizing approach for geo-hydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(1), 53–69. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-53-2019>
- Paliaga, G., Luino, F., Turconi, L., Profeta, M., Vojinovic, Z., Cucchiario, S., & Faccini, F. (2022). Terraced Landscapes as NBSs for Geo-Hydrological Hazard Mitigation: Towards a Methodology for Debris and Soil Volume Estimations through a LiDAR Survey. *Remote Sensing*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153586>
- Paliaga, Guido, Faccini, F., Luino, F., & Turconi, L. (2019). A spatial multicriteria prioritizing approach for geo-hydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-53-2019>
- Pamukcu, P., Erdem, N., Serengil, Y., & Randhir, T. O. (2016). Ecohydrologic modelling of water resources and land use for watershed conservation. *Ecological Informatics*, 36, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.09.005>
- Paneque Salgado, P., & Vargas Molina, J. (2015). Drought, social agents and the construction of discourse in Andalusia. *Environmental Hazards*, 14(3), 224–235. <https://doi.org/10.1080/17477891.2015.1058739>
- Paoletti, V., D'Antonio, M., & Rapolla, A. (2013). The structural setting of the Ischia Island (Phlegrean Volcanic District, Southern Italy): Inferences from geophysics and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 155–173. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.10.002>
- Pasculli, A., Longo, R., Sciarra, N., & Di Nucci, C. (2022). Surface Water Flow Balance of a River Basin Using

- a Shallow Water Approach and GPU Parallel Computing—Pescara River (Italy) as Test Case. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020234>
- Pellicani, R., Parisi, A., Iemmolo, G., & Apollonio, C. (2018). Economic Risk Evaluation in Urban Flooding and Instability-Prone Areas: The Case Study of San Giovanni Rotondo (Southern Italy). *Geosciences*, 8(4), 112. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040112>
- Pierson, F. B., Williams, C. J., Hardegree, S. P., Weltz, M. A., Stone, J. J., & Clark, P. E. (2011). Fire, Plant Invasions, and Erosion Events on Western Rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 64(5), 439–449. <https://doi.org/10.2111/REM-D-09-00147.1>
- Pomatto, E., Devecchi, M., & Larcher, F. (2022). Coevolution between Terraced Landscapes and Rural Communities: An Integrated Approach Using Expert-Based Assessment and Evaluation of Winegrowers' Perceptions (Northwest Piedmont, Italy). *Sustainability (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148624>
- Porfido, S., Alessio, G., Gaudiosi, G., Nappi, R., & Spiga, E. (2016). Multidisciplinary approach for hydrogeologic hazard assessment in the territory of the Campania Region. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 3, 1667–1674. <https://doi.org/10.1201/b21520-207>
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2017). Application of Landsat-8 and ALOS-2 data for structural and landslide hazard mapping in Kelantan, Malaysia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7), 1285–1303. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1285-2017>
- Pratesi, F., Tapete, D., Terenzi, G., Del Ventisette, C., & Moretti, S. (2015). Structural assessment of case study historical and modern buildings in the Florentine area based on a psi-driven seismic and hydrogeological risk analysis. In *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 8: Preservation of Cultural Heritage*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_60)
- Priesteri, G., Peroni, F., Pappalardo, S. E., Codato, D., Castaldo, A. G., Masi, A., & De Marchi, M. (2020). Mapping and assessing soil sealing in Padua municipality through biotope area factor index. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/su12125167>
- Priesteri, Guglielmo, Peroni, F., Pappalardo, S. E., Codato, D., Castaldo, A. G., Masi, A., & De Marchi, M. (2020). Mapping and Assessing Soil Sealing in Padua Municipality through Biotope Area Factor Index. *Sustainability*, 12(12), 5167. <https://doi.org/10.3390/su12125167>
- Saaty, T.L. (2000). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications.
- Saaty, T.L., & Peniwati, K. (2012). *Group Decision Making: Drawing Out and Reconciling Differences*. RWS Publications.
- Saaty, Thomas L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Sánchez-García, E., Abia, I., Domínguez, M., Voces, J., Sánchez, J. C., Navascués, B., Rodríguez-Camino, E., Garrido, M. N., García, M. C., Pastor, F., Barranco, L., & Portal, C. R. D. (2022). Upgrade of a climate service tailored to water reservoirs management. *Climate Services*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100281>
- Sapienza, A., & Falcone, R. (2016). How to manage the information sources' trustworthiness in a scenario of hydrogeological risks. *CEUR Workshop Proceedings*, 1578, 71–82.
- Sciuto, L., Licciardello, F., Barbera, A. C., & Cirelli, G. (2022). A GIS-based multicriteria decision analysis to reduce riparian vegetation hydrogeological risk and to quantify harvested biomass (Giant reed) for energetic retrieval. *Ecological Indicators*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109548>
- Sermet, Y., Demir, I., & Muste, M. (2020). A serious gaming framework for decision support on hydrological hazards. *Science of the Total Environment*, 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138895>
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724–9758. <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- Shelton, R. E., Baeza, A., Janssen, M. A., & Eakin, H. (2018). Managing household socio-hydrological risk in Mexico city: A game to communicate and validate computational modeling with stakeholders. *Journal of Environmental Management*, 227, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.094>
- Skulska, I., Montiel-Molina, C., & Rego, F. C. (2020). The role of forest policy in Mediterranean mountain community lands: A review of the decentralization processes in European countries. *Journal of Rural*

- Studies*, 80, 490–502. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.033>
- Tananaev, N. I., Efremova, V. A., Gavrilyeva, T. N., & Parfenova, O. T. (2021). Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: The case of the amga river, central Yakutia, Siberia. *Hydrology Research*, 52(1), 125–141. <https://doi.org/10.2166/NH.2020.124>
- United Nations. (2015a). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations Sustainable knowledge platform. In *Sustainable Development Goals*. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>
- United Nations. (2015b). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- van den Brandeler, F., Gupta, J., & Hordijk, M. (2019). Megacities and rivers: Scalar mismatches between urban water management and river basin management. *Journal of Hydrology*, 573, 1067–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.001>
- Xiao, Y., Yi, S., & Tang, Z. (2017). Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Science of the Total Environment*, 599–600, 1034–1046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.218>
- Zhu, L., Gong, H., Chen, Y., Wang, S., Ke, Y., Guo, G., Li, X., Chen, B., Wang, H., & Teatini, P. (2020). Effects of Water Diversion Project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China. *Engineering Geology*, 276, 105763. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105763>

## Appendix

**Table A1.** Most frequently used models/methods used for the assessment of hydrological hazard and risk assessment

	Hydrological Hazard/Risk		Hydrological Hazard/Risk
<b>Adaptive Management</b>	6	Economics	7
<b>Algorithm</b>	8	<b>Ensemble Forecasting</b>	7
Anthropogenic Effect	7	Erosion	6
Article	11	Extreme Event	26
Assessment Method	10	Extreme Precipitation	7
<b>Bayesian Analysis</b>	6	Fires	6
Brazil	14	Flash Flood	11
Canada	10	Flood	44
Catchment	12	Flood Control	33
Catchments	20	Flood Damage	12
China	22	<b>Flood Forecasting</b>	7
Climate Change	66	Flood Frequency	8
Climate Effect	12	<b>Flood Frequency Analysis</b>	7
Climate Modeling	13	Flood Hazard	6
Climate Models	23	Flood Hazards	6
Coastal Zone	7	Flood Risk	7
<b>Conceptual Framework</b>	6	Flood Risks	8
<b>Copula</b>	13	Flooding	39
Dams	15	Floodings	6
Data Set	7	Floods	90
Debris	6	<b>Frequency Analysis</b>	12
<b>Decision Making</b>	18	<b>GIS</b>	11
<b>Decision Support Systems</b>	8	Geo-hydrological Hazard	7
Design Flood	6	<b>Geographic Information Systems</b>	7
Disaster	6	Geomorphology	7
Disaster Management	14	Global Warming	9
Disasters	12	Groundwater	12
Discharge	6	Hazard	6
<b>Downscaling</b>	7	Hazard Assessment	44
Drought	35	Hazard Management	8
Droughts	6	Hazards	55

Follow **Table A1**. Most frequently used models/methods used for the assessment of hydrological hazard and risk assessment

Hydrological Hazard/Risk		Hydrological Hazard/Risk	
Human	6	Precipitation (meteorology)	6
Hydroelectric Power	8	Precipitation Assessment	14
Hydrologic Risk	17	Precipitation Intensity	17
Hydrological Cycle	7	<b>Probability</b>	21
Hydrological Drought	6	<b>Probability Distributions</b>	8
Hydrological Droughts	8	<b>Quantitative Analysis</b>	11
Hydrological Hazard	59	Rain	34
Hydrological Hazards	6	Rain Gages	7
Hydrological Modeling	38	Rainfall	23
Hydrological Response	7	<b>Regression Analysis</b>	8
Hydrological Risk	15	<b>Remote Sensing</b>	15
Hydrological Risks	38	Reservoir	6
Hydrology	17	Reservoirs (water)	17
Hydrometeorology	8	Resource Management	7
Italy	21	Return Period	12
Land Use	8	Return Periods	12
Land Use Change	7	Risk	13
Landforms	6	Risk Analysis	23
Landslide	18	Risk Assessment	158
Landslides	14	Risk Management	17
Liguria	8	Risk Perception	37
Low Flow	6	Risks	10
<b>Maps</b>	6	River	6
<b>Monte Carlo Analysis</b>	6	River Basin	12
<b>Monte Carlo Methods</b>	8	River Discharge	7
<b>Multivariate Analysis</b>	8	Rivers	30
<b>Multivariate Analysis</b>	13	Romania	6
<b>Natural Hazard</b>	7	Runoff	21
<b>Non-stationarities</b>	7	Safety Engineering	9
<b>Numerical Model</b>	10	<b>Sensitivity Analysis</b>	7
Peak Flow	8	<b>Simulation</b>	6
Precipitation	7	Snow	7
Precipitation (climatology)	18	Soil Conservation	7

Follow **Table A1**. Most frequently used models/methods used for the assessment of hydrological hazard and risk assessment

Hydrological Hazard/Risk		Hydrological Hazard/Risk	
Soil Erosion	6	<b>Time Series Analysis</b>	8
Soil Moisture	8	<b>Trend Analysis</b>	8
Soils	7	Uncertainty	8
Spain	8	<b>Uncertainty Analysis</b>	17
<b>Spatial Analysis</b>	9	United States	14
<b>Spatial Distribution</b>	8	Urban Area	7
<b>Spatiotemporal Analysis</b>	11	Urbanization	10
<b>Stakeholder</b>	6	Vulnerability	27
<b>Statistical Analysis</b>	7	Water Levels	14
<b>Stochastic Systems</b>	11	Water Management	21
Storm Surge	7	Water Resource	18
Storms	11	Water Resources	22
<b>Strategic Approach</b>	7	Water Supply	8
Stream Flow	15	Watershed	9
Streamflow	18	Watersheds	22
Sustainable Development	8	Weather Forecasting	11

\* In bold are marked the keywords used for the fine-tuning of the literature review described in Section 3.2.

**Table A2.** Most frequently used models/methods used for the assessment of hydrogeological hazard and risk assessment

Hydrogeological Hazard/Risk		Hydrogeological Hazard/Risk	
3-D Numerical Modeling	2	Cultural Heritages	2
3D Modeling	2	Damage Detection	2
ALOS	1	Data Set	2
Abandoned Land	1	Debris Flow	2
Abu Dhabi	1	Decision Making	6
Abu Dhabi Municipality	1	Decision Support	2
Abu Dhabi [United Arab Emirates]	1	Decision Support Systems	3
Acquisition Planning	1	Disaster Management	2
Adaptive Management	1	Disaster Prevention	2
Adaptive Management Policies	1	Disasters	5
Agricultural Heritage Systems	1	Earthquake	2
Agroforestry	1	Earthquakes	2
Agroforestry Systems	1	Electrical Resistivity Tomography	2
Airborne Data Collection	1	Embankments	3
Alternative Routes	1	Emergency Management	3
Amalfi Coast	1	Environmental Effect	2
Anaerobic Digestion	1	Environmental Monitoring	2
Analytic Equations	1	Extreme Event	2
Analytical Formulas	1	Extreme Precipitation	2
Analytical Hierarchy Process	1	Flood	2
Aquifer	3	Floods	6
Aquifers	5	Flow Of Water	3
Assessment Method	2	Forecasting	2
Calibration	2	GIS	5
China	2	Geographic Information Systems	3
Climate Change	6	Geological Surveys	3
Complex Information	2	Geology	2
Complex Networks	2	Ground Penetrating Radar	2
Consequence Analyses	2	Ground Penetrating Radar Systems	3
Consequence Analysis	2	Groundwater	8
Cost-benefit Analysis	2	Groundwater Abstraction	2
Cost Effectiveness	1	Groundwater Flow	3
Cultural Heritage	3	Groundwater Resources	5

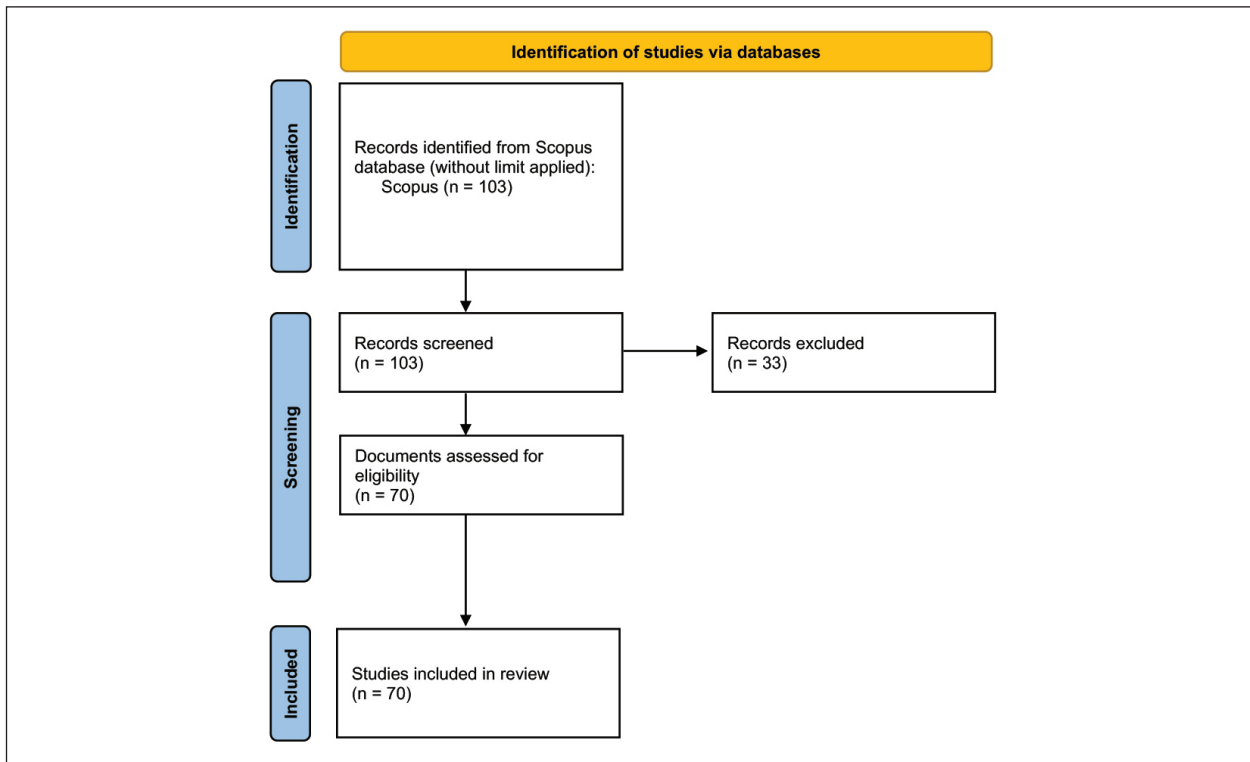
Follow **Table A2**. Most frequently used models/methods used for the assessment of hydrogeological hazard and risk assessment

Hydrogeological Hazard/Risk		Hydrogeological Hazard/Risk	
Groundwater Resources	5	Natural Disasters	2
Hazard Assessment	9	Numerical Model	4
Hazards	8	Numerical Modelling	3
Highway Administration	2	Numerical Models	4
Housing	2	Performance Assessment	3
Hydraulic Models	2	Persistent Scatterer Interferometry	3
Hydraulics	2	Persistent Scatterer Interferometry (PSI)	4
Hydro-geological Risk	25	Piedmont [Italy]	2
Hydrogeological	6	Prediction	2
Hydrogeological Hazard	5	Quantitative Analysis	3
Hydrogeological Risk	8	Radar	2
Hydrogeology	13	Rain	2
Hydrological Models	2	Rain Gages	2
Hydrology	2	Remote Sensing	6
Information Sources	2	Remote-sensing	2
Interferometry	4	Risk Analysis	3
Italy	15	Risk Assessment	38
Land Use Change	2	Risk Management	11
Landforms	5	Risk Mitigation	2
Landslide	10	Risk Perception	2
Landslide Risk	3	River Basins	2
Landslides	10	Rivers	4
Large Dataset	2	Roads And Streets	4
Levees	2	Satellite Data	2
Linear Infrastructure	2	Scientific Community	2
Lithology	3	Sicily	4
Lombardy	2	Slope Stability	2
Mapping	2	Soil Erosion	2
Maps	2	Soils	2
Milano [Lombardy]	2	Spatial Variation	2
Monitoring	2	Stochastic Systems	3
Multi Agent Systems	2	Stochasticity	2
Multi-disciplinary Approach	2	Structural Assessments	2

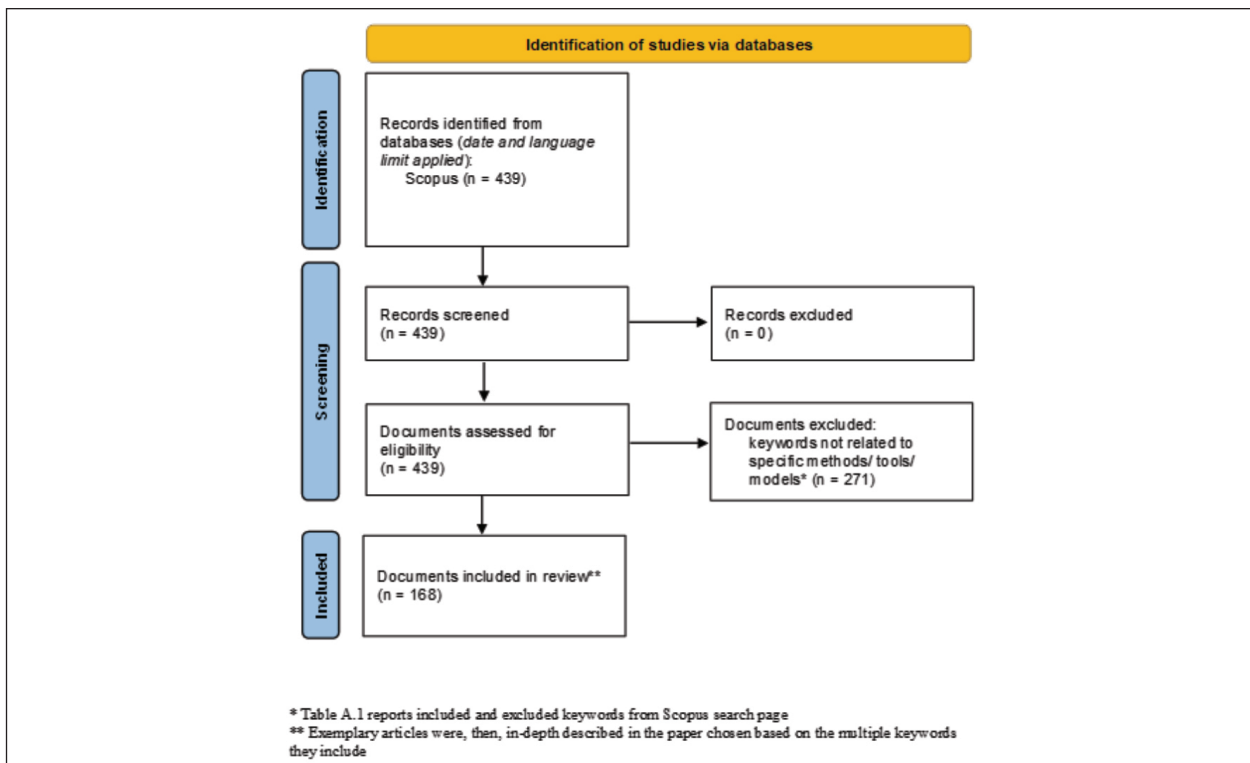
Follow **Table A2**. Most frequently used models/methods used for the assessment of hydrogeological hazard and risk assessment

Hydrogeological Hazard/Risk		Hydrogeological Hazard/Risk	
Subsidence	3	Tunneling (excavation)	2
Subways	2	Tunnels	2
Surveying	2	Tuscany	2
Surveys	2	Uncertainty Analysis	2
Synthetic Aperture Radar	6	Underground Construction	3
Three Dimensional Computer Graphics	2	Underground Infrastructure	2
Transport Infrastructure	2		

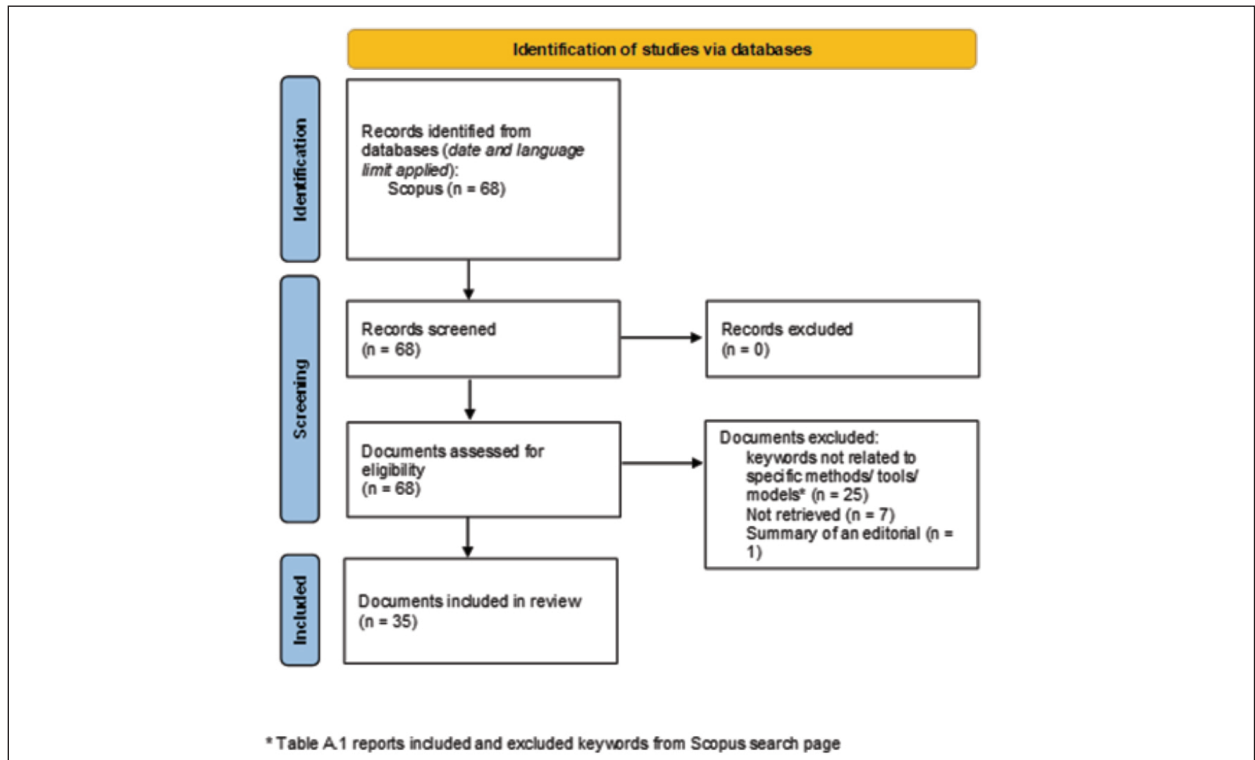
\* In bold are marked the keywords used for the fine-tuning of the literature review described in Section 3.3.



**Figure A1.** PRISMA chart for the publications obtained and analyzed by quoting TITLE-ABS-KEY ( ( "hydrolog\* risk" OR "hydrolog\* hazard" OR "hydro-harzard" OR "hydrogeolog\* risk" OR "hydrogeolog\* hazard" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* hazard" OR "water-related risk" OR "water-related hazard" ) AND ( "literature review" OR "review" ) ).



**Figure A2.** PRISMA flow chart relative to the search based on quoting TITLE-ABS-KEY ( ( "hydrolog\* risk" OR "hydrolog\* hazard" OR "hydro-harzard" OR "hydrogeolog\* risk" OR "hydrogeolog\* hazard" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* hazard" OR "water-related risk" OR "water-related hazard" ) AND ( "assessment" OR "evaluation" OR "valuation" ) ).



**Figure A3.** PRISMA flow chart relative to the search based on quoting TITLE-ABS-KEY ( ( ( "hydrogeolog\* risk" OR "hydrogeolog\* hazard" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* hazard" ) AND ( "assessment" OR "evaluation" OR "valuation" ) ) ).

# Supportare i processi decisionali nella valutazione del rischio idraulico e geologico: una rassegna di modelli e metodi

Caterina Caprioli<sup>1,\*</sup>, Chiara D'Alpaos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST), Viale Mattioli 39, 10125, Torino, Italia. e-mail: caterina.caprioli@polito.it

<sup>2</sup> Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA), Via Venezia 1, 35131, Padova, Italia. e-mail: chiara.dalpaos@unipd.it

\* corresponding author

## Parole chiave

Revisione sistematica della letteratura; valutazione del rischio; valutazione, processo decisionale multicriteri; pericolosità e rischio idrologico; pericolosità e rischio idrogeologico

## Abstract

Il nostro pianeta sta sperimentando l'impatto dei cambiamenti climatici, con un aumento della gravità e della frequenza dei pericoli e dei rischi legati all'acqua a diversi livelli territoriali. Di conseguenza, l'aumento della resilienza dei territori e la riduzione di tali rischi rappresentano una delle maggiori sfide odierne. In questo contesto, politici e pianificatori necessitano di strumenti decisionali consolidati e trasparenti per risolvere efficacemente e rispondere rapidamente al problema della mitigazione dei rischi idrogeologici. Il presente contributo offre una rassegna della letteratura sul tema dei rischi idraulici e idrogeologici ai quali sono esposti i territori con l'obiettivo di fornire uno stato dell'arte aggiornato e sistematico sulla loro valutazione. Questa analisi può contribuire ad una comprensione approfondita del ruolo dei metodi di valutazione nel supportare la progettazione e la pianificazione di strategie di gestione del rischio economicamente efficaci. Il contributo, in primo luogo, fornisce una panoramica delle procedure utilizzate in letteratura per la valutazione dei rischi idrologici e idrogeologici. In seguito, ne vengono identificate le limitazioni e le lacune, in particolare in riferimento alle conseguenze economiche. Infine, a partire dall'analisi della letteratura, il lavoro propone un insieme di criteri che potrebbero essere adottati con successo per valutare i rischi e le azioni e gli interventi di mitigazione degli stessi. I risultati rivelano che sono ancora necessari significativi sforzi per migliorare la solidità della valutazione degli impatti economici e finanziari dei rischi legati all'acqua in senso esteso. Lo studio può offrire, quindi, alcuni importanti spunti di riflessione sui processi decisionali e di gestione dei rischi di natura idraulica e geologica, nonché fornire delle linee guida per lo sviluppo di future ricerche incentrate sulla natura multidimensionale del concetto di rischio e della sua valutazione.

## 1. Introduzione

Il rapido aumento della frequenza e della gravità delle minacce idrogeologiche e idrologiche sta generando preoccupazioni sempre maggiori in tutto il mondo, per i loro impatti sui territori e sulle popolazioni che li abitano. In questo contesto, lo sviluppo di un approccio che miri ad aumentare la resilienza del territorio combinato ad azioni di mitigazione del rischio è diventata una sfida prioritaria a livello globale. Quando si parla di rischi idrogeologici e idrologici si fa riferimento a una vasta gamma di processi

geo-idrologici, che vanno dalle alluvioni, alle frane superficiali, alle colate detritiche e di fango, a problemi legati al deflusso superficiale delle acque e al tempo di corrivazione di un bacino, ecc. (Paliaga et al., 2019). Questi eventi sono legati sicuramente a fattori naturali che rendono alcuni territori più vulnerabili di altri. Tuttavia, le azioni antropiche e i cambiamenti climatici hanno una forte influenza sull'aumento del numero di questi eventi in tutto il mondo, nonché sulla loro gravità e ricorrenza. Alcuni esempi di questi fenomeni sono l'alterazione dei bacini idrografici o delle reti idrografiche, l'espansione urbana, la frammentazione e il consumo di suolo e l'abbandono delle aree montane (Maragno et al., 2018; Guido Paliaga et al., 2019; Pellicani et al., 2018). Di conseguenza, impatti di crescente entità colpiscono sempre più frequentemente le popolazioni, gli edifici, le infrastrutture naturali e artificiali e le attività economiche soggette a rischi legati all'acqua.

In questo scenario, il successo dei processi decisionali pubblici nell'affrontare le sfide sopra descritte diventa essenziale, al fine di affrontare con precisione e reagire prontamente a queste crescenti minacce naturali. Per fare ciò, politici e pianificatori necessitano sempre più di strumenti decisionali affidabili e trasparenti (D'Alpaos & Bottacin, 2021; Datola et al. 2024). Questi strumenti sono fondamentali per la progettazione e l'attuazione di strategie di mitigazione del rischio a lungo termine, che devono tenere conto dei rischi naturali, delle popolazioni potenzialmente colpite e della disponibilità di fondi e risorse finanziarie. Una delle principali sfide politiche è infatti quella di dare priorità agli investimenti alternativi destinati a mitigare i diversi rischi, il che a sua volta richiede una migliore conoscenza per informare una *governance* efficace (OECD, 2020).

Le principali domande di ricerca che hanno motivato il nostro lavoro sono le seguenti: a) Esiste già una rassegna dello stato dell'arte, che sistematizzi e discuta i metodi e gli strumenti esistenti per la valutazione dei pericoli e dei rischi legati all'acqua? b) Quali sono le tendenze emergenti nella valutazione dei rischi? c) Come può la ricerca di frontiera supportare efficacemente i decisori nel migliorare la coerenza delle politiche tra i diversi settori e ambiti?

Nonostante il crescente interesse per questo tema nell'ultimo decennio, la nostra indagine rivela la mancanza di revisioni strutturate. Una revisione sistematica dei metodi e degli strumenti esistenti può supportare in modo significativo il processo decisionale e la coerenza delle politiche in diversi settori e ambiti, tenendo conto dell'adattamento ai cambiamenti climatici, della gestione del rischio di catastrofi e della gestione delle risorse idriche, che influiscono sulla resilienza dei territori e, di conseguenza, sulla qualità della vita delle popolazioni.

Il presente documento fornisce un'analisi dello stato dell'arte della letteratura sulle principali questioni e sulle recenti tendenze nello studio dei pericoli e dei rischi legati all'acqua e nella loro valutazione. L'obiettivo è quello di colmare la suddetta lacuna in letteratura, proponendo un quadro concettuale per analizzare, organizzare e discutere la produzione esistente in questo ambito, attuando un protocollo di ricerca sistematica basato su analisi bibliografiche (Bottero, Caprioli, et al., 2021; Bottero, Dell'Anna, et al., 2021; D'Alpaos & Andreolli, 2020; D'Alpaos & Bragolusi, 2018) e sull'approccio PRISMA (Moher et al., 2009; Page et al., 2021). Nella presente ricerca è stato incluso sia il concetto di «pericolo» sia quello «rischio» per tenere conto dei potenziali danni all'ambiente, alle persone e alle cose e della loro probabilità di accadimento, nonché degli approcci di misurazione e valutazione sia qualitativi che quantitativi. Inoltre, ci si è concentrati anche sugli aggettivi «idrologico» e «idrogeologico», per considerare rispettivamente gli effetti a livello superficiale e sotterraneo di un eccesso di acqua proveniente da una o più fonti (ad esempio, acque costiere, fluviali o di superficie/sotto superficie) o di un deficit di portata o di precipitazioni per un periodo prolungato (Lindsay Beevers et al., 2019). Da indagini preliminari, è emerso infatti che molti autori si riferiscono alla cosiddetta pericolosità e ai rischi legati all'acqua adottando indistintamente le diciture «idrologico» e «idrogeologico». Di conseguenza, sono stati considerati entrambi i termini per coprire in modo completo il dominio degli eventi estremi associati alla presenza, al movimento e alla distribuzione dell'acqua (comprese le inondazioni e la siccità) e le loro cause-effetto, come ad esempio frane, colate detritiche, erosione del suolo, ecc. Vale la pena ricordare, tuttavia, che il termine idrogeologico è adottato principalmente nel contesto italiano, per due ragioni principali. In primo luogo, in Italia il dissesto idrogeologico è una questione annosa e seria, per la conformazione naturale del territorio, la sua complessa orografia e i suoi (generalmente) piccoli bacini idrografici. Per questi motivi, il tema ha suscitato grande interesse nella ricerca accademica e nel dibattito politico e pubblico. In secondo luogo,

come emergerà nella Sezione 3, il riferimento all'aggettivo «idrogeologico» è ricorrente nella legislazione italiana a partire dal 1923 (R.D.L. 30/12/1923 n. 3267) ed è stato tradotto in «hydrogeological» e, a sua volta, in «rischio idrogeologico», oggi comunemente utilizzato quando si parla di «rischio idrologico», «rischio frana» o «rischio alluvione».

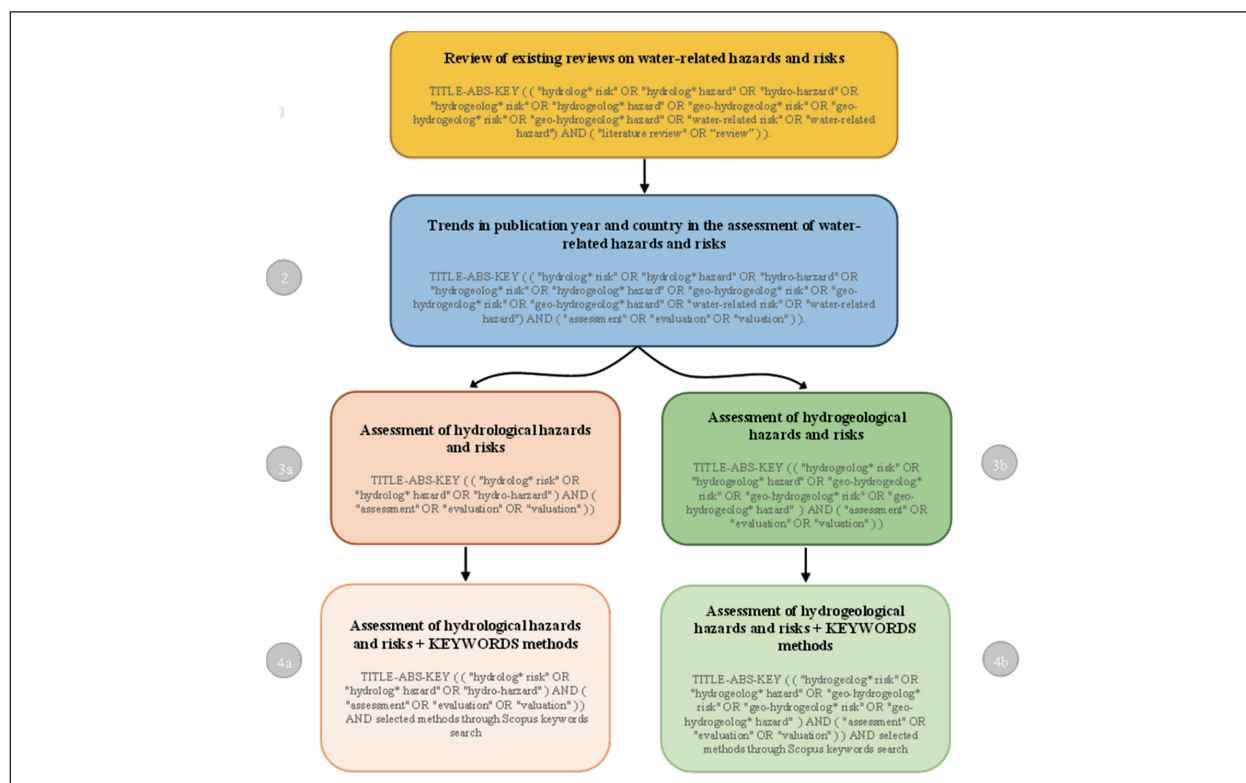
L'obiettivo di questo lavoro è triplice. In primo luogo, si propone di contribuire alla letteratura esistente e di supportare i decisori pubblici fornendo una sistematizzazione della ricchezza dei metodi di valutazione dei pericoli e dei rischi legati all'acqua. In secondo luogo, sulla base dei risultati derivanti dall'analisi della letteratura, mira a richiamare l'attenzione dei *policy maker* sulla natura multidimensionale della valutazione della pericolosità e dei rischi legati alle acque superficiali e sotterranee. In terzo luogo, intende fornire una *check list* preliminare di criteri che possono essere adottati con successo nella valutazione dei rischi legati all'acqua in senso esteso e delle relative strategie di mitigazione. Per perseguire questi obiettivi, si intende: i) identificare le lacune nella letteratura esistente sulle differenze tra il concetto di pericolosità e di rischio e la relativa trattazione; ii) effettuare una rassegna dei metodi di valutazione convenzionalmente utilizzati nel contesto della pericolosità dei fenomeni e dei rischi legati all'acqua; iii) discutere l'importanza dei criteri ambientali, economici e sociali nell'informare strategie sostenibili di mitigazione del rischio attraverso una valutazione adeguata ed esaustiva della pericolosità e del rischio idraulico e geologico.

In dettaglio, per condurre la revisione sistematica della letteratura, è stata implementata una procedura strutturata in più fasi. Sono state inizialmente esaminate le analisi della letteratura esistenti sul tema oggetto di indagine. L'analisi preliminare ha rivelato la presenza di un sostanziale deficit, in particolare sulla valutazione della pericolosità e del rischio idrologico e idrogeologico, in un quadro di gestione e pianificazione urbana e territoriale su scala vasta. Successivamente, è stato esplorato l'argomento in base alla diffusione dei contributi selezionati per Paese e anno di pubblicazione. Infine, sono stati esaminati e discussi gli strumenti e i metodi di valutazione della pericolosità e dei rischi idrologici e idrogeologici, al fine di fornire una serie di criteri di valutazione e spunti utili per informare le politiche pubbliche e supportare i *policy maker* e i decisori nei processi decisionali. Tale revisione sistematica della letteratura può contribuire a identificare le prospettive future di ricerca e migliorare le relazioni dialettiche tra ricerca e azioni e politiche effettivamente implementate e implementabili, favorendo al contempo il successo dell'attuazione delle strategie di adattamento e mitigazione.

Il resto del documento è organizzato come segue. La Sezione 2 descrive la procedura adottata per condurre l'analisi della letteratura e le diverse fasi in cui si articola; la Sezione 3 presenta alcune statistiche e risultati preliminari in merito all'anno di pubblicazione, il Paese, i rischi indagati, gli obiettivi e i metodi/modelli investigati e descritti nei contributi analizzati; la Sezione 4 discute, invece, i principali risultati, identificando le lacune della letteratura nella valutazione del rischio idraulico, idrologico e idrogeologico e proponendo un elenco di criteri da adottare nella valutazione del rischio in future ricerche; infine, la Sezione 5 propone alcune osservazioni conclusive e suggerimenti per possibili ulteriori sviluppi della ricerca.

## 2. Metodologia

L'analisi della letteratura è stata condotta utilizzando la banca dati Scopus, mentre il cosiddetto diagramma PRISMA (Moher et al., 2009; Page et al., 2021) è stato impiegato per illustrare le fasi che hanno portato alla selezione dei documenti analizzati nella presente revisione sistematica della letteratura. La raccolta dei dati e l'analisi delle pubblicazioni sono state effettuate tra settembre 2022 e agosto 2023. Per condurre l'analisi, come precedentemente menzionato, è stato adottato un approccio a più fasi, schematizzato in Figura 1. La prima fase ha previsto la disamina di analisi esistenti della letteratura sulla pericolosità e i rischi legati all'acqua, per identificare lacune potenzialmente suscettibili di ulteriori indagini. La seconda fase si è concentrata sulle tendenze delle pubblicazioni aventi come oggetto la valutazione della pericolosità e dei rischi, analizzate tenendo conto dell'anno e luogo di pubblicazione. Nella terza fase sono stati analizzati i risultati della ricerca condotta specificamente sulla pericolosità e il rischio idrologico e idrogeologico. Infine, nella quarta fase, è stata affinata la ricerca e sono stati esaminati i modelli e i metodi utilizzati rispettivamente per la valutazione della pericolosità e dei rischi idrologici e idrogeologici.



**Figura 1.** Diagramma di flusso della procedura strutturata in più fasi e utilizzata per condurre la revisione sistematica della letteratura.

Come precedentemente detto, nella prima fase, è stata condotta una revisione preliminare della letteratura per individuare quali e quante revisioni della letteratura fossero state pubblicate sull'argomento. La ricerca è stata effettuata implementando la seguente stringa di ricerca: TITLE-ABS-KEY ( ( «hydrolog\* risk» OR «hydrolog\* hazard» OR «hydro-hazard» OR «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» OR «water-related risk» OR «water-related hazard») AND ( «literature review» OR «review» ) ). Da questa ricerca si sono ottenute 103 pubblicazioni (vedi Figura A.1 in Appendice).

È stata, quindi, condotta un'analisi dettagliata dell'intero insieme di pubblicazioni risultanti da tale ricerca preliminare. Sono state escluse fin dall'inizio 33 pubblicazioni, perché incentrate su questioni giudicate irrilevanti rispetto al tema d'analisi (ad esempio, contributi incentrati sull'impatto della qualità dell'acqua potabile, sulla produzione agricola e sulle imprese, o basate sull'analisi di aspetti legati all'uso dell'acqua come risorsa). Tra i rimanenti, la maggior parte dei documenti (23) non sono revisioni della letteratura: alcuni contributi valutano un caso specifico di rischio o pericolosità idrologico o idrogeologico in un'area circoscritta (ad esempio, Benvenuti e Martini, 2002; Cochard et al., 2008; Hamdani et al., 2021; Nie et al., 2021; Pierson et al., 2011). Inoltre, 3 pubblicazioni esaminano una tipologia di rischio specifico, quale il sovraccorrimiento in zone costiere (Donnelly et al., 2006), l'acqua di fusione in diminuzione (Carey et al., 2017) e i problemi di drenaggio delle acque acide nelle miniere (Acharya & Kharel, 2020). Al contrario, 15 documenti si riferiscono a più rischi contemporaneamente o a un territorio specifico, come nel caso dei sistemi di allerta precoce per i rischi legati all'acqua in Europa (Alfieri et al., 2012), i rischi vulcanici, sismici e idrogeologici nell'Isola di Ischia nell'Italia del sud (Paoletti et al., 2013), gli impatti dei cambiamenti climatici sull'idrologia delle regioni fredde alle latitudini settentrionali (Aygün et al., 2020). Inoltre, 15 rassegne esaminano una singola tecnica di valutazione, come ad esempio, il telerilevamento (Sheffield et al., 2018), l'analisi delle tendenze (Bayazit, 2015) e la Citizen Science (Käab, 2008), mentre 4 documenti esaminano un insieme di azioni o soluzioni atte a mitigare il rischio idraulico o geologico, come ad esempio le infrastrutture blu e verdi nel sud-est asiatico (Hamel e Tan, 2022), le cosiddette *nature-based solutions* per la salvaguardia della risorsa idrica in Africa (Acreman et al., 2021), le foreste di proprietà comune in cinque grandi Paesi del Mediterraneo (Skulska et al., 2020) e le foreste che svolgono una funzione

di regolazione dei flussi e approvvigionamento idrico in Germania (Bredemeier, 2009). Infine, i restanti 10 documenti forniscono una disamina più completa della pericolosità e dei rischi più propriamente legati all'acqua. In particolare, Pahl-Wostl et al. (2013) identificano le principali sfide di *governance* da affrontare per una sicurezza idraulica sostenibile, nonché analizzano come siano cambiate la loro natura, la loro percezione e il loro inquadramento nel contesto sociale; Garrick e Hall (2014) propongono indicatori e indici di sicurezza idraulica per identificare opportune soglie di rischio idraulico e geologico considerando le molteplici dimensioni che caratterizzano il problema della sicurezza idraulica; van den Brandeler et al. (2019) analizzano i concetti di gestione integrata delle risorse idriche e dei bacini idrografici e delle acque metropolitane/urbane; Henriksen et al. (2018) analizzano i dati e i modelli di simulazione online prodotti dall'Europa e dai Paesi nordici per contribuire alla creazione di forme partecipative di allerta precoce e monitoraggio al fine di ridurre i rischi di catastrofe; Blöschl et al. (2013) passano in rassegna i metodi di gestione del rischio di alluvioni e siccità, gli approcci innovativi proposti in letteratura e le modalità di definizione delle priorità; Clar (2019) offre una panoramica sui collegamenti tra la ricerca nel campo del rischio demografico e idrologico; Fasihi et al. (2021) analizzano il corpus multidisciplinare di conoscenze esistenti sull'analisi congiunta di alluvioni e siccità; Didier et al. (2018) sottolineano le principali condizioni che contribuiscono a rendere efficaci i sistemi di allerta precoce nell'ambito di un approccio integrato alla gestione del rischio; Harrington et al. (2023) propongono una revisione dei lavori pubblicati sulla sicurezza idrica, con un'attenzione esplicita alla razza o all'etnia; infine, Beevers et al. (2022) passano in rassegna lo stato dell'arte sugli *hotspot* per inondazioni e siccità. Tuttavia, nessuno di questi contributi fornisce una revisione sistematica e completa della letteratura sui rischi legati all'acqua e sulla loro valutazione.

Per perseguire l'obiettivo della ricerca, la seconda fase della ricerca si è concentrata sulla valutazione della pericolosità e dei rischi legati all'acqua. È stato, quindi, analizzato il numero di pubblicazioni per anno e per Paese per approfondire le tendenze della ricerca scientifica, implementando la seguente stringa: TITLE-ABS-KEY ( ( «hydrolog\* risk» OR «hydrolog\* hazard» OR «hydro-hazard» OR «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» OR «water-related risk» OR «water-related hazard») AND ( «assessment» OR «evaluation» OR «valuation» ) ).

Nella terza fase, sono stati considerati separatamente la pericolosità e i rischi «idrologici» e «idrogeologici» per tenere conto anche della specificità della letteratura di settore in Italia. Poiché l'obiettivo della presente revisione è identificare le tendenze più recenti nella valutazione del rischio e della pericolosità idrologica e idrogeologica, per l'analisi approfondita dei contributi e la loro discussione, ci si è limitati agli articoli pubblicati dopo il 2015. È stato preso il 2015 come anno di riferimento, perché nel 2015 gli Stati membri delle Nazioni Unite hanno adottato la nota «Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile» (Nazioni Unite, 2015a), al centro della quale ci sono i 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goal - SDG).

Nella quarta fase, è stata perfezionata la revisione della letteratura attuando un ulteriore processo di ricerca. Filtrando le parole chiave contenute nella «refine result page» di Scopus, è stato possibile concentrare la ricerca sui metodi e sui modelli di valutazione più diffusi. In particolare, è stata condotta una ricerca sul vasto patrimonio di metodi e modelli individuati attraverso le due stringhe principali contenenti rispettivamente «hydrolog\* hazard and risk» e «hydrogeol\* hazard and risk» (Tabella A.1 e Tabella A.2). La Tabella A.1 e la Tabella A.2 mostrano i risultati in termini di numero di pubblicazioni relative alle due ricerche condotte rispettivamente sul rischio e sulla pericolosità idrologica e idrogeologica, dalle quali è stato possibile ottenere due sotto-campioni di contributi, identificati in seguito come primo sotto-campione e secondo sotto-campione. È stata poi affinata la ricerca in ciascun sotto-campione e, per fare questa operazione, tra le parole chiave riportate nelle tabelle A.1 e A.2, sono state selezionate quelle strettamente legate a metodi e modelli, raggruppando le categorie di dettaglio in insiemi più ampi di metodi. Per quanto riguarda la Tabella A.1, è stata affinata l'analisi del primo sotto-campione clusterizzando i contributi a partire dai seguenti gruppi di parole chiave: GIS and Geographic Information Systems; Monte Carlo Analysis and Monte Carlo Methods; Multivariate Analysis and Multivariate Analysis; Probability and Probability Distributions; Spatial Analysis and Spatial Distribution. Per quanto riguarda, invece, la Tabella A.2, è stata perfezionata l'analisi sul secondo sotto-campione a partire dalle seguenti parole chiave: 3-D Numerical Modeling and 3D Modeling, Analytic Equations and Analytical Formulas; Consequence Analyses and Consequence Analysis; Decision Support and Decision Support Sys-

tems; GIS and Geographic Information Systems; Ground Penetrating Radar and Ground Penetrating Radar Systems; Mapping and Maps; Numerical model, Numerical Modelling and Numerical Models; Persistent Scatterer Interferometry and Persistent Scatterer Interferometry (PSI); Stochastic Systems and Stochasticity; Surveying and Surveys. In questa procedura di aggregazione, sono state escluse le parole chiave riferite ad argomenti generici, anche se relativi a pericolosità e rischio idrogeologico o idrologico, come Climate Change o Flash Flood, o relative a territori specifici, come Canada o Brasile.

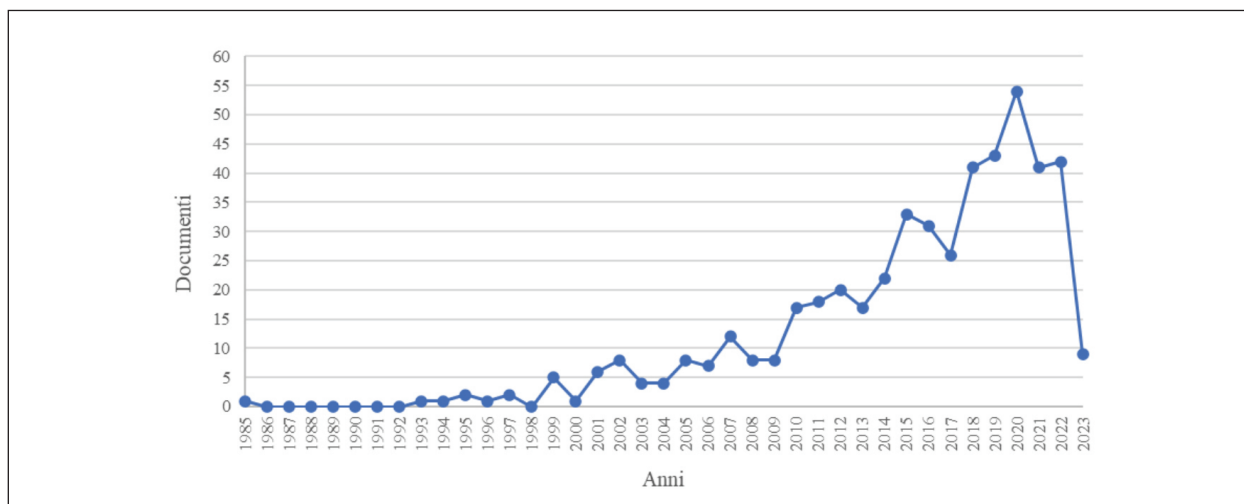
Per quanto riguarda le due stringhe relative alla valutazione della pericolosità e del rischio idrologico e idrogeologico, nel presente studio si sono analizzati in modo approfondito 203 articoli, di cui 168 sono relativi a pericolosità e rischio idrologico (primo sotto-campione) e 35 sono relativi a pericolosità e rischio idrogeologico (secondo sotto-campione).

### 3. Meta-analisi

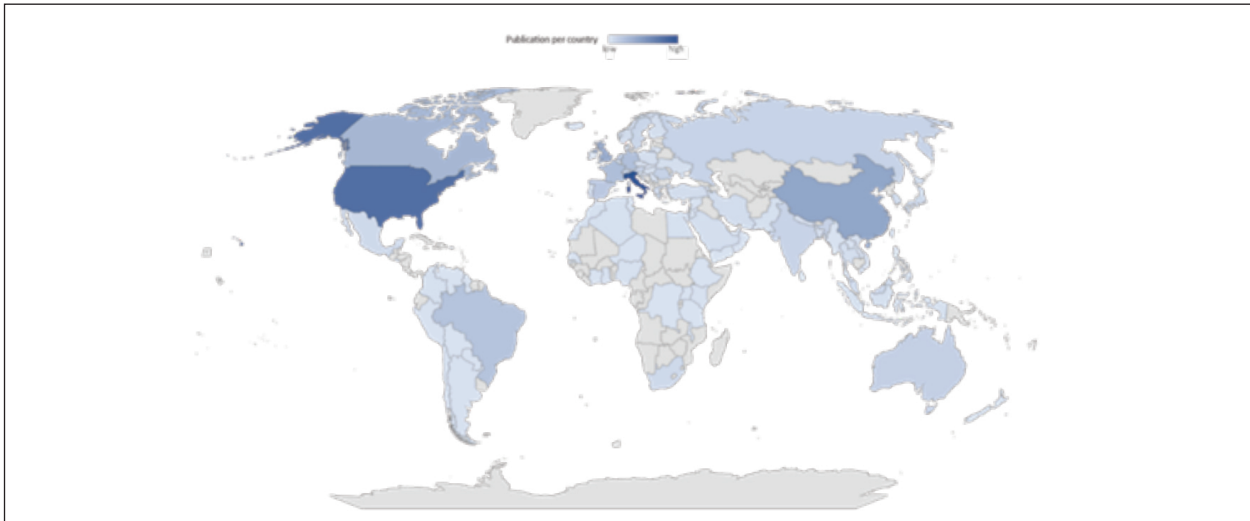
#### 3.1. Tendenze emergenti in letteratura

Nel presente contributo, la letteratura sul tema della pericolosità e dei rischi legati all'acqua è stata innanzitutto analizzata in base all'andamento nel tempo delle pubblicazioni e dei Paesi di provenienza degli autori (764 documenti). Secondo la ricerca condotta, i primi contributi sono apparsi nel 1970 (Figura 2). I temi oggetto di indagine, tuttavia, sono stati menzionati solo sporadicamente fino al 1992. A partire da questa data, nel database Scopus è stato registrato almeno un contributo all'anno. A partire dal 2001, il numero di lavori pubblicati è aumentato progressivamente: il tasso di pubblicazione è stato di circa 10 all'anno a partire dal 2005, è raddoppiato nel 2011 e, infine, triplicato dopo il 2014.

Dal punto di vista del Paese in cui si è sviluppata la ricerca (Figura 3), è interessante notare come la metà dei contributi illustri e discuta studi condotti in Europa (51%). In particolare, il 17% dei documenti risultanti dalla ricerca fa riferimento al contesto italiano che, per le sue caratteristiche geologiche, morfologiche e idrografiche, è naturalmente caratterizzato da importanti fenomeni di instabilità. Circa un quarto dei documenti riporta i risultati di ricerche condotte in America (24%), mentre il 20% dei documenti ha come contesto d'analisi l'Asia. Del restante 6%, il 4% riguarda l'Africa e il 2% l'Oceania.



**Figura 2.** Numero di pubblicazioni per anno ottenute tramite la seguente stringa TITLE-ABS-KEY (“hydrolog\* risk” OR “hydrolog\* hazard” OR “hydro-hazard” OR “hydrogeology\* risk” OR “hydrogeology\* hazard” OR “geo-hydrogeolog\* risk” OR “geo-hydrogeolog\* risk” OR “geo-hydrogeolog\* hazard” OR “water-related risk” OR “water-related hazard”) AND (“assessment” OR “evaluation” OR “valuation”)

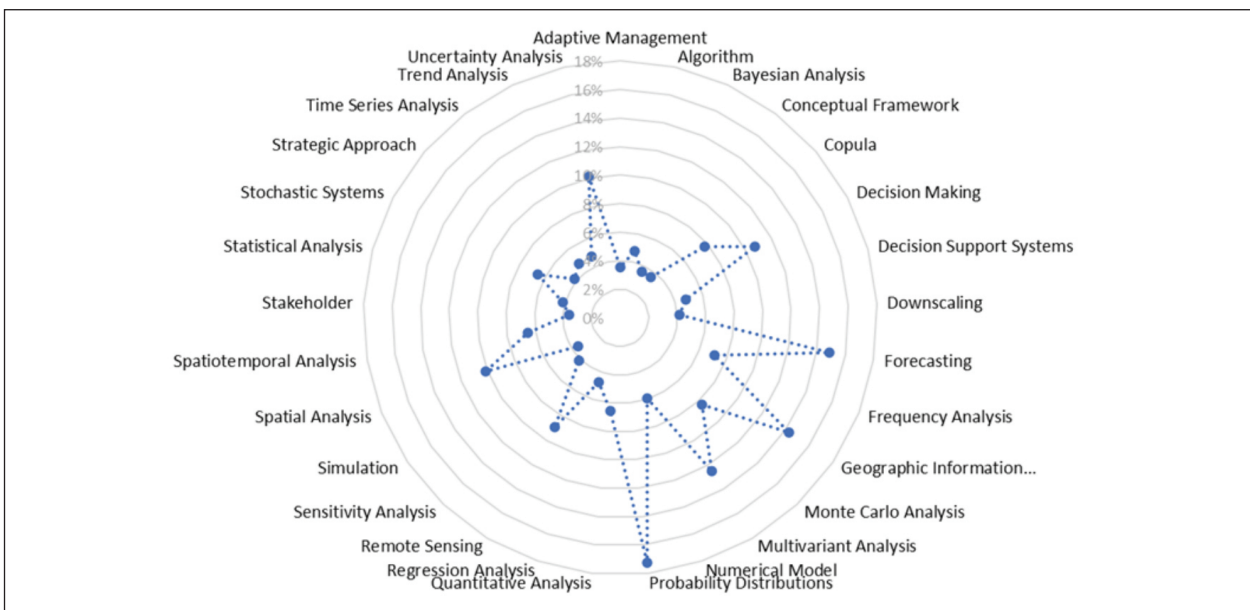


**Figura 3.** Numero di pubblicazioni per Paese ottenute tramite la seguente stringa TITLE-ABS-KEY ( ( "hydrolog\* risk" OR "hydrolog\* hazard" OR "hydro-hazard" OR "hydrogeology\* risk" OR "hydrogeology\* hazard" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* risk" OR "geo-hydrogeolog\* hazard" OR "water-related risk" OR "water-related hazard") AND ( "assessment" OR "evaluation" OR "valuation" ) )

### 3.2. Valutazione del rischio e del pericolo idrologico

Il concetto di rischio che può essere declinato secondo molteplici sfaccettature. Di conseguenza, lo sviluppo di strumenti di valutazione che possano garantire un aumento della coerenza tra i sistemi di valori alla base dei diversi obiettivi delle politiche richiede uno sforzo significativo. L'obiettivo specifico della presente sezione è di approfondire le metodologie di valutazione proposte in letteratura e analizzare e discutere alcuni esempi del loro utilizzo specifico nella valutazione del rischio idrologico.

La ricerca sviluppata attraverso la consultazione del database Scopus sulla valutazione della pericolosità e del rischio idrologico ha portato, come già accennato, a un primo sottoinsieme di 168 pubblicazioni (Figura A.2 in Appendice). Per fornire una panoramica generale dell'ampiezza dello specifico tema di ricerca, si rimanda alla Tabella A.1 e alla Figura 4.



**Figura 4.** Pubblicazioni (in termini percentuali) raggruppate per parole chiave specifiche relative a metodi/modelli adottati nella valutazione della pericolosità e del rischio idrologico.

Di seguito vengono riportati e discussi gli articoli considerati dalle autrici rappresentativi dello stato dell'arte, al fine di dare conto della varietà degli interessi di ricerca emersa dalla rassegna della letteratura. In particolare, tali articoli sono stati selezionati in base al maggior numero di parole chiave correlate alla singola pubblicazione. La scelta è stata dettata dall'esigenza di dare conto, per quanto possibile, di contributi in grado di coprire diverse prospettive, problematiche e dimensioni della valutazione del rischio e della pericolosità idrologica e che, di conseguenza, possano fornire (a giudizio delle autrici) esempi innovativi, esaustivi e robusti dal punto di vista metodologico di applicazioni a casi di studio reali.

Tra i diversi metodi e modelli utilizzati in letteratura, l'analisi di probabilità risulta frequentemente implementata nella valutazione del rischio, poiché consente agli analisti di individuare tendenze e deviazioni normali ed assegnare le probabilità di accadimento degli eventi con un buon livello di confidenza. Dalla revisione della letteratura condotta, è emerso che in 29 pubblicazioni su 168 (ossia il 17% del primo sottoinsieme) vengono utilizzate probabilità e distribuzioni di probabilità per lo studio dei fenomeni idrologici. Hariri-Ardebili (2017), ad esempio, sviluppa un approccio ibrido parametrico-probabilistico per stimare la probabilità di rottura in funzione delle dimensioni di una diga, dei modelli distributivi dei materiali e del pericolo idrologico esogeno. L'approccio proposto viene utilizzato come strumento per la progettazione e la valutazione preliminare di modelli di dighe a gravità bidimensionali. Dehghani et al. (2019), invece, propongono un'analisi di previsione della siccità basata su funzioni copula, che utilizzano come variabile principale la serie storica della siccità meteorologica registrata in passato. Un'altra analisi molto comune adottata in 17 pubblicazioni su 168, anch'essa associata ai modelli di probabilità, è l'analisi dell'incertezza. Ad esempio, Fan et al. (2021) studiano varie fonti di incertezza per diversi rischi idrologici attraverso una copula bayesiana multi-modello fattoriale. L'analisi bayesiana guida il processo di inferenza statistica, consentendo di combinare le conoscenze pregresse relative a un parametro della popolazione a partire dai dati di un campione. Escludendo Fan et al. (2021), questo approccio è adottato in altri 5 contributi (ovvero il 4% del primo sottoinsieme). Inoltre, Guo et al. (2018) superano la tradizionale analisi del rischio di alluvione, proponendo un quadro di rischio idrologico bivariato basato su una copula e un'analisi univariata, che incorpora sia il rischio delle alluvioni sia il trasporto dei sedimenti. In questo lavoro, viene implementato un algoritmo basato su analisi Monte Carlo per quantificare l'incertezza di campionamento associata alle analisi del rischio idrologico univariate e bivariate per due bacini idrografici situati nell'altopiano del Loess, una regione sabbiosa della Cina. I due contributi di Fan et al. (2021) e Guo et al. (2018) sono due esempi che ben rappresentano l'uso di metodi statistici per prevedere la probabilità di un evento/fenomeno e valutare il rischio idrologico, attraverso un algoritmo specifico (come nel 2,3% delle pubblicazioni del primo sotto-campione) e un'analisi quantitativa (implementata nel 3,1% dei contributi del primo sotto-campione). In particolare, Fan et al. (2021) e Guo et al. (2018) hanno utilizzato le analisi copula (adottate in 13 pubblicazioni del primo sotto-campione) con una distribuzione multivariata. In particolare, oltre a Fan et al. (2021) e Guo et al. (2018), 21 pubblicazioni si concentrano sulle distribuzioni multivariate (ovvero il 13% del primo sotto-campione considerando le parole chiave «Multivariate Analysis» e «Multivariate Analysis») per tenere conto delle diverse dipendenze tra le variabili. Al contrario, le simulazioni Monte Carlo, una classe di algoritmi computazionali che si basano su campionamenti casuali ripetuti, sono adottate in 14 documenti su 168 (cioè l'8% del primo sotto-campione) per generare estrazioni di dati e parametri a partire da una distribuzione di probabilità.

I processi stocastici sono implementati in 11 documenti (ovvero il 7% del primo sotto-campione) e sono generalmente utilizzati per valutare gli effetti del clima e i relativi rischi idrologici (si veda ad esempio Alodah e Seidou, 2020, 2019; Aranda e García-Bartual, 2020; Kuchar e Broszkiewicz-Suwaj, 2022; Leitão et al., 2017; Núñez et al., 2016). In particolare, Alodah e Seidou (2019) valutano la probabilità di diversi stati futuri in termini di impatti dei cambiamenti climatici, generando un numero elevato di previsioni climatiche rappresentative, che fanno uso di generatori meteorologici calibrati con modelli climatici regionali. Successivamente, correggono le proiezioni grezze ottenute tramite tecniche di *downscaling* (riportate in 7 documenti, ovvero il 4% del primo sotto-campione), ovvero procedure che consentono di dedurre informazioni a scala ridotta a partire da informazioni su larga scala.

Le analisi statistiche (citate in 7 documenti, ovvero il 4% del primo sotto-campione) sono ampiamente utilizzate nella valutazione dei rischi naturali e in particolare nella valutazione dei co-

siddetti rischi idraulici e idrologici causati da eventi idrologici estremi (si veda ad esempio Aranda e García-Bartual, 2020; Núñez et al., 2016).

In 24 pubblicazioni (ossia il 14% del primo sottocampione che considera il GIS, i Sistemi Informativi Geografici, le Mappe, l'Analisi Spaziale e la Distribuzione Spaziale), il GIS e l'analisi spaziale sono adottati per la valutazione della pericolosità e del rischio idrologico, grazie alla loro capacità di elaborare informazioni e dati geograficamente referenziati. Alam et al. (2021) e Bakhsh et al. (2020), ad esempio, utilizzano il GIS per l'analisi del rischio alluvioni. In particolare, Alam et al. (2021) utilizzano diciotto parametri morfometrici derivati dal GIS per sviluppare un modello di previsione delle alluvioni improvvise che tiene conto del volume di deflusso, della velocità di flusso e di scenari di altezza dei tiranti dell'evento esondativo, mentre Bakhsh et al. (2020) adottano il GIS e gli strumenti di simulazione per analizzare i parametri e prevedere la probabilità del verificarsi di un'alluvione. A questo proposito, vale la pena ricordare che i modelli di previsione sono citati nel 7% dei documenti del primo sotto-campione, se si includono come parole chiave anche Ensemble Forecasting, Flood Forecasting e Weather Forecasting. Inoltre, Cai et al. (2016) utilizzano l'analisi spaziale per valutare la resilienza delle comunità ai rischi costieri nella regione del Lower Mississippi River Basin (LMRB) nel sud-est della Louisiana. Attraverso un'analisi di regressione (un metodo statistico specifico implementato in altri 7 documenti, per un totale pari al 5% delle pubblicazioni nell'elenco), esaminano la relazione tra la resilienza della comunità e gli indicatori socio-ambientali. Lemus-Canovas et al. (2019) combinano informazioni spaziali e analisi di regressione per la gestione delle risorse idriche nei Pirenei orientali. Utilizzando modelli numerici, basati su modelli atmosferici sviluppati a partire da eventi verificatisi nella stagione invernale (novembre-maggio) tra il 1990 e il 2015, gli autori forniscono 12 tipologie di circolazione meteorologica per lo sviluppo di mappe di precipitazione media giornaliera e di probabilità di precipitazione giornaliera. I modelli numerici, implementati in 10 contributi (ovvero nel 6% del primo sotto-campione), sono adottati ad esempio da Greco e Pagano (2017) per la previsione e l'allerta delle popolazioni esposte in caso di eventi catastrofici. La previsione di eventi estremi è anche al centro del lavoro di Diodato et al. (2022). Partendo dall'analisi delle serie storiche, gli autori identificano le aree a rischio idrologico che superano le soglie di allarme e di allerta. Analogamente, Belloni et al. (2021) utilizzano le informazioni sul livello dell'acqua basate sul calcolo satellitare dell'altimetria (tecnica chiave per misurare la variazione del livello dell'acqua) per creare un set di dati di portata fluviale, coerente e aggiornato mediante curve di valutazione per diversi siti in tutto il mondo. Le serie storiche continue di portata fluviale ottenute sono utilizzate successivamente per condurre un'analisi di tendenza, volta a identificare modelli o tendenze degli eventi idrologici estremi. Secondo Belloni et al. (2021), il drammatico aumento del riscaldamento globale e i cambiamenti climatici hanno dato impulso sia alle analisi di tendenza, adottate in 8 pubblicazioni (pari al 5% del primo sotto-campione), sia ai modelli di simulazione (pari al 4% del primo sotto-campione), presenti in 6 contributi e utilizzati fondamentalmente per fare previsioni su prototipi fisici. Tra i contributi incentrati sull'analisi di tendenza e sui modelli di simulazione, meritano una menzione Merino et al. (2018) e Grimaldi et al. (2022). In particolare, Merino et al. (2018) propongono una nuova definizione di «evento estremo di precipitazione» attraverso analisi basate sulle precipitazioni orarie, per registrare sia eventi di precipitazione intensa su un periodo molto breve, sia eventi di precipitazione molto persistenti che generano precipitazioni cumulate significative nell'arco di diversi giorni. Entrambi questi eventi determinano rischi idrologici intensi, che non sono però classificati come eventi estremi di precipitazione misurati su scala giornaliera. Analogamente, nell'ambito delle analisi predittive, Grimaldi et al. (2022) si concentrano sulla modellazione idrologica continua per migliorare la conoscenza della trasformazione afflussi-deflussi e fornire ai decisori informazioni in termini di output più efficaci per la valutazione del rischio, testando otto modelli pluviometrici. Per approfondire gli argomenti trattati nei due contributi di Merino et al. (2018) e avere una panoramica completa delle applicazioni, si suggerisce di partire dalla rassegna bibliografica di Bayazit (2015).

Vale la pena notare che l'intenso sviluppo di nuove tecnologie e l'avanzamento della ricerca hanno aumentato il numero di analisi che utilizzano satelliti o droni per rilevare e monitorare le caratteristiche fisiche dei territori. In questo contesto, il telerilevamento è ampiamente adottato

(15 documenti su 168) per analizzare la pericolosità e il rischio idraulico e idrologico (si vedano, ad esempio, Khanal et al. 2019, Sheffield et al. 2018, Barbara e Helmut 2019).

Paliaga et al. (2019) integrano l'analisi spazio-temporale (adottata in 11 casi su 168) con una tecnica di analisi multicriteri spaziale. L'analisi multicriteri (AMC) è una famiglia di metodi che combina dati quantitativi e qualitativi, le opinioni e i valori degli stakeholder per stilare un ordinamento o una classifica delle possibili alternative di intervento che rispondano a uno specifico obiettivo. In questo lavoro, Paliaga et al. (2019) combinano parametri descrittivi per ottenere una scala di priorità tra 21 piccoli bacini idrografici del Mediterraneo. La scala di priorità viene utilizzata per pianificare interventi di mitigazione del rischio, a partire dai bacini più critici, per concentrare le risorse economiche principalmente su di essi e ottenere una strategia di prevenzione efficace.

Il coinvolgimento delle parti interessate nella valutazione del rischio idrologico è inoltre un ambito di ricerca di crescente interesse (si veda ad esempio Andrade e Szlafsztajn, 2020; Hynds et al., 2018; Luedeling et al., 2015; Paneque Salgado e Vargas Molina, 2015; Sermet et al., 2020; Shelton et al., 2018). Ad esempio, il lavoro di Shelton et al. (2018) esplora scenari di *governance* alternativi, utilizzando un gioco di ruolo per tradurre gli esiti di focus group in un algoritmo quantitativo. Sermet et al. (2020) applicano uno strumento di supporto decisionale basato sul web per l'analisi idrologica multirischio, impiegando tecniche di ludicizzazione (*gamification*) per introdurre elementi di competizione tra i partecipanti. In un contesto di ludicizzazione è possibile creare funzionalità per la gestione intuitiva, la visualizzazione e l'analisi di dati geospaziali, idrologici ed economici, e, quindi, per supportare le parti interessate nel processo decisionale relativo alla prevenzione, preparazione e risposta ai rischi idrologici. Mondino et al. (2020) si concentrano sulla consapevolezza degli individui in relazione al rischio idrogeologico, raccogliendo dati empirici sul comportamento umano durante eventi di colate detritiche registrati nel passato. Successivamente, esaminando parole chiave più generali come «decision making», sono state verificate la completezza e l'eshaustività dell'analisi effettuata. Paliaga et al. (2019) e Albulescu et al. (2022) adottano approcci multicriteri per valutare rispettivamente le strategie di mitigazione del rischio idrologico e la vulnerabilità idrologica. Inoltre, Kundzewicz et al. (2017) analizzano le proiezioni del rischio di alluvione in Europa per individuare le potenziali fonti di discrepanza. Inoltre, da un lato, Klein et al. (2021) discutono e confrontano diversi approcci per fare previsioni sui futuri tassi di precipitazioni estreme e, dall'altro, Greco e Pagano (2017) analizzano l'accuratezza e le caratteristiche dei modelli predittivi per migliorare l'efficacia dei sistemi di allerta precoce. Sánchez-García et al. (2022) migliorano l'accuratezza delle previsioni di S-ClimWaRe, uno strumento predittivo, utilizzato per supportare la gestione dei bacini idrografici in Spagna. Hou et al. (2021) si concentrano invece sulla disciplina della eco-idrologia e sui fattori che influenzano la stagionalizzazione delle parametrizzazioni idrologico-idrauliche. Per quanto riguarda il coinvolgimento degli *stakeholder* e degli attori nei processi decisionali volti alla mitigazione e gestione dei rischi idrologici, vale la pena citare i contributi di Xiao et al. (2017), Lerner et al. (2018), Shelton et al. (2018) e Sermet et al. (2020).

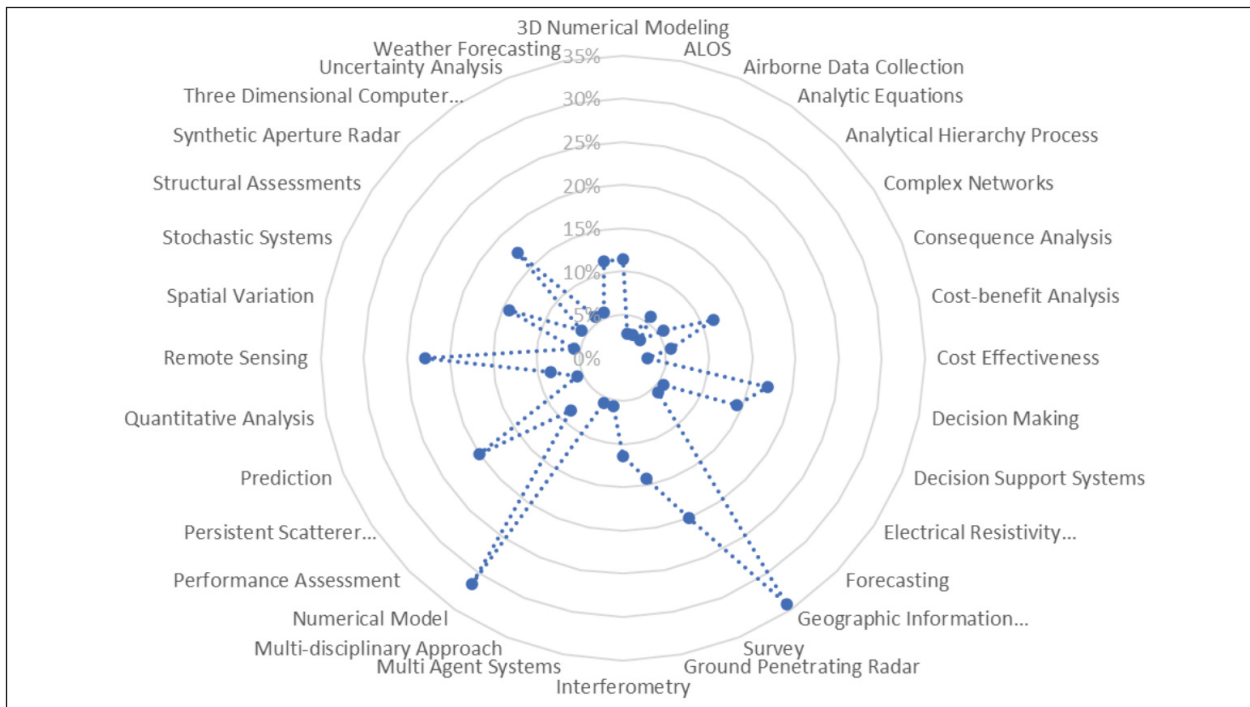
Per valutare il rischio di alluvione, Xiao et al. (2017) propongono un quadro di valutazione basato sull'AMC, incorporando lo strumento GIS: in particolare, utilizzano la procedura *fuzzy* dell'Analytic Hierarchic Process (AHP) e la Geographical Weighted Regression (GWR). Inoltre, Lerner et al. (2018) identificano i fattori che determinano i rischi idrologici nelle megalopoli, come Città del Messico, attraverso interviste a funzionari comunali per comprendere le diverse percezioni e punti di vista sulle dinamiche del rischio a livello sociale, considerando ad esempio le esondazioni e la scarsità d'acqua. Shelton et al. (2018) sviluppano invece un gioco di ruolo per analizzare la consapevolezza e l'esperienza dei residenti nel ridurre la propria esposizione al rischio attraverso un modello ad agenti per informare la *governance* del rischio idraulico e idrologico a Città del Messico. Sermet et al. (2020) sviluppano un sistema di supporto alle decisioni per le attività di pianificazione volte alla mitigazione del rischio idraulico e idrologico a livello locale.

Infine, 12 contributi su 168 concentrano la loro analisi sul ruolo degli approcci strategici alla gestione della pericolosità e dei rischi idrologici, utilizzando quadri concettuali e tecniche di gestione adattiva. Ad esempio, Haque e Jakariya (2023) adottano un approccio di gestione e pianificazione adattiva per determinare le dinamiche interattive tra idrogeologia e condizioni umane. Mark et al. 2017 applicano un quadro concettuale multilivello incentrato sull'accoppiamento tra i

determinanti biofisici e sociali di accesso all'acqua e i rischi sociali nel contesto dei bacini idrografici glacializzati.

### 3.3. Valutazione del rischio e della pericolosità idrogeologica

Analizzando la letteratura rispetto alla valutazione della pericolosità e del rischio idrogeologico, come indicato nella Sezione 2, è stato ottenuto un secondo sotto-campione di 35 contributi, pubblicati a partire dal 2015 (Figura A.3 in Appendice). Per una panoramica generale sull'ampiezza di questo specifico ambito di ricerca, si rimanda alla Tabella A.2 e alla Figura 5.



**Figura 5.** Pubblicazioni (in termini percentuali) raggruppate per parole chiave specifiche relative a metodi/modelli adottati nella valutazione della pericolosità e del rischio idrogeologico.

Dall'analisi della Tabella 1, che riporta in ordine alfabetico per autore i 35 contributi filtrati secondo i metodi e modelli di valutazione, è possibile trarre alcune considerazioni. La grande maggioranza degli autori è di nazionalità italiana e/o lavora in ambito italiano. Questa predominanza si spiega, come già accennato in precedenza (cfr. Sezione 1 e Sezione 3.1), in ragione sia della conformazione del territorio italiano, particolarmente vulnerabile rispetto a questi fenomeni, sia della legislazione nazionale, che ha introdotto il termine idrogeologico poco utilizzato nel resto del mondo.

In base alle componenti di rischio analizzate in tali contributi, si osserva una prevalenza delle analisi condotte rispetto ai rischi di erosione ed esondazione, ovvero rispettivamente 7 e 5 pubblicazioni su 35, tra cui si ricordano Bianchini et al. (2015), Covelli et al. (2020), D'Alpaos e Bottacin (2021) e Mancini et al. (2017); mentre la combinazione di entrambi è indagata in 5 documenti su 35 (si veda ad esempio, Pour e Hashim, 2017; Ellena et al. 2020). Anche i fenomeni meteorologici estremi o di precipitazioni intense sono trattati in 3 documenti (si veda ad esempio Gentilucci et al., 2020). Altri fenomeni quali, ad esempio, le valanghe (Andrés et al., 2021), i terremoti (Khan et al., 2022; Mele et al., 2022), l'impermeabilizzazione del suolo (Pristeri et al., 2020), l'innalzamento delle acque sotterranee (Colombo et al., 2018; Gattinoni & Scesi, 2017), la fuoriuscita delle acque sotterranee (Merisalu et al., 2021, 2023) e la ricarica degli acquiferi (Zhu et al., 2020) sono poco trattati in letteratura. Alcuni contributi, inoltre, investigano in generale i problemi legati al rischio idrogeologico (ad esempio, Mondino et al., 2020; Pomatto et al., 2022).

**Tabella 1.** Pubblicazioni ottenute dalla ricerca bibliografica su pericolosità e rischio idrogeologico, riportate in ordine alfabetico per autore.

Riferimento	Problema analizzato	Metodo e tecnica di modellazione
Andrés et al. 2021	Cadute di massi e valanghe di neve	Indicatori di monitoraggio per la mitigazione dei cambiamenti climatici e la fornitura di biodiversità sono utilizzati per analizzare diversi progetti di <i>nature-based solutions</i> (NBS) una volta realizzati.
Bianchini et al. 2015	Alterazioni del regime di scorrimento delle acque, inondazioni e gravi danni alle strutture (attività erosiva)	Il georadar ( <i>Ground Penetrating Radar</i> – GPR) viene utilizzato per identificare l'attività erosiva al di sotto della pavimentazione di una galleria causata dal deflusso dell'acqua e dal trasporto di solido associato.
Busico et al. 2020	Generazione di deflussi brevi	Lo strumento di valutazione del suolo e dell'acqua (SWAT) utilizza i dati di input dei modelli di previsione climatica, le caratteristiche del suolo e gli scenari di uso del suolo per prevedere il loro effetto sui processi idrologici.
Caleca et al. 2022	Frane a lento movimento	Per le frane a lento scorrimento viene utilizzata una valutazione quantitativa del rischio di frana (QRA), basata sull'applicazione dell'equazione: rischio = pericolo (H) × vulnerabilità (V) × esposizione (E), assegnata a ciascuna cella (di dimensioni pari a 1 km <sup>2</sup> ).
Cardarilli et al. 2019	Instabilità dei pendii	Viene condotta una <i>back analysis</i> per valutare l'instabilità idrogeologica applicando l'analisi spaziale e quantificando il rischio idrogeologico attraverso stimatori non distorti.
Colombo et al. 2018	Rischio idrogeologico per le infrastrutture sotterranee causato dall'innalzamento del livello delle acque sotterranee	Un modello numerico 3D del flusso delle acque sotterranee è stato trasformato in un modello stocastico per valutare il rischio idrogeologico al quale sono esposte le infrastrutture sotterranee.
Covelli et al. 2020	Processo erosivo	Un modello di previsione dell'erosione, basato sulla <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i> (RUSLE), per ottenere una mappa dell'erodibilità di qualsiasi bacino, da cui ricavare poi la mappatura delle aree più vulnerabili.
D'Alpaos e Bottacin 2021	Rischi idrogeologici (in generale)	Un modello di <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP) assoluto viene applicato nella prioritizzazione delle strategie di mitigazione del rischio idrogeologico.
De Finis et al. 2018	Evoluzione dei pendii e innesco di frane	Si utilizzano modelli numerici 2D e 3D per simulare i fenomeni di innesco e valutare le condizioni di stabilità dei siti archeologici.
El Ganainy et al. 2016	Stabilità delle cavità carsiche	Viene eseguito uno studio numerico per sviluppare una serie di mappe GIS di geo-rischio di crollo di cavità.
Falcone e Sapienza 2017	Scenari meteorologici complessi	Viene applicato un modello basato su agenti per valutare l'affidabilità della singola fonte rispetto a ogni singolo agente durante gli eventi meteorologici estremi.
Figueroa-Miranda et al. 2020	Subsidenza differenziale	Le tecniche di interferometria SAR sono utilizzate per rilevare e monitorare la subsidenza del terreno, utilizzando lo <i>Small Baseline Subset</i> (SBAS) e la <i>Persistent Scatterer Interferometry</i> (PSI).
Gattinoni e Scesi 2020	Afflusso di acqua nelle gallerie	I dati di monitoraggio vengono confrontati con i valori previsti attraverso diversi approcci. Successivamente, viene effettuata un'analisi stocastica per valutare il rischio idrogeologico e ambientale derivante dalla realizzazione di gallerie.

Segue **Tabella 1**. Pubblicazioni ottenute dalla ricerca bibliografica su pericolosità e rischio idrogeologico, riportate in ordine alfabetico per autore.

Riferimento	Problema analizzato	Metodo e tecnica di modellazione
Gattinoni e Scesi 2017	Innalzamento del livello delle acque sotterranee nell'area urbana	Lo studio utilizza l'analisi dei dati di monitoraggio per calibrare un modello numerico 3D per la simulazione di scenari e la valutazione di diverse soluzioni per la mitigazione del rischio.
Gentilucci et al. 2021	Frane	Il modello <i>Weight of Evidence</i> (WoE) è utilizzato per calcolare la vulnerabilità alle frane, utilizzando GIS e operazioni matematiche sui raster.
Gentilucci et al. 2020	Indici di precipitazione estrema	Il software GIS esegue interpolazioni areali per spazializzare gli indici di precipitazione estrema.
Khan et al. 2022	Caratteristiche di liquefazione in superficie dovute al terremoto	Per tracciare e delineare l'architettura interna e le variazioni sismiche dei livelli e/o delle pressioni delle acque sotterranee dovute alla liquefazione, viene effettuata un'indagine GPR ( <i>Ground Penetrating Radar</i> ) subito dopo un terremoto.
Lentini et al. 2020	Frane sulla rete stradale	Acquisizione di conoscenze locali su questioni relative al rischio di frana.
Li e Wang 2023	Precipitazioni	Un metodo non parametrico di rilevamento bayesiano spazio-temporale (ST-BCS) viene utilizzato per l'interpolazione di dati di precipitazione variabili nello spazio e nel tempo, ma rilevati in poche stazioni di misura.
Mancini et al. 2017	Danni da alluvione agli edifici residenziali	Un <i>toolbox</i> basato su GIS è utilizzato per la valutazione ex-ante del danno annuo atteso da un'alluvione (EAD) in un'area urbana.
Ellena et al. 2020	Rischio alluvioni, frane e valanghe su insediamenti urbani e sistemi infrastrutturali in ambiente montano	Il lavoro calcola un punteggio di rischio che può essere utilizzato per classificare gli <i>asset</i> per ogni comune, dove il rischio (R) è descritto come una funzione della pericolosità (H), dell'esposizione (E) e della vulnerabilità (V), a sua volta suddivisa in sensibilità (S) e capacità di adattamento (AC).
Mazza et al. 2015	Precipitazioni	Stima delle precipitazioni cumulate rispetto alle misure spaziali coincidenti dei pluviometri. Successivamente, viene applicato un metodo di <i>kriging</i> (regressione gesostatistica) per la spazializzazione dei dati pluviometrici.
Mele et al. 2022	Azione cumulativa di frane e terremoti	Per monitorare l'evoluzione nel tempo della frana si utilizza l'approccio della <i>Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry</i> (DInSAR). Viene implementata una procedura di analisi statica non lineare per la valutazione della sicurezza sismica basata su codici, in due diversi scenari (con o senza frana).
Merisalu et al. 2023	Abbassamento della falda acquifera	Un approccio probabilistico di analisi costi-benefici viene utilizzato per valutare la redditività economica degli investimenti per diverse alternative di mitigazione del rischio.
Merisalu et al. 2021	Abbassamento della falda acquifera	Viene adottata una stima probabilistica del rischio per valutare l'intera catena causa-effetto dalla fuoriuscita delle acque sotterranee alle conseguenze del danno. Inoltre, i giudizi forniti dagli esperti sono combinati con metodi basati su dati e processi.
Mondino et al. 2020	Pericolosità e rischio idrogeologico (in generale)	Un'indagine raccoglie dati empirici sulle dinamiche del comportamento umano per effetto di passate colate detritiche.

Segue **Tabella 1**. Pubblicazioni ottenute dalla ricerca bibliografica su pericolosità e rischio idrogeologico, riportate in ordine alfabetico per autore.

Riferimento	Problema analizzato	Metodo e tecnica di modellazione
Nascetti et al. 2015	Rischi idrologici e idrogeologici (in generale)	Per la generazione del DSM vengono adottate immagini satellitari SAR ad alta risoluzione, utilizzando una tecnica interferometrica (InSAR) e un approccio di stereo-mappatura radar-grammetrica rivitalizzato.
Pasculli et al. 2022	Flusso idrico del bacino fluviale	Un modello matematico-numerico viene applicato per modellare le dinamiche del flusso idrico superficiale.
Pomatto et al. 2022	Rischio idrogeologico (in generale) per l'abbandono dei terrazzamenti	È stato somministrato un sondaggio agli esperti per valutare le loro percezioni sugli elementi storici e sulle dinamiche del paesaggio.
Porfido et al. 2016	Alluvioni e frane	Un'indagine bibliografica e di documenti d'archivio è utilizzata per eseguire analisi geologiche-geomorfologiche in GIS.
Pour and Hashim 2017	Alluvioni e frane	I dati di telerilevamento sono utilizzati per mappare le caratteristiche geologiche strutturali e topografiche. Successivamente, viene implementato un processo di gerarchia analitica (con AHP) per la mappatura della suscettibilità alle frane.
Pratesi et al. 2015	Valutazione del rischio sismico e idrogeologico di edifici storici in aree urbane	I dati di <i>Persistent Scatterer Interferometry</i> (PSI) in banda C a media risoluzione di ERS-1/2, ENVISAT e RADARSAT-1 sono utilizzati per stabilire un metodo di classificazione propedeutico alla valutazione del rischio sismico e idrogeologico degli edifici storici nelle aree urbane.
Priesteri et al. 2020	Impermeabilizzazione del suolo	Per la mappatura dell'impermeabilizzazione dei suoli è stato adottato l'indice ecologico urbano consolidato denominato Fattore di Area del Biotopo. Esso esprime il rapporto tra la superficie ecologicamente efficace e la superficie totale del terreno, secondo le classi di copertura del suolo.
Sapienza and Falcone 2016	Fenomeni idrogeologici diversi	Un modello basato su agenti con un modello bayesiano <i>ad hoc</i> simula agenti cognitivi che devono imparare come le diverse fonti di informazione possano essere più o meno affidabili in diverse situazioni e rispetto a diversi fenomeni idrogeologici.
Sciuto et al. 2022	Esondazioni	Un'analisi decisionale multicriteriale basata su GIS viene utilizzata per sviluppare un piano di manutenzione dei corsi d'acqua per ridurre il rischio di esondazione dei torrenti nelle aree vallive e nelle intersezioni con le opere infrastrutturali, a causa della canna gigante (specie invasiva) negli argini dei corsi d'acqua. La sua distribuzione è stata mappata attraverso tecniche di telerilevamento (RS) applicate al GIS.
Zhu et al. 2020	Ricarica degli acquiferi	Un ampio set di dati è stato integrato e analizzato statisticamente sulla base di informazioni idrogeologiche, registrazioni piezometriche e misure di subsidenza del terreno effettuate mediante <i>Persistent Scatterer Interferometry</i> .

Gli autori delle 35 pubblicazioni di cui sopra hanno perseguito obiettivi differenti nell'analisi e nella valutazione della pericolosità e del rischio idrogeologico. Molti autori hanno proposto una valutazione dettagliata del territorio in esame per supportare urbanisti e decisori locali nell'individuazione delle aree più critiche, dove è prioritario intervenire al fine di ridurre i danni derivanti da rischi di natura idrogeologica (11 contributi su 35, ovvero il 31% del secondo sotto-campione). Ad esempio, Busico et al. (2020) hanno proposto una metodologia per l'attuazione di piani di gestione e l'individuazione di azioni preventive mirate per le aree più suscettibili alla generazione di deflussi. Caleca et al. (2022) hanno im-

plementato una procedura di valutazione quantitativa del rischio per mappare il pericolo delle frane a lento scorrimento nell'Italia centrale. Analogamente, Cardarilli et al. (2019) hanno identificato le aree più esposte al rischio frane nel Sud Italia attraverso l'implementazione di analisi stocastiche e l'uso di variabili spaziali, mentre Covelli et al. (2020) hanno ottenuto una mappa dell'erosione del suolo attraverso l'uso di una particolare equazione, la Revised Universal Soil Loss Equation. De Finis et al. (2018) e Colombo et al. (2018) hanno simulato, attraverso modelli numerici, il rischio idrogeologico, rispettivamente, di un sito archeologico e di un'infrastruttura sotterranea nel Nord Italia. Inoltre, El Ganainy et al. (2016) hanno studiato il rischio di instabilità nelle cavità carsiche e Ellena et al. (2020) hanno sviluppato un indicatore di rischio che può essere utilizzato per classificare i beni tramite un processo di *screening*. Gentilucci et al. (2021) hanno analizzato la vulnerabilità dei territori, concentrandosi sulle aree in cui non erano stati rilevati dissesti in passato. Pour e Hashim (2017) hanno combinato dati di telerilevamento e l'analisi AHP per implementare le mappe di rischio frana. Infine, Pristeri et al. (2020) hanno mappato e valutato il fattore di impermeabilizzazione del suolo attraverso l'indice *Biotope Area Factor*, per supportare la definizione di misure di mitigazione e compensazione.

Altri contributi forniscono un'analisi dettagliata di una specifica tipologia di rischio idrogeologico (17 articoli su 35, ovvero il 49% del secondo sotto-campione). A tal proposito, vale la pena citare Bianchini et al. (2015) che hanno analizzato l'attività erosiva verificatasi al di sotto del pavimento di una galleria a causa del deflusso dell'acqua e del trasporto solido associato; Figueroa-Miranda et al. (2020) che hanno studiato l'evoluzione della subsidenza negli ultimi quattordici anni nella città di Morelia in Messico. Per quanto riguarda il contesto italiano, Gattinoni e Scesi (2020) hanno valutato il fenomeno dell'innalzamento della falda e dell'interazione tra acque di falda e strutture e infrastrutture sotterranee nella città di Milano; Gentilucci et al. (2020) hanno calcolato gli indici di precipitazione estrema in Italia centrale dal 1961 al 2017; Lentini et al. (2020) hanno sviluppato una piattaforma intelligente (CLARA) per la raccolta di dati locali per strategie di allerta precoce e gestione di rischio frana nel caso di infrastrutture stradali in Italia meridionale; Mazza et al. (2015) hanno proposto una ricalibrazione delle tecniche di raccolta dei dati sulle precipitazioni cumulate attraverso informazioni radar in Toscana (Italia); Mancini et al. (2017) hanno proposto una metodologia per stimare il danno medio atteso sugli edifici residenziali causato dalle esondazioni nella città di Olbia. Mele et al. (2022) hanno analizzato gli effetti combinati di frane e terremoti su edifici in cemento armato a Moio della Civitella, una città situata nella Regione Campania (Italia meridionale); Pasculli et al. (2022) hanno modellato la dinamica del flusso idrico superficiale del bacino del fiume Pescara, situato in Abruzzo (Italia centrale). Pristeri et al. (2020) hanno mappato e valutato il grado di impermeabilizzazione del suolo nel comune di Padova (Italia settentrionale) utilizzando l'indice *Biotope Area Factor*; Porfido et al. (2016) e Pomatto et al. (2022) hanno delineato un quadro dell'attuale condizione di esposizione al rischio idrogeologico dei paesaggi terrazzati rispettivamente nella Regione Piemonte (Italia settentrionale) e nelle aree vesuviane e salernitane (nell'Italia meridionale). Il primo ha sviluppato un approccio valutativo che comprende analisi storiche e indagini sul campo, mentre il secondo ha adottato un approccio multidisciplinare sviluppato in ambiente GIS e basato sia su indagini bibliografiche e su documenti d'archivio, che su analisi geologico-geomorfologiche. Sciuto et al. (2022) hanno invece utilizzato un'analisi multicriteri basata su GIS e procedure di telerilevamento per mappare e quantificare la distribuzione spaziale a Calantino (Sicilia) della canna gigante, una specie invasiva che porta ad un aumento del rischio idrogeologico, ostruendo il regolare deflusso delle acque negli alvei fluviali. Li e Wang (2023) hanno sviluppato un metodo non parametrico di rilevamento bayesiano di tipo *compressive sensing* (ST-BCS) per l'interpolazione di dati di precipitazione variabili nello spazio e nel tempo, ma misurati in un numero limitato stazioni di misura e, quindi, scarse in termini di variabilità a livello spaziale. Zhu et al. (2020) hanno impiegato analisi statistiche per studiare strategie di gestione della ricarica degli acquiferi, utilizzando un ampio set di dati a partire da informazioni idrogeologiche, registrazioni piezometriche e misure di subsidenza eseguite mediante *Persistent Scatterer Interferometry* e livellamento.

Diversi autori si sono concentrati sulla definizione delle priorità di misure alternative di adattamento e mitigazione del rischio. In tale ambito, meritano una menzione Andrés et al. (2021) che hanno valutato diverse soluzioni per mitigare il rischio idrogeologico. Inoltre, Gattinoni e Scesi

(2017) hanno analizzato il *trend* dell'innalzamento del livello della falda freatica nell'area urbana di Milano (Italia settentrionale) e il suo impatto sull'aumento del rischio idrogeologico per le strutture sotterranee esistenti (ad esempio, gallerie della metropolitana, ecc.) e hanno discusso l'efficacia di diverse soluzioni per l'adattamento e la mitigazione del rischio. Merisalu et al. (2023, 2021) hanno proposto un quadro teorico-metodologico integrato per valutare la redditività degli interventi volti a mitigare il rischio idrogeologico e a ridurre i potenziali danni alle strutture sotterranee causati dal prelievo delle acque sotterranee e dalla subsidenza.

A differenza di altri studiosi, Sapienza e Falcone (2016), Falcone e Sapienza (2017) e Mondino et al. (2020) hanno incentrato la loro ricerca sull'attendibilità delle fonti informative relative ai fenomeni idrogeologici: in particolare, si sono focalizzati su come gli individui percepiscano il rischio potenziale e su come cambino nel tempo la loro consapevolezza e preparazione rispetto all'esposizione al rischio idrogeologico. Nascetti et al. (2015) hanno condotto invece un'analisi metodologica rispetto ai vantaggi e agli svantaggi dell'approccio radargrammetrico rispetto alla tecnica interferometrica InSAR, per la generazione di modelli digitali delle superfici (DSM) da utilizzare per la mappatura del rischio idrogeologico e la gestione strategica delle emergenze.

A valle di questa analisi preliminare, metodi o modelli utilizzati per la valutazione del rischio sono stati classificati a partire da 8 gruppi principali. La maggior parte di questi è rappresentata da approcci quantitativi, mentre una quota minore (circa il 2%) è costituita da metodi qualitativi o quali-quantitativi, ossia valutazioni multicriteri come definite da Munda et al. (1994). In particolare, i seguenti autori utilizzano tecniche geomatiche per individuare e/o monitorare i rischi idrogeologici: Bianchini et al. (2015); Pratesi et al. 2015; Pour e Hashim (2017); Figueroa-Miranda et al. (2020); Khan et al., (2022); Lentini et al. (2020); Mele et al. (2022); Nascetti et al., (2015); Zhu et al. (2020). Un gran numero di lavori utilizza modelli numerici, sia 3D che 2D, per rappresentare il fenomeno specifico in analisi: El Ganainy et al., (2016), Gattinoni e Scesi (2017), Colombo et al. (2018), De Finis et al. (2018), Pasculli et al. (2022), Li e Wang (2023; Mazza et al. (2015). Molti autori, infatti, affrontano il tema del rischio idrogeologico principalmente attraverso l'analisi spaziale, come Busico et al. (2020), Covelli et al. (2020), Gattinoni e Scesi (2020), Pristeri et al. (2020), talvolta combinandola con altre metodologie. In letteratura si trovano anche diversi modelli di previsione. Uno specifico modello di previsione basato su agenti è stato utilizzato da Sapienza e Falcone (2016) e Falcone e Sapienza (2017) per simulare i comportamenti degli agenti di fronte al rischio idrogeologico. L'analisi costi-benefici è utilizzata da Merisalu et al. (2023, 2021) per valutare strategie di mitigazione del rischio. L'AMC e un insieme di indicatori sono adottati rispettivamente da D'Alpaos e Bottacin (2021) e Andrés et al. (2021) per valutare le strategie di mitigazione del rischio. L'AMC è anche combinata con altre tecniche. Sciuto et al. (2022) hanno abbinato l'AMC al GIS per supportare lo sviluppo di un piano di manutenzione dei corsi d'acqua, mentre Pour e Hashim (2017) l'hanno combinata con il telerilevamento per sviluppare una mappa della vulnerabilità e del rischio frane. Infine, come già accennato, Pomatto et al. (2022) e Mondino et al. (2020) hanno somministrato questionari attraverso sondaggi per indagare come cambia nel tempo la consapevolezza del rischio idrogeologico e, di conseguenza, la preparazione e la risposta degli individui.

#### **4. Discussione dei risultati**

L'analisi della letteratura condotta ha dimostrato che per valutare la pericolosità e il rischio idrologico e idrogeologico vengono utilizzati diversi metodi e modelli. La maggior parte degli autori delle pubblicazioni ha utilizzato approcci quantitativi, mentre, di recente, un numero crescente di autori ha implementato metodi qualitativi o quali-quantitativi. Questi due approcci di valutazione del rischio idrologico/idrogeologico rispecchiano due prospettive per affrontarlo in qualche modo differenti. Da un lato, l'analisi tecnica degli impatti è di competenza di ingegneri, geologi e idrologi. Modelli quantitativi e statistici, in genere applicati a territori specifici, consentono di valutare gli effetti dei cambiamenti climatici e i relativi rischi idrologici e idrogeologici (si veda, ad esempio, Núñez et al, 2016; Leitão et al. 2017; Gattinoni e Scesi, 2017; Alodah e Seidou, 2019 e 2020; Aranda e García-Bartual, 2020; Kuchar e Broszkiewicz-Suwaj, 2022), ma anche di identificare le aree

di allerta, danno e allarme (come, Belloni et al., 2021, Ellena et al., 2020; Diodato et al., 2022) o di fare previsioni sulla frequenza di accadimento dei fenomeni (cfr. ad esempio Greco e Pagano, 2017; Lemus-Canovas et al. 2019; Busico et al., 2020).

D'altra parte, la pianificazione strategica e la *governance* rappresentano un ampio contesto di analisi del rischio idrologico e idrogeologico. Per quanto riguarda quest'ultima, si sta prestando sempre più attenzione agli aspetti socio-culturali, allo sviluppo di mappe di rischio, al coinvolgimento diretto degli *stakeholder* nei processi decisionali e allo sviluppo di una maggiore consapevolezza sul tema della sostenibilità da parte dei cittadini (si vedano ad esempio Luedeling et al., 2015; Paneque Salgado e Vargas Molina, 2015; Shelton et al., 2018; Ciampalini et al., 2019; Hynds et al., 2018; Guido Paliaga et al., 2019; Buurman et al., 2020; de Andrade e Szlafsztajn, 2020; Mondino et al., 2020; Sermet et al., 2020; D'Alpaos e Bottacin, 2021; Tananaev et al., 2021; Albulescu et al., 2022; Paliaga et al., 2022; Pomatto et al., 2022; Sciuto et al., 2022). I metodi qualitativi e quali-quantitativi sono spesso l'unico strumento per supportare gli enti pubblici, i decisori e i responsabili delle politiche nell'analizzare gli effetti del rischio idrologico/idrogeologico e nel definire azioni e strategie sostenibili e preventive per affrontare i problemi connessi alla mitigazione del rischio. La loro capacità di utilizzare anche narrazioni, dati qualitativi e preferenze individuali o di gruppo permette di ampliare la visione prospettica su questo tema e di includere competenze e conoscenze diverse. Inoltre, spesso rappresentano metodologie replicabili che possono essere applicate in contesti diversi e per rischi idrologici/idrogeologici diversi, adattando e/o integrando opportunamente l'insieme dei criteri o dei dati di input.

Per quanto riguarda la valutazione della pericolosità e del rischio, l'analisi della letteratura non permette di generalizzare e trovare tendenze prevalenti. Ciò è dovuto al fatto che gli autori fanno spesso riferimento sia alla pericolosità che al rischio nei loro contributi o utilizzano i termini come sinonimi. Questo problema di definizione non si limita al presente. Nel 1979, l'Ufficio delle Nazioni Unite per l'Assistenza in Caso di Catastrofe (UNDRO) ha cercato di trovare una nomenclatura comune, ad esempio, nell'ambito degli studi legati al rischio sismico almeno nelle pubblicazioni dell'UNESCO e nei rapporti UNDRO sulla prevenzione e la mitigazione dei disastri. Come risultato di questo processo di revisione, l'UNDRO ha delineato la pericolosità e il rischio come due concetti diversi. Secondo l'UNDRO, la pericolosità è «la probabilità che si verifichi, in un determinato periodo di tempo e in una determinata area, un fenomeno naturale potenzialmente dannoso», mentre il rischio è «il numero previsto di vite umane perse, di persone ferite, di danni alle proprietà e di interruzioni dell'attività economica a causa di un particolare fenomeno naturale» e, a sua volta, tiene conto del valore di questi elementi (UNDRO, 1979, p.5). Di conseguenza, l'identificazione e la valutazione della pericolosità dei fenomeni legati all'acqua in senso esteso dovrebbero essere preliminari alla valutazione dei rischi. I metodi e i modelli per la valutazione della pericolosità sono metodologicamente solidi, ma richiedono una elevata quantità e qualità dei dati di base. A tal riguardo, va sottolineato che i requisiti dei dati da utilizzare per alimentare i modelli dovrebbero essere formulati più dettagliatamente e le lacune informative individuate nell'analisi dovrebbero essere colmate il più rapidamente possibile.

Sono stati, inoltre, analizzati gli aspetti emersi come fondamentali dalla revisione della letteratura nella valutazione della pericolosità e del rischio idrologico e idrogeologico. In particolare, nella Tabella 2 sono elencati gli aspetti maggiormente investigati nella letteratura esistente. Tale elenco può essere utilizzato come *check list* preliminare per l'individuazione dei criteri da considerare nella valutazione del rischio idrologico e idrogeologico in base al contesto specifico dell'analisi e al rischio/problema da valutare, nonché al momento della valutazione (cioè *ex ante*, *in itinere* ed *ex-post*).

La Tabella 2 sintetizza gli aspetti/criteri più rilevanti che sono stati inclusi in molte delle applicazioni oggetto di indagine, quali ad esempio la copertura vegetale, la densità del suolo e le caratteristiche degli edifici in uno specifico territorio. A partire dalla Tabella 2, è inoltre possibile individuare alcuni cluster che rimandano al noto «*triple bottom line framework*» di sostenibilità, caratterizzato da tre componenti: sociale, economica e ambientale o ecologica. A titolo esemplificativo, tra i criteri/aspetti sopra elencati, il valore di mercato degli edifici interessati dal rischio idrologico/idrogeologico fa riferimento alla dimensione economica del concetto di sostenibilità, mentre la distribuzione, la densità e la dinamica de-

**Tabella 2.** Aspetti/criteri rilevanti emersi dall'analisi della letteratura

Aspetti/Criteri	Descrizione	Riferimenti
Sequestro di carbonio	Capacità del suolo di sequestrare carbonio	Andrés et al. 2021
Resilienza fisica del suolo	Erosione, stabilità, deflusso e capacità di ritenzione idrica del terreno	Andrés et al. 2021; Busico et al. 2020; Caleca et al. 2022; Cardarilli et al. 2019; Colombo et al. 2018; Covelli et al. 2020; El Ganainy et al. 2016; Figueroa-Miranda et al. 2020; Gentilucci et al. 2021; Pasculli et al. 2022; Pour and Hashim 2017; Alam et al. 2021; Paliaga et al. 2019; Albulescu et al., 2022; Pamukcu et al., 2016; Diodato et al. 2022; Hou et al. 2021; Xiao et al. 2017
Fertilità del suolo	Nutrienti totali nel terreno	Andrés et al. 2021; Pamukcu et al. 2016
Biodiversità	Diversità delle specie floro-faunistiche autoctone rispetto a quelle esotiche ed invasive	Andrés et al. 2021
Resilienza biologica	Stabilità della catena alimentare	Andrés et al. 2021
Copertura vegetale	Copertura vegetale di piante sia legnose che non legnose	Albulescu et al. 2022; Andrés et al. 2021; Covelli et al. 2020; Ellena et al. 2020; Pour and Hashim 2017; Sciuto et al. 2022; Albulescu et al. 2022; Hou et al. 2021; Pamukcu et al. 2016
Rischio incendi	Rischio di incendio basato sull'umidità, sull'infiammabilità e la tipologia di superficie vegetata	Andrés et al. 2021
Movimenti del terreno, localizzazione di frane o zone di inondazione	Localizzazione delle aree caratterizzate da movimenti del suolo, frane e zone di inondazione (e loro impatto e velocità)	Bianchini et al. 2015; Caleca et al. 2022; Gentilucci et al. 2021; Mele et al. 2022; Cai et al. (2016); Paliaga et al. 2019; Albulescu et al. 2022; Greco and Pagano 2017; Pamukcu et al. 2016; Xiao et al. 2017
Siti di interesse culturale o protetto	Distanza delle aree a rischio da siti culturali e protetti	Bianchini et al. 2015; Ellena et al. 2020; Pomatto et al. 2022
Pendenza e/o elevazione	Gradiente di pendenza o elevazione	Busico et al. 2020; Covelli et al. 2020; Gentilucci et al. 2021; Pour and Hashim 2017; Cai et al. (2016); Paliaga et al. 2019; Albulescu et al. 2022; Cai et al., 2016; Greco and Pagano 2017; Hou et al. 2021; Xiao et al. 2017;
Copertura del suolo	Uso del suolo e distribuzioni e tipologie della copertura del suolo	Busico et al. 2020; Caleca et al. 2022; Covelli et al. 2020; Gentilucci et al. 2021; Ellena et al. 2020; Pomatto et al. 2022; Pour and Hashim 2017; Pratesi et al. 2015; Sciuto et al. 2022; Paliaga et al. 2019; Heng et al. 2016; Pamukcu et al. 2016; Isensee et al., 2021
Distribuzione e caratteristiche degli edifici o degli abitanti	Distanza o densità delle aree a rischio dagli edifici/popolazione residente	Caleca et al. 2022; Ellena et al. 2020; Mele et al. 2022; Mondino et al. 2020; Pomatto et al. 2022; Cai et al. (2016); Hynds et al. 2018; Albulescu et al. 2022; Heng et al. 2016; Pamukcu et al. 2016
Valore di mercato degli edifici o dell'uso del terreno	Valore di mercato degli immobili, dei terreni e uso del suolo	Caleca et al. 2022
Acquiferi, dati relativi all'acqua o alle precipitazioni	Conduttività idraulica	Colombo et al. 2018; Gattinoni and Scesi 2017; Gentilucci et al. 2021; Gentilucci et al. 2020; Ellena et al. 2020; Pasculli et al. 2022; Pour and Hashim 2017; Sciuto et al. 2022; Bakhsh et al. 2020; Lemus-Canovas; Greco and Pagano 2017; Diodato et al. 2022; Belloni et al. 2021; Aranda and Garcia-Bartual 2020; Alodah and Seidou, 2020; Botai et al., 2018; Buurman et al., 2020; Kusangaya et al., 2018; Heng et al. 2016; Diodato et al. 2022; Hou et al. 2021; Isensee et al. 2021
Rete infrastrutturale	Ubicazione della rete infrastrutturale	Colombo et al. 2018; Gattinoni and Scesi 2017; Ellena et al. 2020; Pour and Hashim 2017

Segue **Tabella 2**. Aspetti/criteri rilevanti emersi dall'analisi della letteratura

Aspetti/Criteri	Descrizione	Riferimenti
Eventi estremi	Localizzazione di eventi estremi	Gentilucci et al. 2021; Mondino et al. 2020; Pomatto et al. 2022; Buurman et al. 2020; Heng et al. 2016; Kusangaya et al. 2018; Pamukcu et al. 2016
Sensibilizzazione al tema della sostenibilità	Conoscenza e consapevolezza dei cittadini rispetto alla sostenibilità	Ellena et al. 2020; Mondino et al. 2020; Hynds et al. 2018; Buurman et al. 2020
Mappatura di faglie	Distanza dalla faglia	Pour and Hashim 2017
Localizzazione dei corsi d'acqua	Distanza o distribuzione dei corsi d'acqua	Pour and Hashim 2017; Alam et al. 2021; Paliaga et al. 2019; Albulescu et al. 2022; Pamukcu et al. 2016; Xiao et al. 2017
Perdita di suolo	Consumo di suolo dovuto ad attività naturali e artificiali	Ellena et al. 2020; Cai et al. (2016); Paliaga et al. 2019
Costo del danno	Danni subiti da famiglie/comuni	Buurman et al. 2020

mografia della popolazione fanno riferimento alla dimensione sociale e, infine, le caratteristiche di resistenza di un suolo o la tipologia di superficie vegetata attengono alla dimensione ambientale.

In base alle evidenze riportate nella Tabella 2, gli aspetti/criteri ambientali sono attualmente predominanti in letteratura. Tuttavia, come già accennato, il concetto di sostenibilità si fonda su tre pilastri principali, rappresentati da ambiente, economia e società. I risultati dell'analisi rivelano effettivamente una lacuna nella letteratura e la necessità di ulteriori approfondimenti nelle applicazioni e nelle analisi future. In particolare, la valutazione delle componenti socio-economiche dovrebbe rappresentare una priorità nella ricerca futura. Per affrontare la questione delle strategie e delle politiche di gestione sostenibile del rischio, gli studiosi e gli operatori dovrebbero considerare le dimensioni ambientale, economica e sociale, nonché gli impatti sui territori e sulle comunità locali. L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile e i 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile (stabiliti dalle Nazioni Unite) esprimono, infatti, l'impegno assunto dai rappresentanti dell'ONU a «raggiungere lo sviluppo sostenibile nelle sue tre dimensioni - economica, sociale e ambientale - in modo equilibrato e integrato» (Nazioni Unite, 2015b). Ciononostante, i risultati rivelano che gli aspetti/criteri economici e sociali sono poco considerati nella valutazione dei rischi idrologico e idrogeologico e nelle loro strategie di mitigazione.

A sostegno delle conclusioni a cui si è giunti, è stato intervistato un gruppo di esperti nel campo della pericolosità e del rischio idrologico e idrogeologico, per valutare l'importanza rispettivamente degli aspetti ambientali, economici e sociali nella valutazione. In analogia con De Felice et al. (2018) e D'Alpaos & Andreolli (2020) è stato implementato un approccio metodologico che combina un'analisi bibliometrica e l'Analytic Hierarchy Process (AHP, proposta da Saaty negli anni Ottanta (Saaty, 1980)). Nello specifico, è stato sviluppato un modello AHP per ottenere un ordinamento dei tre criteri sopra citati in base all'importanza relativa. A tal fine è stato individuato un gruppo di nove esperti tra accademici a livello nazionale e internazionale ed è stato loro somministrato un questionario per elicitarne l'importanza relativa dei criteri, attraverso un processo di indagine Delphi. L'AHP permette di valutare criteri quantitativi e/o qualitativi rispetto ad una medesima scala di misura e la loro importanza relativa viene determinata attraverso confronti a coppie espressi sotto forma di giudizi semantici. Questi giudizi vengono poi convertiti in valori numerici secondo la scala fondamentale di Saaty (Saaty, 2000; Saaty & Peniwati, 2012; Saaty, 1980). Nel caso specifico, si è optato per un processo di indagine Delphi per raccogliere le opinioni degli esperti intervistati e gestire facilmente le potenziali opinioni divergenti, così da creare consenso sulla gerarchia e sull'importanza relativa dei criteri ambientali, economici e sociali. Il processo Delphi qui implementatosi è stato sviluppato in due fasi. In primo luogo, è stato costruito il questionario a partire dalle usuali domande di elicitazione tipiche dell'analisi gerarchica AHP (Figura 6). Nella prima fase, il questionario è stato inviato agli esperti e le risposte sono state analizzate. Nella seconda fase, sono state dapprima presentate agli esperti le statistiche descrittive e il valore soglia della mediana per de-

Rispetto all'obiettivo, esprimete la vostra opinione sull'importanza relativa dei criteri ambientali rispetto a quelli economici, dei criteri ambientali rispetto a quelli sociali e dei criteri economici rispetto a quelli sociali, barrando il giudizio riportato nelle celle blu sottostanti se i criteri in blu sono più importanti di quelli in rosso e viceversa:

Ambientali	Estremamente più importanti	Molto più importanti	Più importanti	Un po' più importanti	Uguale importanza	Un po' più importanti	Più importanti	Molto più importanti	Estremamente più importanti	Economici
Ambientali	Estremamente più importanti	Molto più importanti	Più importanti	Un po' più importanti	Uguale importanza	Un po' più importanti	Più importanti	Molto più importanti	Estremamente più importanti	Sociali
Economici	Estremamente più importanti	Molto più importanti	Più importanti	Un po' più importanti	Uguale importanza	Un po' più importanti	Più importanti	Molto più importanti	Estremamente più importanti	Sociali

**Figura 6.** Domande di elicitazione delle preferenze nel modello AHP, formulate secondo la scala fondamentale di Saaty.

terminare il raggiungimento di un accordo (ovvero 51%) ed è, quindi, stato raggiunto il consenso. I risultati delle elaborazioni mostrano che, sebbene gli esperti attribuiscano un'importanza relativa quasi uguale ai criteri ambientali (0,44) e a quelli economici (0,42), tuttavia i criteri sociali dimostrano un'importanza relativa non trascurabile (0,14). In effetti, l'ordinamento finale dei criteri in termini di importanza relativa nella valutazione del rischio e nella progettazione delle politiche è costituito da criteri ambientali, economici e sociali. Data l'indubbia importanza dei criteri economici e sociali nell'informare i processi decisionali pubblici volti a mitigare i rischi legati all'acqua, emerge l'urgente necessità di colmare le lacune riscontrate in letteratura, al fine di supportare i decisori politici e pubblici.

In tale contesto, l'adozione di metodi facenti parte della famiglia delle analisi multicriteri (AMC) risulta particolarmente promettente al fine di tenere conto dei vari *stakeholder* coinvolti e dei diversi obiettivi in gioco, spesso contrastanti. L'AMC fornisce un quadro teorico e metodologico adeguato per affrontare la complessità dei fattori economici, sociali e ambientali che caratterizzano la definizione di strategie e politiche di mitigazione del rischio idraulico e geologico (D'Alpaos & Bottacin, 2021). Inoltre, poiché l'AMC ha lo scopo di supportare il decisore nella strutturazione del problema decisionale e nell'identificazione delle diverse parti interessate e degli attori coinvolti (i cui interessi sono spesso conflittuali tra loro), la possibilità offerta dalle tecniche multicriteri di prendere in considerazione le opinioni e i valori degli attori e dei diversi *stakeholder* può contribuire a migliorare la legittimità e la trasparenza dei processi decisionali pubblici. Tuttavia, un fattore importante nella valutazione del rischio è il tempo. A questo proposito, gli approcci AMC non si concentrano specificamente né sulla dimensione temporale né sull'effetto del tempo sui giudizi di valore e sulla definizione di criteri e sotto-criteri. Per affrontare il problema del tempo, gli approcci AMC possono essere combinati con altri approcci che tengono conto della dimensione temporale, come l'analisi costi-benefici. Alcuni autori hanno già implementato approcci AMC in combinazione con altri metodi e strumenti (ad esempio, Pamukcu et al., 2016; Paliaga et al., 2019; D'Alpaos e Bottacin, 2021; Albuлесcu et al., 2022; Sciuto et al., 2022). L'inclusione nella fase di strutturazione del problema decisionale di *focus group* e di interviste agli *stakeholder* sono già stati proposti in alcuni contributi (ad esempio, Luedeling et al., 2015; Paneque Salgado e Vargas Molina, 2015; Hynds et al., 2018; Shelton et al., 2018; Ciampalini et al., 2019; Buurman et al., 2020; de Andrade e Szlafsztein, 2020; Mondino et al., 2020; Sermet et al., 2020; Tananaev et al., 2021; Paliaga et al., 2022; Pomatto et al., 2022).

Alla luce di tali considerazioni, per fornire un valido e utile supporto ai decisori, la ricerca attuale e futura dovrà promuovere un'indagine approfondita sugli aspetti economici e sociali relativi all'attuazione delle strategie di mitigazione del rischio. Inoltre, poiché gli investimenti in soluzioni strutturali e non strutturali richiedono una spesa iniziale piuttosto elevata, i diversi interventi dovranno essere realizzati per fasi successive, a causa della persistente mancanza di risorse finanziarie pubbliche. Di conseguenza, è fondamentale una classificazione degli investimenti in base alla priorità di intervento, tenendo conto delle implicazioni non solo economiche, ma anche sociali e ambientali.

## 5. Conclusioni

Il presente studio ha fornito una panoramica dei metodi, dei modelli e degli strumenti utilizzati nella valutazione delle pericolosità e del rischio idrologico e geologico. L'obiettivo del lavoro era duplice: da una parte, promuovere una maggiore consapevolezza su come utilizzare le tecniche di valutazione, intese come strumenti di gestione della complessità delle questioni affrontate; dall'altra, comprendere

meglio le preoccupazioni più significative associate ai pericoli e ai rischi legati all'acqua. Nello specifico, lo studio ha evidenziato una lacuna nella letteratura esistente e ha quindi proposto un'analisi della stessa approfondendo i seguenti tre temi: a) presentazione delle procedure attualmente adottate per la valutazione della pericolosità e del rischio idrologico e idrogeologico; b) identificazione degli attuali limiti e delle carenze nella valutazione di questi fenomeni, principalmente legati alla multidimensionalità che caratterizza in questi temi; c) definizione di una lista di criteri e loro relativa discussione, secondo quanto emerso dall'analisi della letteratura, da utilizzarsi per una valutazione multicriteri della pericolosità e del rischio idrologico e idrogeologico in diversi contesti.

Dall'analisi dei contributi esistenti si evince che i modelli quantitativi e statistici sono generalmente utilizzati per la previsione o la descrizione di fenomeni potenzialmente catastrofici in contesti specifici. Al contrario, i metodi qualitativi e quali-quantitativi sono metodologie replicabili, che possono essere utilizzate in numerosi contesti per la valutazione delle diverse componenti di rischio.

L'analisi della letteratura ha inoltre fatto emergere alcune questioni di particolare rilevanza. In primo luogo, la crescente importanza di temi quali la resilienza dei territori e la sostenibilità delle politiche e delle strategie di gestione e mitigazione dei rischi ha messo in luce la rilevanza delle questioni sociali ed economiche oltre a quelle ambientali, finora predominanti in questo campo. In secondo luogo, i metodi qualitativi e quali-quantitativi rappresentano spesso l'unico modo per supportare le autorità e le amministrazioni pubbliche, i decisori e i responsabili politici nella definizione di azioni e strategie di mitigazione del rischio efficaci, ma al tempo stesso sostenibili. Tuttavia, sono ancora necessari ulteriori approfondimenti per quanto riguarda la valutazione dell'impatto economico e sociale dei rischi legati all'acqua. Vi è inoltre la necessità di sperimentare modelli innovativi e robusti per tenere conto dell'intera gamma di obiettivi, opinioni e sistemi di valori sottostanti a questi problemi.

I risultati di questo studio suggeriscono di includere nella valutazione una visione olistica di tutti gli impatti, sia ambientali sia socio-economici, correlati alla pericolosità e al rischio idraulico e geologico. È fondamentale prendere in considerazione tali aspetti per supportare in maniera efficiente ed efficace i decisori nelle proprie scelte, che generalmente si inseriscono in contesti decisionali di grande complessità. Da un lato, sono necessari grandi investimenti per sviluppare strategie e soluzioni per contrastare i rischi idrologici e idrogeologici. Dall'altro, una crescente parte della popolazione mondiale sta sperimentando danni sempre più frequenti, causati dall'esposizione ai rischi dovuti ai cambiamenti climatici.

Dalla disamina della letterature si evince inoltre come questi temi siano in linea con la nuova proposta della Commissione Statistica del Consiglio Economico e Sociale delle Nazioni Unite (ECOSOC) e preparata dallo speciale Comitato di Esperti del Dipartimento degli Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite (DESA), che ha proposto il cosiddetto Sistema di Contabilità Economica Ambientale - Contabilità degli Ecosistemi (SEEA EA). Si tratta di un quadro statistico integrato finalizzato a organizzare in maniera sistematica e analizzare informazioni riguardanti i servizi ecosistemici da integrare nella pianificazione economica per monitorare la sostenibilità delle attività economiche.

Alla luce di queste considerazioni, risulta particolarmente rilevante e sfidante lo sviluppo di metodi innovativi e olistici per supportare i decisori nella progettazione di strategie di mitigazione del rischio in grado di essere resilienti, sostenibili e di lungo periodo. Inoltre, l'adozione di un approccio di tipo misto può rappresentare una scelta efficace per l'integrazione di dati quantitativi e qualitativi sistematici, delle opinioni e degli obiettivi dei diversi *stakeholder* coinvolti in processi decisionali complessi, come quelli relativi alla mitigazione e alla gestione del rischio. In questo contesto, la sperimentazione di approcci di aiuto alle decisioni basati su criteri multidimensionali e integrati con altri metodi, come proposto da alcuni autori citati in precedenza, quali GIS, modelli ad agenti o analisi costi-benefici, può essere vincente per la valutazione delle diverse componenti di rischio in contesti anche molto diversi tra loro.

Tuttavia, è opportuno sottolineare anche i limiti del presente contributo. In primo luogo, esso si è basato unicamente sulla letteratura contenuta nel database Scopus. Sebbene Scopus rappresenti uno dei database più completi, la raccolta di articoli da Google Scholar e Web of Science potrebbe ampliare l'insieme dei contributi derivanti dalle stringhe di ricerca utilizzate. In secondo luogo, sebbene la "*refine result page*" di Scopus sia un utile strumento fornito dal database per selezionare le parole chiave, tuttavia, in presenza di un gran numero di contributi, alcune di esse non emergono, in quanto associate a un numero molto basso di documenti. In terzo luogo, l'utilizzo di «hydrolog\*» e «hydrogeol\*» per le

stringhe di ricerca può aver generato una perdita in termini di documenti basati, al contrario, su termini specifici come «avalanch\*» (valanghe) o flood\*» (alluvioni).

Nonostante i suoi limiti, lo studio offre importanti spunti di riflessione sui processi decisionali e di gestione della pericolosità e dei rischi idrologici e idrogeologici. Inoltre, esso potrebbe servire anche come linea guida per ricerche future, grazie all'approccio multidimensionale e multidisciplinare adottato nell'analisi del rischio.

## Ringraziamenti

Gli autori vogliono sottolineare il sostegno finanziario della Regione Veneto nello sviluppo del presente lavoro, che si inserisce nell'ambito della convenzione di ricerca istituzionale CUP: H15F21001670002.

## Contributo degli autori

Gli autori hanno lavorato in egual misura allo sviluppo della ricerca/applicazione e alla stesura dei documenti. Caterina Caprioli: Concettualizzazione, Metodologia, Validazione, Indagine, Scrittura - Bozza originale, Scrittura - Revisione ed Editing, Visualizzazione. Chiara D'Alpaos: Concettualizzazione, Metodologia, Validazione, Indagine, Scrittura - Revisione ed Editing, Visualizzazione, Acquisizione fondi.

## Bibliografia

- Acharya, B. S., & Kharel, G. (2020). Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. *Journal of Hydrology*, 588, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>
- Acreman, M., Smith, A., Charters, L., Tickner, D., Opperman, J., Acreman, S., Edwards, F., Sayers, P., & Chivava, F. (2021). Evidence for the effectiveness of nature-based solutions to water issues in Africa. *Environmental Research Letters*, 16(6), 063007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0210>
- Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575–576, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.047>
- Albulescu, A.-C., Minea, I., Boicu, D., & Larion, D. (2022). Comparative Multi-Criteria Assessment of Hydrological Vulnerability—Case Study: Drainage Basins in the Northeast Region of Romania. *Water (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/w14081302>
- Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., & Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.01.008>
- Alodah, A., & Seidou, O. (2019). Assessment of climate change impacts on extreme high and low flows: An improved bottom-up approach. *Water (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/w11061236>
- Alodah, A., & Seidou, O. (2020). Influence of output size of stochastic weather generators on common climate and hydrological statistical indices. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(7), 993–1021. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01825-w>
- Andrés, P., Doblás-Miranda, E., Mattana, S., Molowny-Horas, R., Vayreda, J., Guardiola, M., Pino, J., & Gordillo, J. (2021). A battery of soil and plant indicators of nbs environmental performance in the context of global change. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13041913>
- Aranda, J. A., & García-Bartual, R. (2020). Effect of seasonality on the quantiles estimation of maximum floodwater levels in a reservoir and maximum outflows. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020519>
- Aygün, O., Kinnard, C., & Campeau, S. (2020). Impacts of climate change on the hydrology of northern midlatitude cold regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(3), 338–375. <https://doi.org/10.1177/0309133319878123>
- Bakhsh, S. T., Basher, M., Ahmed, N., & Shahzad, B. (2020). A flood forecasting model based on wireless sensor and actor networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(8), 438–446. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110856>
- Bayazit, M. (2015). Nonstationarity of Hydrological Records and Recent Trends in Trend Analysis: A State-

- of-the-art Review. *Environmental Processes*, 2(3), 527–542. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0081-7>
- Beevers, Lindsay, Popescu, I., Pregnoiato, M., Liu, Y., & Wright, N. (2022). Identifying hotspots of hydro-hazards under global change: A worldwide review. *Frontiers in Water*, 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.879536>
- Beevers, Lindsay, White, C., & Pregnoiato, M. (2019). Special Issue “Impacts of Compound Hydrological Hazards or Extremes.” *Geosciences*.
- Belloni, R., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2021). Towards the continuous monitoring of the extreme events through satellite radar altimetry observations. *Journal of Hydrology*, 603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126870>
- Benvenuti, M., & Martini, I. P. (2002). Analysis of terrestrial hyperconcentrated flows and their deposits. *International Association of Sedimentologists Special Publications*, 32, 167–193.
- Bianchini, S., Ciampalini, A., Raspini, F., Bardi, F., Di Traglia, F., Moretti, S., & Casagli, N. (2015). Multi-Temporal Evaluation of Landslide Movements and Impacts on Buildings in San Fratello (Italy) By Means of C-Band and X-Band PSI Data. *Pure and Applied Geophysics*, 172(11), 3043–3065. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0839-2>
- Blöschl, G., Viglione, A., & Montanari, A. (2013). Emerging Approaches to Hydrological Risk Management in a Changing World. In *Climate Vulnerability* (pp. 3–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00505-0>
- Botai, C. M., Botai, J. O., & Adeola, A. M. (2018). Spatial distribution of temporal precipitation contrasts in South Africa. *South African Journal of Science*, 114(7–8). <https://doi.org/10.17159/sajs.2018/20170391>
- Bottero, M., Caprioli, C., & Oppio, A. (2021). A Literature Review on Construction Costs Estimation: Hot Topics and Emerging Trends (pp. 117–131). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4_9)
- Bottero, M., Dell’Anna, F., & Morgese, V. (2021). Evaluating the Transition Towards Post-Carbon Cities: A Literature Review. *Sustainability*, 13(2), 567. <https://doi.org/10.3390/su13020567>
- Bredemeier, M. (2009). Contributions of forests and forestry to regulating water fluxes and supplies. *GWF, Wasser - Abwasser*, 150(11), 904–909.
- Busico, G., Colombani, N., Fronzi, D., Pellegrini, M., Tazioli, A., & Mastrocicco, M. (2020). Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin. *Journal of Environmental Management*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110625>
- Buurman, J., Bui, D. D., & Du, L. T. T. (2020). Drought risk assessment in Vietnamese communities using household survey information. *International Journal of Water Resources Development*, 36(1), 88–105. <https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1557038>
- Cai, H., Lam, N. S.-N., Zou, L., Qiang, Y., & Li, K. (2016). Assessing community resilience to coastal hazards in the Lower Mississippi River Basin. *Water (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/w8020046>
- Caleca, F., Tofani, V., Segoni, S., Raspini, F., Rosi, A., Natali, M., Catani, F., & Casagli, N. (2022). A methodological approach of QRA for slow-moving landslides at a regional scale. *Landslides*, 19(7), 1539–1561. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01875-x>
- Cardarilli, M., Lombardi, M., & Corazza, A. (2019). Landslide risk management through spatial analysis and stochastic prediction for territorial resilience evaluation. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 9(2), 109–120. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V9-N2-109-120>
- Carey, M., Molden, O. C., Rasmussen, M. B., Jackson, M., Nolin, A. W., & Mark, B. G. (2017). Impacts of Glacier Recession and Declining Meltwater on Mountain Societies. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 350–359. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1243039>
- Ciampalini, A., Frodella, W., Margottini, C., & Casagli, N. (2019). Rapid assessment of geo-hydrological hazards in Antananarivo (Madagascar) historical centre for damage prevention. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1102–1124. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1564375>
- Clar, C. (2019). How demographic developments determine the management of hydrometeorological hazard risks in rural communities: The linkages between demographic and natural hazards research. *WIREs Water*, 6(6). <https://doi.org/10.1002/wat2.1378>
- Cochard, R., Ranamukhaarachchi, S. L., Shivakoti, G. P., Shipin, O. V., Edwards, P. J., & Seeland, K. T. (2008). The 2004 tsunami in Aceh and Southern Thailand: A review on coastal ecosystems, wave hazards and vulnerability. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 10(1), 3–40.

<https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.11.001>

- Colombo, L., Gattinoni, P., & Scesi, L. (2018). Stochastic modelling of groundwater flow for hazard assessment along the underground infrastructures in Milan (northern Italy). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 79, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.05.007>
- Covelli, C., Cimorelli, L., Pagliuca, D. N., Molino, B., & Pianese, D. (2020). Assessment of erosion in river Basins: A distributed model to estimate the sediment production over watersheds by a 3-dimensional LS factor in RUSLE model. *Hydrology*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology7010013>
- D'Alpaos, C., & Andreolli, F. (2020). Urban quality in the city of the future: A bibliometric multicriteria assessment model. *Ecological Indicators*, 117, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106575>
- D'Alpaos, C., & Bottacin, G. (2021). Social Choices and Public Decision-Making in Mitigation of Hydrogeological Risk. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 12956 LNCS. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87010-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87010-2_20)
- D'Alpaos, C., & Bragolusi, P. (2018). Buildings energy retrofit valuation approaches: State of the art and future perspectives. *Valori e Valutazioni*, 20, 79–92.
- Datola, G., Assumma, V., Appiotti, F., Bottero, M., Rinaldi, E., Campostrini, P., & Lombardi, P. (2024). The ResCult project: Implementation of the risk analysis interface for the Church of Santa Maria dei Miracoli and the Covent of San Nicola (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 67, 164–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.02.013>
- de Andrade, M. M. N., & Szlafsztein, C. F. (2020). Coping and adaptation strategies and institutional perceptions of hydrological risk in an urban Amazonian city. *Disasters*, 44(4), 708–725. <https://doi.org/10.1111/disa.12414>
- De Felice, F., Petrillo, A., & Zomparelli, F. (2018). A Bibliometric Multicriteria Model on Smart Manufacturing from 2011 to 2018. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1643–1648. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.221>
- De Finis, E., Gattinoni, P., Scesi, L., & Valletta, A. (2018). Conceptual and numerical modelling for hydrogeological hazard assessment in the unesco site of castelseprio (Northern Italy). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 18(1.2), 161–176. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.2/S02.021>
- Dehghani, M., Saghafian, B., & Zargar, M. (2019). Probabilistic hydrological drought index forecasting based on meteorological drought index using Archimedean copulas. *Hydrology Research*, 50(5), 1230–1250. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.051>
- Didier, D., Bernatchez, P., & Dumont, D. (2018). Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique ? *Revue Des Sciences de l'eau*, 30(2), 115–146. <https://doi.org/10.7202/1042922ar>
- Diodato, N., Borrelli, P., Panagos, P., & Bellocchi, G. (2022). Global assessment of storm disaster-prone areas. *PLoS ONE*, 17(8 August). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272161>
- Donnelly, C., Kraus, N., & Larson, M. (2006). State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. *Journal of Coastal Research*, 22(4), 965–991.
- El Ganainy, H., Demirkan, M. M., Gutierrez, J. J., Ramanathan, R., Hatipoglu, B., Adib, M. E., & Barton, D. (2016). Stability of Solution Cavities in Urban Developments: A Case Study Towards Enhancing Geohazard Risk Assessment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 125–141. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9933-1>
- Ellena, M., Ricciardi, G., Barbato, G., Buffa, A., Villani, V. & Mercogliano, P. (2020). Past and future hydrogeological risk assessment under climate change conditions over urban settlements and infrastructure systems: the case of a sub-regional area of Piedmont, Italy. *Natural Hazards*, 102(1), 275–305. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03925-w>
- Falcone, R., & Sapienza, A. (2017). Interactions among information sources in weather scenarios: The role of the subjective impulsivity. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 10349 LNCS. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59930-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59930-4_5)
- Fan, Y., Yu, L., & Shi, X. (2021). Uncertainty quantification and partition for multivariate risk inferences through a factorial multimodel Bayesian copula (FMBC) system. *Journal of Hydrology*, 598.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126406>

- Fasihi, S., Lim, W. Z., Wu, W., & Proverbs, D. (2021). Systematic Review of Flood and Drought Literature Based on Science Mapping and Content Analysis. *Water*, 13(19), 2788. <https://doi.org/10.3390/w13192788>
- Figueroa-Miranda, S., Hernández-Madrigal, V. M., Tuxpan-Vargas, J., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2020). Evolution assessment of structurally-controlled differential subsidence using SBAS and PS interferometry in an emblematic case in Central Mexico. *Engineering Geology*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105860>
- Garrick, D., & Hall, J. W. (2014). Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 611–639. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817>
- Gattinoni, P., & Scesi, L. (2017). The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 62, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.001>
- Gattinoni, P., & Scesi, L. (2020). From hydrogeological hazard identification to risk assessment in tunnelling: An example in northern Italy. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2020-Augus(1.1), 519–530. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.1/s02.064>
- Gentilucci, M., Barbieri, M., D'Aprile, F., & Zardi, D. (2020). Analysis of extreme precipitation indices in the Marche region (central Italy), combined with the assessment of energy implications and hydrogeological risk. *Energy Reports*, 6, 804–810. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.006>
- Gentilucci, M., Materazzi, M., & Pambianchi, G. (2021). Statistical analysis of landslide susceptibility, Macerata Province (Central Italy). *Hydrology*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010005>
- Greco, R., & Pagano, L. (2017). Basic features of the predictive tools of early warning systems for water-related natural hazards: Examples for shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(12), 2213–2227. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2213-2017>
- Grimaldi, S., Volpi, E., Langousis, A., Michael Papalexiou, S., Luciano De Luca, D., Piscopia, R., Nerantzaki, S. D., Papacharalampous, G., & Petroselli, A. (2022). Continuous hydrologic modelling for small and ungauged basins: A comparison of eight rainfall models for sub-daily runoff simulations. *Journal of Hydrology*, 610, 127866. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127866>
- Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q., & Zhou, S. (2018). Flood risk analysis for flood control and sediment transportation in sandy regions: A case study in the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 560, 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.076>
- Hamdani, R. S., Hadi, S. P., & Rudiarto, I. (2021). Progress or Regress? A Systematic Review on Two Decades of Monitoring and Addressing Land Subsidence Hazards in Semarang City. *Sustainability*, 13(24), 13755. <https://doi.org/10.3390/su132413755>
- Hamel, P., & Tan, L. (2022). Blue–Green Infrastructure for Flood and Water Quality Management in Southeast Asia: Evidence and Knowledge Gaps. *Environmental Management*, 69(4), 699–718. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01467-w>
- Hariri-Ardebili, M. A. (2017). Analytical failure probability model for generic gravity dam classes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 231(5), 546–557. <https://doi.org/10.1177/1748006X17712663>
- Harrington, C., Montana, P., Schmidt, J. J., & Swain, A. (2023). Race, Ethnicity, and the Case for Intersectional Water Security. *Global Environmental Politics*, 23(2), 1–10. [https://doi.org/10.1162/glep\\_a\\_00702](https://doi.org/10.1162/glep_a_00702)
- Henriksen, H. J., Roberts, M. J., van der Keur, P., Harjanne, A., Egilson, D., & Alfonso, L. (2018). Participatory early warning and monitoring systems: A Nordic framework for web-based flood risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1295–1306. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.01.038>
- Hou, Y., Zhang, M., Wei, X., Liu, S., Li, Q., Cai, T., Liu, W., Zhao, R., & Liu, X. (2021). Quantification of ecohydrological sensitivities and their influencing factors at the seasonal scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1447–1466. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1447-2021>
- Hynds, P., Naughton, O., O'Neill, E., & Mooney, S. (2018). Efficacy of a national hydrological risk communication strategy: Domestic wastewater treatment systems in the Republic of Ireland. *Journal of Hydrology*, 558, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.041>
- Isensee, L. J., Pinheiro, A., & Detzel, D. H. M. (2021). Dam Hydrological Risk and the Design Flood Under

- Non-stationary Conditions. *Water Resources Management*, 35(5), 1499–1512. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02798-3>
- Kääb, A. (2008). Remote sensing of permafrost-related problems and hazards. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2), 107–136. <https://doi.org/10.1002/ppp.619>
- Khan, M. Y., Hwang, J., Min, D.-J., Turab, S. A., & Jan, I. U. (2022). Synthetic modeling and field GPR survey to understand the near-surface deformation induced by coseismic groundwater dynamics following the 2019 Mirpur earthquake in Pakistan. *The Leading Edge*, 41(8), 529–539. <https://doi.org/10.1190/tle41080529.1>
- Klein, C., Jackson, L. S., Parker, D. J., Marsham, J. H., Taylor, C. M., Rowell, D. P., Guichard, F., Vischel, T., Famien, A. M., & Diedhiou, A. (2021). Combining CMIP data with a regional convection-permitting model and observations to project extreme rainfall under climate change. *Environmental Research Letters*, 16(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac26f1>
- Kuchar, L., & Broszkiewicz-Suwaj, E. (2022). QUANTILE ESTIMATION OF PROBABILITY DISTRIBUTIONS FOR MAXIMUM DAILY PRECIPITATION AND SHORT TIME SERIES OF OBSERVATIONAL DATA FOR ENGINEERING DESIGN. *Environment Protection Engineering*, 48(1), 35–50. <https://doi.org/10.37190/epe220103>
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., Huang, S., Milly, P. C. D., Stoffel, M., Driessen, P. P. J., Quevauviller, P., & Schellnhuber, H.-J. (2017). Differences in flood hazard projections in Europe—their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
- Kusangaya, S., Warburton Toucher, M. L., & van Garderen, E. A. (2018). Evaluation of uncertainty in capturing the spatial variability and magnitudes of extreme hydrological events for the uMngeni catchment, South Africa. *Journal of Hydrology*, 557, 931–946. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.017>
- Leitão, J. P., Simões, N. E., Pina, R. D., Ochoa-Rodríguez, S., Onof, C., & Sá Marques, A. (2017). Stochastic evaluation of the impact of sewer inlets' hydraulic capacity on urban pluvial flooding. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(8), 1907–1922. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1283-x>
- Lemus-Canovas, M., Ninyerola, M., Lopez-Bustins, J. A., Manguan, S., & Garcia-Sellés, C. (2019). A mixed application of an objective synoptic classification and spatial regression models for deriving winter precipitation regimes in the Eastern Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2244–2259. <https://doi.org/10.1002/joc.5948>
- Lentini, V., Castelli, F., & Distefano, G. (2020). Management of Transport Infrastructures: A Procedure to Assess the Landslide Risk. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 40). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6_13)
- Lerner, A. M., Eakin, H. C., Tellman, E., Bausch, J. C., & Hernández Aguilar, B. (2018). Governing the gaps in water governance and land-use planning in a megacity: The example of hydrological risk in Mexico City. *Cities*, 83, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.06.009>
- Li, P., & Wang, Y. (2023). Interpretation of spatio-temporal variation of precipitation from spatially sparse measurements using Bayesian compressive sensing (BCS). *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(3), 554–571. <https://doi.org/10.1080/17499518.2023.2188464>
- Luedeling, E., Oord, A. L., Kiteme, B., Ogalleh, S., Malesu, M., Shepherd, K. D., & de Leeuw, J. (2015). Fresh groundwater for Wajir—ex-ante assessment of uncertain benefits for multiple stakeholders in a water supply project in Northern Kenya. *Frontiers in Environmental Science*, 3(MAR). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00016>
- Mancini, M., Lombardi, G., Mattia, S., Oppio, A., & Torrieri, F. (2017). An integrated model for Ex-ante evaluation of flood damage to residential building. In *Green Energy and Technology* (Vol. 0, Issue 9783319496). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49676-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49676-4_12)
- Maragno, D., Gaglio, M., Robbi, M., Appiotti, F., Fano, E. A., & Gissi, E. (2018). Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. *Ecological Modelling*, 386, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.08.002>
- Mazza, A., Antonini, A., Melani, S., & Ortolani, A. (2015). Recalibration of cumulative rainfall estimates by weather radar over a large area. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 095993.

<https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095993>

- Mele, A., Miano, A., Di Martire, D., Infante, D., Ramondini, M., & Prota, A. (2022). Potential of remote sensing data to support the seismic safety assessment of reinforced concrete buildings affected by slow-moving landslides. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(2). <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00407-7>
- Merino, A., Fernández-González, S., García-Ortega, E., Sánchez, J. L., López, L., & Gascón, E. (2018). Temporal continuity of extreme precipitation events using sub-daily precipitation: application to floods in the Ebro basin, northeastern Spain. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1877–1892. <https://doi.org/10.1002/joc.5302>
- Merisalu, J., Sundell, J., & Rosén, L. (2021). A Framework for Risk-Based Cost-Benefit Analysis for Decision Support on Hydrogeological Risks in Underground Construction. *Geosciences*, 11(2), 82. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020082>
- Merisalu, J., Sundell, J., & Rosén, L. (2023). Probabilistic cost-benefit analysis for mitigating hydrogeological risks in underground construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104815. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104815>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, 339(jul21 1), b2535–b2535. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Mondino, E., Scolobig, A., Borga, M., Albrecht, F., Mård, J., Weyrich, P., & Di Baldassarre, G. (2020). Exploring changes in hydrogeological risk awareness and preparedness over time: a case study in northeastern Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 65(7), 1049–1059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1729361>
- Munda, G., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (1994). Qualitative multicriteria evaluation for environmental management. *Ecological Economics*, 10(2), 97–112. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0921-8009(94)90002-7)
- Nascetti, A., Capaldo, P., Porfiri, M., Pieralice, F., Fratarcangeli, F., Benenati, L., & Crespi, M. (2015). Fast terrain modelling for hydrogeological risk mapping and emergency management: the contribution of high-resolution satellite SAR imagery. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 554–582. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.904824>
- Nie, Y., Pritchard, H. D., Liu, Q., Hennig, T., Wang, W., Wang, X., Liu, S., Nepal, S., Samyn, D., Hewitt, K., & Chen, X. (2021). Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 91–106. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w>
- Núñez, J., Hallack-Alegría, M., & Cadena, M. (2016). Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: The Latin America and the Caribbean Drought Atlas. *Journal of Hydrology*, 538, 515–538. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.025>
- OECD. (2020). Nature-based solutions for adapting to water-related climate risks.
- Pahl-Wostl, C., Palmer, M., & Richards, K. (2013). Enhancing water security for the benefits of humans and nature—the role of governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 676–684. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.018>
- Paliaga, G., Faccini, F., Luino, F., & Turconi, L. (2019). A spatial multicriteria prioritizing approach for geo-hydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(1), 53–69. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-53-2019>
- Paliaga, G., Luino, F., Turconi, L., Profeta, M., Vojinovic, Z., Cucchiaro, S., & Faccini, F. (2022). Terraced Landscapes as NBSs for Geo-Hydrological Hazard Mitigation: Towards a Methodology for Debris and Soil Volume Estimations through a LiDAR Survey. *Remote Sensing*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153586>
- Paliaga, Guido, Faccini, F., Luino, F., & Turconi, L. (2019). A spatial multicriteria prioritizing approach for geo-hydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-53-2019>
- Pamukcu, P., Erdem, N., Serengil, Y., & Randhir, T. O. (2016). Ecohydrologic modelling of water resources and land use for watershed conservation. *Ecological Informatics*, 36, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.09.005>
- Paneque Salgado, P., & Vargas Molina, J. (2015). Drought, social agents and the construction of discourse in Andalusia. *Environmental Hazards*, 14(3), 224–235. <https://doi.org/10.1080/17477891.2015.1058739>
- Paoletti, V., D'Antonio, M., & Rapolla, A. (2013). The structural setting of the Ischia Island (Phlegrean

- Volcanic District, Southern Italy): Inferences from geophysics and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 155–173. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.10.002>
- Pasculli, A., Longo, R., Sciarra, N., & Di Nucci, C. (2022). Surface Water Flow Balance of a River Basin Using a Shallow Water Approach and GPU Parallel Computing—Pescara River (Italy) as Test Case. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020234>
- Pellicani, R., Parisi, A., Iemmolo, G., & Apollonio, C. (2018). Economic Risk Evaluation in Urban Flooding and Instability-Prone Areas: The Case Study of San Giovanni Rotondo (Southern Italy). *Geosciences*, 8(4), 112. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040112>
- Pierson, F. B., Williams, C. J., Hardegee, S. P., Weltz, M. A., Stone, J. J., & Clark, P. E. (2011). Fire, Plant Invasions, and Erosion Events on Western Rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 64(5), 439–449. <https://doi.org/10.2111/REM-D-09-00147.1>
- Pomatto, E., Devecchi, M., & Larcher, F. (2022). Coevolution between Terraced Landscapes and Rural Communities: An Integrated Approach Using Expert-Based Assessment and Evaluation of Winegrowers' Perceptions (Northwest Piedmont, Italy). *Sustainability (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148624>
- Porfido, S., Alessio, G., Gaudiosi, G., Nappi, R., & Spiga, E. (2016). Multidisciplinary approach for hydrogeologic hazard assessment in the territory of the Campania Region. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 3, 1667–1674. <https://doi.org/10.1201/b21520-207>
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2017). Application of Landsat-8 and ALOS-2 data for structural and landslide hazard mapping in Kelantan, Malaysia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7), 1285–1303. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1285-2017>
- Pratesi, F., Tapete, D., Terenzi, G., Del Ventisette, C., & Moretti, S. (2015). Structural assessment of case study historical and modern buildings in the Florentine area based on a psi-driven seismic and hydrogeological risk analysis. In *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 8: Preservation of Cultural Heritage*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_60)
- Pristeri, G., Peroni, F., Pappalardo, S. E., Codato, D., Castaldo, A. G., Masi, A., & De Marchi, M. (2020). Mapping and assessing soil sealing in Padua municipality through biotope area factor index. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/su12125167>
- Pristeri, Guglielmo, Peroni, F., Pappalardo, S. E., Codato, D., Castaldo, A. G., Masi, A., & De Marchi, M. (2020). Mapping and Assessing Soil Sealing in Padua Municipality through Biotope Area Factor Index. *Sustainability*, 12(12), 5167. <https://doi.org/10.3390/su12125167>
- Saaty, T.L. (2000). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications.
- Saaty, T.L., & Peniwati, K. (2012). *Group Decision Making: Drawing Out and Reconciling Differences*. RWS Publications.
- Saaty, Thomas L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Sánchez-García, E., Abia, I., Domínguez, M., Voces, J., Sánchez, J. C., Navascués, B., Rodríguez-Camino, E., Garrido, M. N., García, M. C., Pastor, F., Barranco, L., & Portal, C. R. D. (2022). Upgrade of a climate service tailored to water reservoirs management. *Climate Services*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100281>
- Sapienza, A., & Falcone, R. (2016). How to manage the information sources' trustworthiness in a scenario of hydrogeological risks. *CEUR Workshop Proceedings*, 1578, 71–82.
- Sciuto, L., Licciardello, F., Barbera, A. C., & Cirelli, G. (2022). A GIS-based multicriteria decision analysis to reduce riparian vegetation hydrogeological risk and to quantify harvested biomass (Giant reed) for energetic retrieval. *Ecological Indicators*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109548>
- Sermet, Y., Demir, I., & Muste, M. (2020). A serious gaming framework for decision support on hydrological hazards. *Science of the Total Environment*, 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138895>
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724–9758. <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- Shelton, R. E., Baeza, A., Janssen, M. A., & Eakin, H. (2018). Managing household socio-hydrological risk in Mexico city: A game to communicate and validate computational modeling with stakeholders.

- Journal of Environmental Management, 227, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.094>
- Skulska, I., Montiel-Molina, C., & Rego, F. C. (2020). The role of forest policy in Mediterranean mountain community lands: A review of the decentralization processes in European countries. *Journal of Rural Studies*, 80, 490–502. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.033>
- Tananaev, N. I., Efremova, V. A., Gavriyeva, T. N., & Parfenova, O. T. (2021). Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: The case of the amga river, central Yakutia, Siberia. *Hydrology Research*, 52(1), 125–141. <https://doi.org/10.2166/NH.2020.124>
- United Nations. (2015a). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations Sustainable knowledge platform. In Sustainable Development Goals. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>
- United Nations. (2015b). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- United Nations. (2012). System of Environmental-Economic Accounting. <https://seea.un.org/>
- van den Brandeler, F., Gupta, J., & Hordijk, M. (2019). Megacities and rivers: Scalar mismatches between urban water management and river basin management. *Journal of Hydrology*, 573, 1067–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.001>
- Xiao, Y., Yi, S., & Tang, Z. (2017). Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Science of the Total Environment*, 599–600, 1034–1046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.218>
- Zhu, L., Gong, H., Chen, Y., Wang, S., Ke, Y., Guo, G., Li, X., Chen, B., Wang, H., & Teatini, P. (2020). Effects of Water Diversion Project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China. *Engineering Geology*, 276, 105763. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105763>

## Appendice

**Tabella A1.** Modelli/metodi utilizzati più frequentemente per la valutazione della pericolosità e del rischio idrologico.

Rischio/Pericolo idrologico		Rischio/Pericolo idrologico	
<b>Adaptive Management</b>	6	Economics	7
<b>Algorithm</b>	8	<b>Ensemble Forecasting</b>	7
Anthropogenic Effect	7	Erosion	6
Article	11	Extreme Event	26
Assessment Method	10	Extreme Precipitation	7
<b>Bayesian Analysis</b>	6	Fires	6
Brazil	14	Flash Flood	11
Canada	10	Flood	44
Catchment	12	Flood Control	33
Catchments	20	Flood Damage	12
China	22	<b>Flood Forecasting</b>	7
Climate Change	66	Flood Frequency	8
Climate Effect	12	<b>Flood Frequency Analysis</b>	7
Climate Modeling	13	Flood Hazard	6
Climate Models	23	Flood Hazards	6
Coastal Zone	7	Flood Risk	7
<b>Conceptual Framework</b>	6	Flood Risks	8
<b>Copula</b>	13	Flooding	39
Dams	15	Floodings	6
Data Set	7	Floods	90
Debris	6	<b>Frequency Analysis</b>	12
<b>Decision Making</b>	18	<b>GIS</b>	11
<b>Decision Support Systems</b>	8	Geo-hydrological Hazard	7
Design Flood	6	<b>Geographic Information Systems</b>	7
Disaster	6	Geomorphology	7
Disaster Management	14	Global Warming	9
Disasters	12	Groundwater	12
Discharge	6	Hazard	6
<b>Downscaling</b>	7	Hazard Assessment	44
Drought	35	Hazard Management	8
Droughts	6	Hazards	55

Segue **Tabella A1**. Modelli/metodi utilizzati più frequentemente per la valutazione della pericolosità e del rischio idrologico.

Rischio/Pericolo idrologico		Rischio/Pericolo idrologico	
Human	6	Precipitation (meteorology)	6
Hydroelectric Power	8	Precipitation Assessment	14
Hydrologic Risk	17	Precipitation Intensity	17
Hydrological Cycle	7	<b>Probability</b>	21
Hydrological Drought	6	<b>Probability Distributions</b>	8
Hydrological Droughts	8	<b>Quantitative Analysis</b>	11
Hydrological Hazard	59	Rain	34
Hydrological Hazards	6	Rain Gages	7
Hydrological Modeling	38	Rainfall	23
Hydrological Response	7	<b>Regression Analysis</b>	8
Hydrological Risk	15	<b>Remote Sensing</b>	15
Hydrological Risks	38	Reservoir	6
Hydrology	17	Reservoirs (water)	17
Hydrometeorology	8	Resource Management	7
Italy	21	Return Period	12
Land Use	8	Return Periods	12
Land Use Change	7	Risk	13
Landforms	6	Risk Analysis	23
Landslide	18	Risk Assessment	158
Landslides	14	Risk Management	17
Liguria	8	Risk Perception	37
Low Flow	6	Risks	10
<b>Maps</b>	6	River	6
<b>Monte Carlo Analysis</b>	6	River Basin	12
<b>Monte Carlo Methods</b>	8	River Discharge	7
<b>Multivariant Analysis</b>	8	Rivers	30
<b>Multivariate Analysis</b>	13	Romania	6
<b>Natural Hazard</b>	7	Runoff	21
<b>Non-stationarities</b>	7	Safety Engineering	9
<b>Numerical Model</b>	10	<b>Sensitivity Analysis</b>	7
Peak Flow	8	<b>Simulation</b>	6
Precipitation	7	Snow	7
Precipitation (climatology)	18	Soil Conservation	7

Segue **Tabella A1**. Modelli/metodi utilizzati più frequentemente per la valutazione della pericolosità e del rischio idrologico.

	Rischio/Pericolo idrologico		Rischio/Pericolo idrologico
Soil Erosion	6	<b>Time Series Analysis</b>	8
Soil Moisture	8	<b>Trend Analysis</b>	8
Soils	7	Uncertainty	8
Spain	8	<b>Uncertainty Analysis</b>	17
<b>Spatial Analysis</b>	9	United States	14
<b>Spatial Distribution</b>	8	Urban Area	7
<b>Spatiotemporal Analysis</b>	11	Urbanization	10
<b>Stakeholder</b>	6	Vulnerability	27
<b>Statistical Analysis</b>	7	Water Levels	14
<b>Stochastic Systems</b>	11	Water Management	21
Storm Surge	7	Water Resource	18
Storms	11	Water Resources	22
<b>Strategic Approach</b>	7	Water Supply	8
Stream Flow	15	Watershed	9
Streamflow	18	Watersheds	22
Sustainable Development	8	Weather Forecasting	11

\* In grassetto sono evidenziate le parole chiave utilizzate per la messa a punto della revisione della letteratura descritta nella Sezione 3.2.

**Tabella A2.** Modelli/metodi utilizzati più frequentemente per la valutazione della pericolosità e del rischio idrogeologico

	Pericolo/Rischio idrogeologico		Pericolo/Rischio idrogeologico
<b>3-D Numerical Modeling</b>	2	Cultural Heritages	2
<b>3D Modeling</b>	2	Damage Detection	2
<b>ALOS</b>	1	Data Set	2
Abandoned Land	1	Debris Flow	2
Abu Dhabi	1	<b>Decision Making</b>	6
Abu Dhabi Municipality	1	<b>Decision Support</b>	2
Abu Dhabi [United Arab Emirates]	1	<b>Decision Support Systems</b>	3
Acquisition Planning	1	Disaster Management	2
Adaptive Management	1	Disaster Prevention	2
Adaptive Management Policies	1	Disasters	5
Agricultural Heritage Systems	1	Earthquake	2
Agroforestry	1	Earthquakes	2
Agroforestry Systems	1	<b>Electrical Resistivity Tomography</b>	2
<b>Airborne Data Collection</b>	1	Embankments	3
Alternative Routes	1	Emergency Management	3
Amalfi Coast	1	Environmental Effect	2
Anaerobic Digestion	1	Environmental Monitoring	2
<b>Analytic Equations</b>	1	Extreme Event	2
<b>Analytical Formulas</b>	1	Extreme Precipitation	2
<b>Analytical Hierarchy Process</b>	1	Flood	2
Aquifer	3	Floods	6
Aquifers	5	Flow Of Water	3
Assessment Method	2	<b>Forecasting</b>	2
Calibration	2	<b>GIS</b>	5
China	2	<b>Geographic Information Systems</b>	3
Climate Change	6	<b>Geological Surveys</b>	3
<b>Complex Information</b>	2	Geology	2
<b>Complex Networks</b>	2	<b>Ground Penetrating Radar</b>	2
<b>Consequence Analyses</b>	2	<b>Ground Penetrating Radar Systems</b>	3
<b>Consequence Analysis</b>	2	Groundwater	8
<b>Cost-benefit Analysis</b>	2	Groundwater Abstraction	2
<b>Cost Effectiveness</b>	1	Groundwater Flow	3
Cultural Heritage	3	Groundwater Resources	5

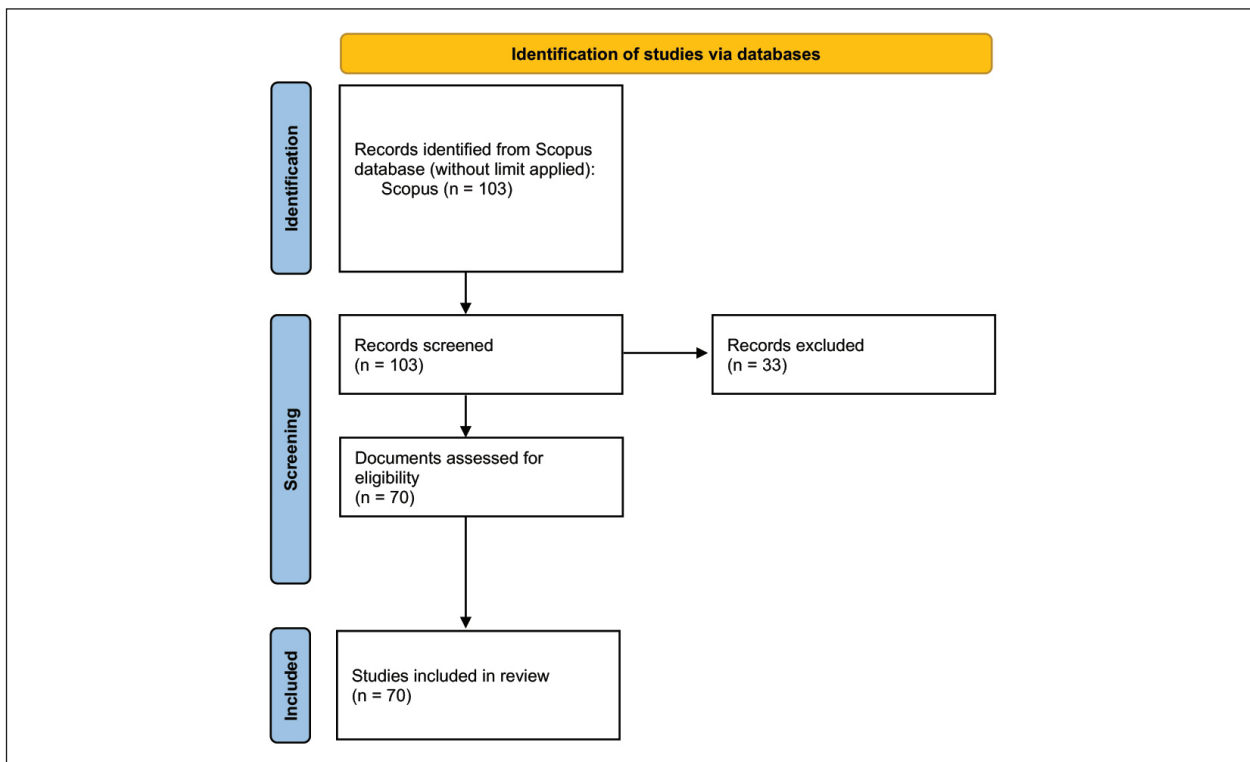
**Tabella A2.** Modelli/metodi utilizzati più frequentemente per la valutazione della pericolosità e del rischio idrogeologico

	Pericolo/Rischio idrogeologico		Pericolo/Rischio idrogeologico
Groundwater Resources	5	Natural Disasters	2
Hazard Assessment	9	<b>Numerical Model</b>	4
Hazards	8	<b>Numerical Modelling</b>	3
Highway Administration	2	<b>Numerical Models</b>	4
Housing	2	<b>Performance Assessment</b>	3
Hydraulic Models	2	<b>Persistent Scatterer Interferometry</b>	3
Hydraulics	2	<b>Persistent Scatterer Interferometry (PSI)</b>	4
Hydro-geological Risk	25	Piedmont [Italy]	2
Hydrogeological	6	<b>Prediction</b>	2
Hydrogeological Hazard	5	<b>Quantitative Analysis</b>	3
Hydrogeological Risk	8	Radar	2
Hydrogeology	13	Rain	2
Hydrological Models	2	Rain Gages	2
Hydrology	2	<b>Remote Sensing</b>	6
Information Sources	2	<b>Remote-sensing</b>	2
<b>Interferometry</b>	4	Risk Analysis	3
Italy	15	Risk Assessment	38
Land Use Change	2	Risk Management	11
Landforms	5	Risk Mitigation	2
Landslide	10	Risk Perception	2
Landslide Risk	3	River Basins	2
Landslides	10	Rivers	4
Large Dataset	2	Roads And Streets	4
Levees	2	Satellite Data	2
Linear Infrastructure	2	Scientific Community	2
Lithology	3	Sicily	4
Lombardy	2	Slope Stability	2
<b>Mapping</b>	2	Soil Erosion	2
<b>Maps</b>	2	Soils	2
Milano [Lombardy]	2	<b>Spatial Variation</b>	2
Monitoring	2	<b>Stochastic Systems</b>	3
<b>Multi Agent Systems</b>	2	<b>Stochasticity</b>	2
<b>Multi-disciplinary Approach</b>	2	<b>Structural Assessments</b>	2

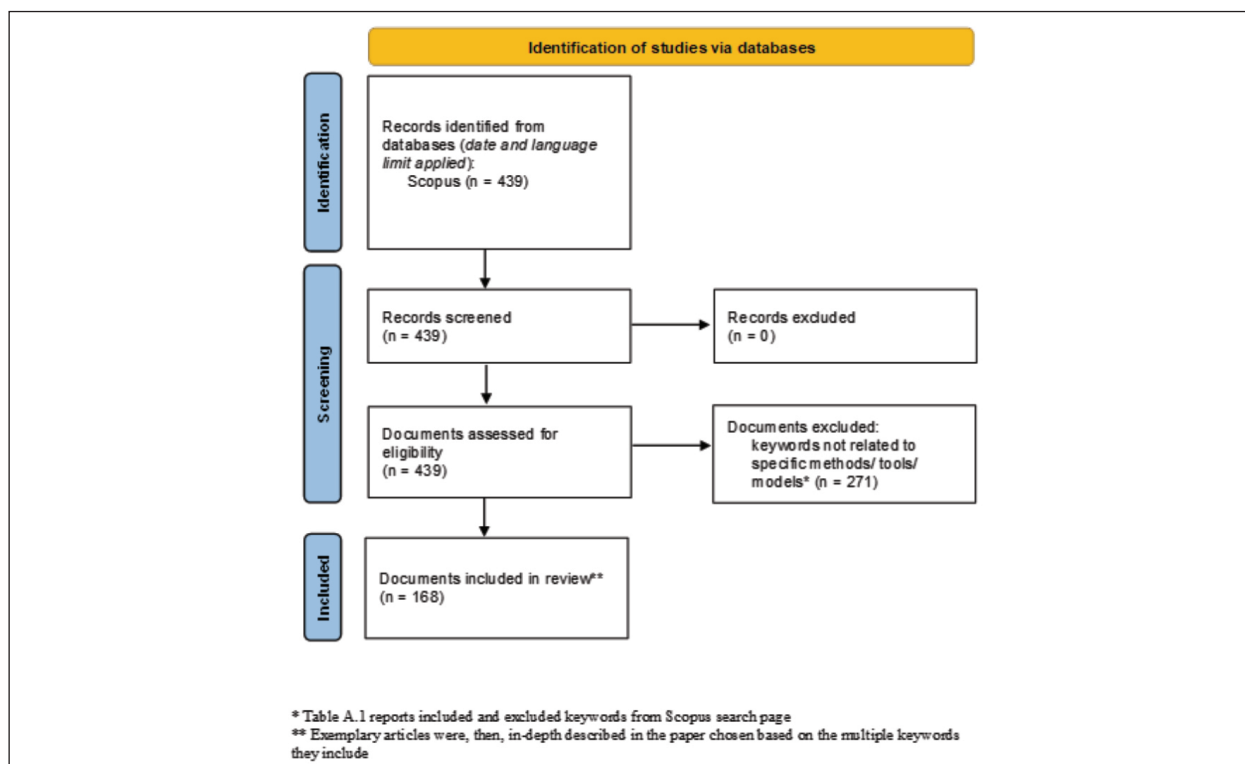
**Tabella A2.** Modelli/metodi utilizzati più frequentemente per la valutazione della pericolosità e del rischio idrogeologico

Pericolo/Rischio idrogeologico		Pericolo/Rischio idrogeologico	
Subsidence	3	Underground Structures	2
Subways	2	Urban Area	2
<b>Surveying</b>	2	Urban Growth	3
<b>Surveys</b>	2	Urban Planning	6
<b>Synthetic Aperture Radar</b>	6	Urbanization	2
<b>Three Dimensional Computer Graphics</b>	2	Vulnerability	2
Transport Infrastructure	2	Water Flow	2
Tunneling (excavation)	2	Water Levels	3
Tunnels	2	Water Management	2
Tuscany	2	Water Resource	2
<b>Uncertainty Analysis</b>	2	Water Supply	2
Underground Construction	3	Watersheds	2
Underground Infrastructure	2	<b>Weather Forecasting</b>	4
Underground Infrastructures	2		

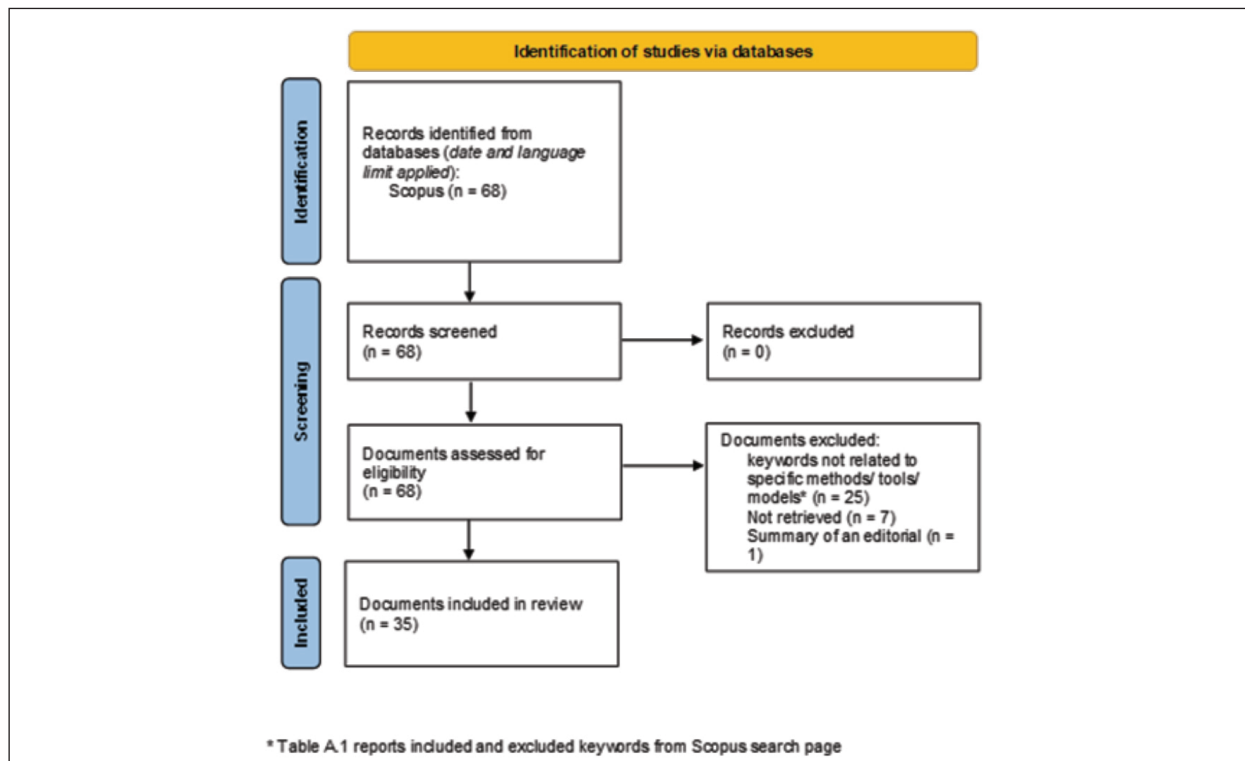
\* In grassetto sono evidenziate le parole chiave utilizzate per la messa a punto della revisione della letteratura descritta nella Sezione 3.3.



**Figura A1.** Schema PRISMA delle pubblicazioni individuate e analizzate utilizzando la seguente stringa: TITLE-ABS-KEY( ( «hydrolog\* risk» OR «hydrolog\* hazard» OR «hydro-hazard» OR «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» OR «water-related risk» OR «water-related hazard» ) AND ( «literature review» OR «review» ) ).



**Figura A2.** Schema PRISMA delle pubblicazioni individuate e analizzate utilizzando la seguente stringa: TITLE-ABS-KEY ( ( «hydrolog\* risk» OR «hydrolog\* hazard» OR «hydro-harazard» OR «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» OR «water-related risk» OR «water-related hazard» ) AND ( «assessment» OR «evaluation» OR «valuation» ) ).



**Figura A3.** Schema PRISMA delle pubblicazioni individuate e analizzate utilizzando la seguente stringa: TITLE-ABS-KEY ( ( ( «hydrogeolog\* risk» OR «hydrogeolog\* hazard» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* risk» OR «geo-hydrogeolog\* hazard» ) AND ( «assessment» OR «evaluation» OR «valuation» ) ) ).