ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

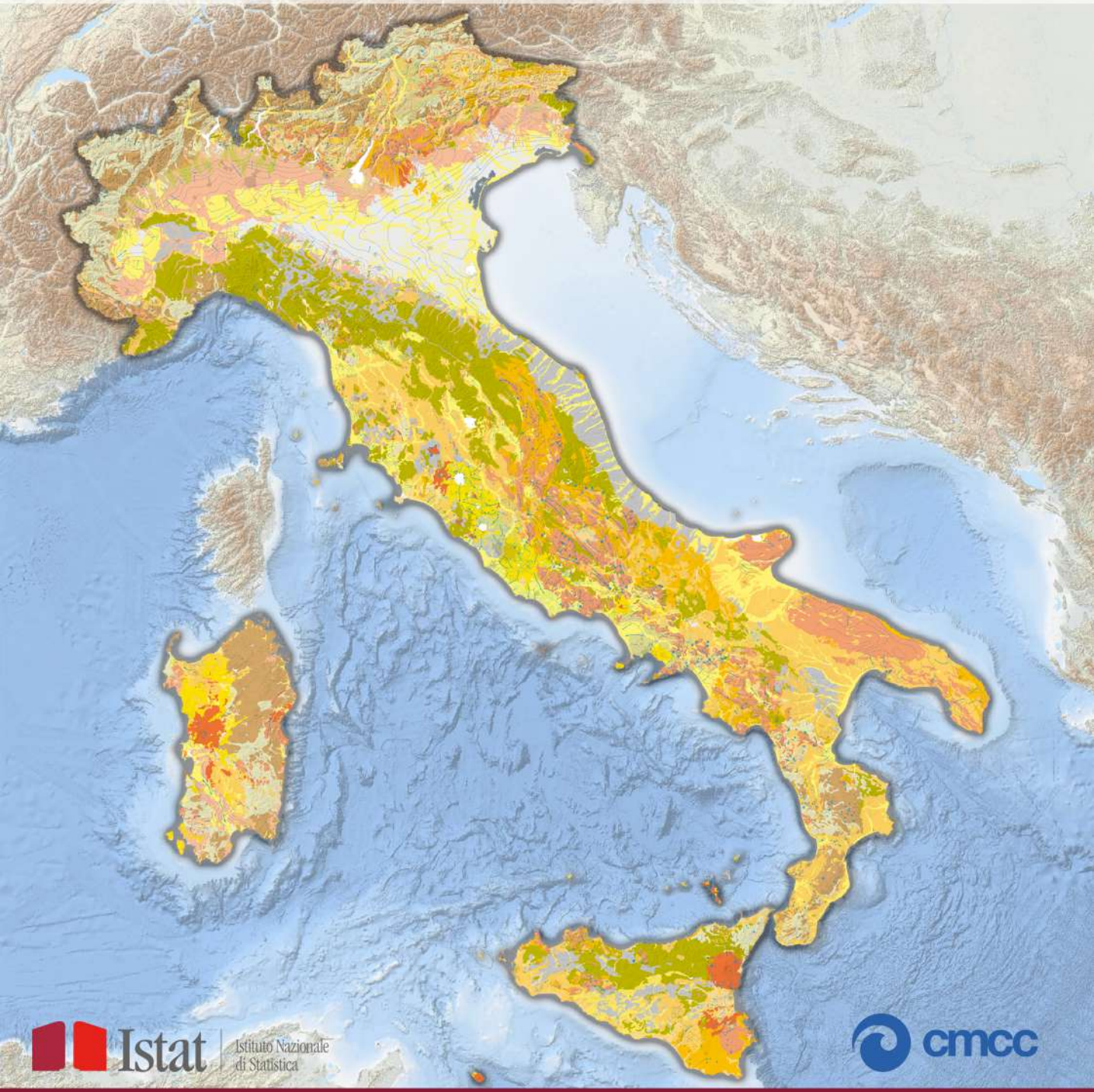
Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

CARTA IDROGEOLOGICA D'ITALIA

HYDROGEOLOGICAL MAP OF ITALY

Scala - *Scale* 1:500.000



Istat Istituto Nazionale di Statistica

cmcc

CARTA IDROGEOLOGICA D'ITALIA

HYDROGEOLOGICAL MAP OF ITALY

Scala - *Scale* 1:500.000

Responsabili Scientifici - *Scientific coordinators:*
Beretta G.P.[1], La Vigna F.[2], Camera C.A.S.[1], Gafà R.M.[2]

Autori - *Authors:*
Elaborazione contenuti - *Content and data processing:* Beretta G.P.[1], La Vigna F.[2], Camera C.A.S.[1], Gafà R.M.[2], Citrini A.[1], Martarelli L.[2], Monti G.M.[2], Roma M.[2], Silvi A.[2], Vitale V.[2], Fiori C.[2], Masetti M.[1], F. Pascarella[2], Proietti R.[2]
Allestimento cartografico - *Cartographic layout:* Lo Faro S.[2], Roma M.[2]
Impaginazione e copertina - *Layout and cover:* Schvarcz T.[2], Lo Faro S.[2]
Gestione banca dati e livelli informativi web - *Database and information layer management:* Roma M.[2], Congi M.P.[2], Gerardi M.[2]
Elaborazione dati sorgenti captate - *Captured springs data processing:* Tersigni S.[3], Baldoni T.[4], Ramberti S.[4]
Elaborazione dati meteo-climatici - *Meteorological and climate data processing:* Barbato G.[5], Mercogliano P.[5], Giugliano G.[5]

1 - Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Scienze della Terra «Ardito Desio»;
2 - ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia;
3 - Istat - Dipartimento per le statistiche sociali e demografiche;
4 - Istat - Dipartimento per le statistiche economiche, ambientali e conti nazionali;
5 - CMCC - Istituto ICR, Divisione Modelli Regionalie Impatti Geo-Idrologici (REMHI).

In collaborazione con - *In collaboration with:*

Con la partecipazione di - *With the involvement of:*

Modalità di citazione: - *Quote as*:
Beretta G.P., La Vigna F.,Camera C.A.S., Gafà R.M., Citrini A., Martarelli L., Monti G.M., Roma M., Silvi A., Vitale V., Fiori C., Masetti M., F. Pascarella, Proietti R., Lo Faro S., Congi M.P., Gerardi M., Tersigni S., Baldoni T., Ramberti S., Barbato G., Mercogliano P., Giugliano G. (2025) - *Carta Idrogeologica d'Italia alla scala 1:500.000 - 4 Fogli, Note integrative e tabelle online - Hydrogeological Map of Italy 1:500.000 scale. 4 Sheets, Supplementary Notes and online tables.* ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia - Geological Survey of Italy. Roma

INDICE / *INDEX*

1. INTRODUZIONE 5
1. INTRODUCTION 5

2. LA CARTOGRAFIA IDROGEOLOGICA IN ITALIA 6
2. HYDROGEOLOGICAL MAPPING IN ITALY 6

3. OMOGENEIZZAZIONE DEL CONTESTO IDROGEOLOGICO NAZIONALE 8
3. STANDARDIZATION OF THE NATIONAL HYDROGEOLOGICAL FRAMEWORK 8
3.1 Basi geologiche e topografiche 8
3.1 Geological and Topographic Bases 8
3.2 Raccolta, gestione ed omogeneizzazione dei dati 8
3.2 Collection, Management, and Standardization of Data 8
3.3 Principali studi e progetti di cartografia idrogeologica regionale in Italia utilizzati per questa sintesi nazionale 11
3.3 Main Regional Hydrogeological Mapping Studies and Projects in Italy used for this National Synthesis 10
3.4 Definizione e descrizione dei Complessi Idrogeologici 12
3.4 Definition and Description of Hydrogeological Complexes 11
3.5 Definizione ed attribuzione della produttività 12
3.5 Definition and Attribution of Productivity 12

4. SITUAZIONE CLIMATICA IN ITALIA IN RELAZIONE AGLI APPORTI UTILI ALLA RICARICA DEGLI ACQUIFERI 14
4. CLIMATIC CONDITIONS IN ITALY IN RELATION TO EFFECTIVE RECHARGE CONTRIBUTIONS TO AQUIFERS 14
4.1 Caratteristiche climatiche generali del Paese 14
4.1 General climatic characteristics of the Country 14
4.2 Distribuzione degli apporti nei distretti idrografici 15
4.2 Distribution of effective contributions across river basins districts 15
4.3 Scenari futuri e ipotesi di variazioni degli apporti rispetto ai modelli presi come riferimento 17
4.3 Climate change projections and impacts on recharge 17

5. LE SORGENTI IN ITALIA E L'UTILIZZO DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE 19
5. SPRINGS IN ITALY AND THE USE OF GROUNDWATER RESOURCES 19
5.1 Definizioni 19
5.1 Definitions 19
5.2 La fonte dei dati 20
5.2 Data Source 20
5.3 Analisi statistiche 21
5.3 Statistical analyses 21

6. IDROGEOLOGIA DEI DISTRETTI IDROGRAFICI ITALIANI 25
6. HYDROGEOLOGY OF THE ITALIAN RIVER BASIN DISTRICTS 25
6.1 Distretto Idrografico del Fiume Po 25
6.1 Po River Basin District 25
6.1.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche 25
6.1.1 Geological and Hydrogeological Features 25
6.1.2 Principali acquiferi del territorio del distretto 26
6.1.2 Main Aquifers of the District Area 26
6.1.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto 27
6.1.3 Notes on the District Water Balance 27
6.2 Distretto Idrografico delle Alpi Orientali 28
6.2 Eastern Alps River Basin District 28
6.2.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche e principali acquiferi del territorio del distretto 28
6.2.1 Geological and Hydrogeological Features and Main Aquifers of the District Area 28
6.2.2 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto 31

6.2.2 Notes on the District Water Balance ... 31
6.3 Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale ... 32
6.3 Northern Apennines River Basin District ... 31
6.3.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche ... 32
6.3.1 Geological and Hydrogeological Features ... 31
6.3.2 Principali acquiferi del territorio del distretto ... 33
6.3.2 Main Aquifers in the District Area ... 33
6.3.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto ... 34
6.3.3 Notes on the District Water Balance ... 34
6.4 Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale ... 35
6.4 Central Apennines River Basin District ... 35
6.4.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche ... 35
6.4.1 Geological and Hydrogeological Features ... 35
6.4.2 Principali acquiferi del territorio del distretto ... 36
6.4.2 Main Aquifers in the District Area ... 36
6.4.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto ... 38
6.4.3 Notes on the District Water Balance ... 37
6.5 Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale ... 38
6.5 Southern Apennines River Basin District ... 38
6.5.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche ... 38
6.5.1 Geological and Hydrogeological Features ... 38
6.5.2 Principali acquiferi del territorio del distretto ... 39
6.5.2 Main Aquifers in the District Area ... 39
6.5.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto ... 41
6.5.3 Notes on the District Water Balance ... 41
6.6 Distretto Idrografico della Sardegna ... 41
6.6 Sardinia River Basin District ... 41
6.6.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche ... 41
6.6.1 Geological and Hydrogeological Features ... 41
6.6.2 Principali acquiferi del territorio del distretto ... 42
6.6.2 Main Aquifers in the District Area ... 42
6.6.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto ... 44
6.6.3 Notes on the District Water Balance ... 43
6.7 Distretto Idrografico della Sicilia ... 45
6.7 Sicily River Basin District ... 44
6.7.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche ... 45
6.7.1 Geological and Hydrogeological Features ... 44
6.7.2 Principali acquiferi del territorio del distretto ... 46
6.7.2 Main Aquifers of the District Area ... 46
6.7.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto ... 48
6.7.3 Notes on the District Water Balance. ... 47

7. QUADRO DI SINTESI ... 49
7. SUMMARY FRAMEWORK ... 49
7.1 Cenni sulla stima delle risorse idriche sotterranee nazionali ... 49
7.1 Overview of the Estimation of National Groundwater Resources ... 49
7.2 Considerazioni su gestione e sostenibilità ... 51
7.2 Reflections on Water Management and Sustainability ... 51

8. CONSULTAZIONE PUBBLICA ... 53
8. PUBLIC CONSULTATION ... 53

9.FUTURI SVILUPPI DELLA CONOSCENZA DELLE ACQUE SOTTERRANEE IN ITALIA ... 54
9.FUTURE DEVELOPMENTS IN GROUNDWATER KNOWLEDGE IN ITALY ... 54

Bibliografia/*References* ... 57

1. INTRODUZIONE

Le acque sotterranee a livello globale sono la più grande riserva di acqua dolce, non ghiacciata; per questo motivo rivestono un'importanza critica per la vita sulla Terra (Benz et al., 2024). In Italia, nel 2022, l'84,7% del prelievo di acque a uso potabile è derivato da acque sotterranee (48,5% da pozzo e 36,2% da sorgente), il 15,2% da acque superficiali e a integrazione delle fonti di acqua dolce, per sopperire alle carenze idriche, lo 0,1% del prelievo è derivato da acque marine o salmastre dopo trattamento di desalinizzazione (Istat, 2024). In un contesto di cambiamento climatico, l'importanza delle acque sotterranee per garantire la sicurezza idrica e alimentare è destinata a crescere ulteriormente, considerato che eventi estremi più frequenti e intensi (siccità e alluvioni) aumentano la variabilità nello spazio e nel tempo della disponibilità delle acque superficiali (Taylor et al., 2013). Una conoscenza approfondita, omogenea e aggiornata della distribuzione e della disponibilità delle risorse idriche sotterranee a livello nazionale diventa quindi strategica per la pianificazione e la gestione sostenibile delle acque. Le cartografie idrogeologiche e la stima aggiornata del bilancio idrico sono gli strumenti di base più adatti alla sintesi di queste conoscenze. Limitandosi al contesto europeo, un rinnovato interesse per l'aggiornamento di tale tipo di cartografia è emerso con la pubblicazione della International Hydrogeological Map of Europe 1:1.500.000 (IHME1500) (Duscher et al., 2015), che cartografa i sistemi acquiferi in termini di flusso, produttività e litologia, enfatizzando il loro potenziale sfruttamento. Seguendo questo approccio, il British Geological Survey nel 2020 ha pubblicato una carta digitale alla scala 1:625.000 (BGS, 2020), focalizzandosi sulla disponibilità e accessibilità delle risorse idriche sotterranee. Anche il BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) ha aggiornato la carta idrogeologica di Francia nel 2015 (BRGM, 2015), con informazioni su permeabilità, porosità e potenzialità di ricarica degli acquiferi, fornendo quindi indicazioni per uno sfruttamento sostenibile della risorsa. Il principale obiettivo della nuova Carta Idrogeologica d'Italia alla scala 1:500.000 è fornire uno strumento di sintesi che offra uno stato dell'arte omogeneo a livello nazionale riguardo la gestione delle risorse idriche, in un contesto di cambiamenti climatici globali e crescente attenzione verso la disponibilità di acqua. Obiettivi specifici sono:

1. Aggiornare la cartografia idrogeologica nazionale precedente (Fried et al., 1982), con un focus particolare sulla roccia serbatoio e la sua interpretazione in complessi idrogeologici.
2. Consolidare le conoscenze acquisite a livello regionale negli ultimi 40 anni, promuovendo un approccio partecipativo per raccogliere e integrare informazioni a livello locale.
3. Valutare la disponibilità di risorse idriche, prendendo in considerazione anche la produttività, l'andamento piezometrico e le portate delle principali sorgenti, contribuendo a migliorare la

1. INTRODUCTION

Globally, groundwater represents the largest reservoir of unfrozen freshwater and is therefore critically important for life on Earth (Benz et al., 2024). In Italy, in 2022, 84,7% of potable water withdrawals originated from groundwater sources (48,5% from wells and 36,2% from springs), 15,2% from surface waters, and 0,1% from treated marine or brackish water used to supplement freshwater supplies during shortages (Istat, 2024). In the context of climate change, the strategic role of groundwater in ensuring water and food security is expected to increase, as more frequent and intense extreme events (droughts and floods) heighten the spatial and temporal variability of surface water availability (Taylor et al., 2013). A comprehensive, consistent, and up-to-date understanding of the distribution and availability of groundwater resources at the national level is therefore essential for effective planning and sustainable water management. Hydrogeological mapping is the most suitable fundamental tool for synthesizing such knowledge and for estimating the water balance.

In the European context, renewed interest in updating hydrogeological cartography has emerged with the publication of the International Hydrogeological Map of Europe at 1:1.500.000 scale (IHME1500) (Duscher et al., 2015), which maps aquifer systems in terms of flow, productivity, and lithology, with an emphasis on their exploitation potential. Following a similar approach, the British Geological Survey published a digital map at 1:625.000 scale in 2020 (BGS, 2020), focusing on the availability and accessibility of groundwater resources. Similarly, in 2015 the Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) updated the hydrogeological map of France (BRGM, 2015), providing information on permeability, porosity, and aquifer recharge potential, offering a basis for sustainable resource exploitation.

The primary objective of the new Hydrogeological Map of Italy at 1:500.000 scale is to provide a comprehensive and nationally consistent tool for summarizing the current state of groundwater resources management, within the context of global climate change and increasing concern for water availability. The specific aims are:

1. *Updating the previous national hydrogeological map (Fried et al., 1982), with a particular focus on reservoir rocks and their interpretation as hydrogeological complexes.*
2. *Consolidating regional-scale knowledge acquired over the past 40 years, promoting a participatory approach to collect and integrate locally sourced information.*
3. *Assessing water resource availability, considering aquifer productivity, piezometric trends, and spring discharge rates, thus improving the understanding of the national water balance.*
4. *Building a bridge between traditional*

conoscenza del bilancio idrico.

4. Costruire un ponte tra la cartografia idrogeologica tradizionale e una nuova cartografia sperimentale, dinamica e interattiva, utilizzando tecniche di WebGIS, per offrirne una versione digitale che consenta aggiornamenti continui, migliorandone la precisione e l'utilità per gli utenti.

hydrogeological mapping and a new experimental, dynamic, and interactive cartography using WebGIS technologies, enabling continuous updates and improving accuracy and usability for end users.

2. LA CARTOGRAFIA IDROGEOLOGICA IN ITALIA

La necessità di mettere in rapporto le acque con il contesto geologico era stata intuita nei secoli scorsi e, come già sostenuto da Marco Vitruvio Pollione nel *De Architectura* (80-15 a.C. circa), "*dovremmo anche considerare la natura del luogo quando cerchiamo l'acqua*". Proprio da questo presupposto sono nate le carte idrogeologiche. Secondo l'originale definizione storica, le carte idrogeologiche sono mappe su cui sono raffigurate l'estensione degli acquiferi (naturali serbatoi sotterranei costituiti da rocce permeabili), unitamente alle caratteristiche geologiche, idrogeologiche e climatologiche del territorio preso in esame. Queste carte possono includere anche informazioni sulle caratteristiche delle acque superficiali, poiché possono essere necessarie per comprendere il regime delle acque sotterranee, ma anche perché la connotazione di "acque sotterranee" o "acque superficiali" è una "convenzione" che riguarda comunque la medesima risorsa, la quale si muove secondo leggi e dinamiche differenti a seconda del mezzo attraverso cui scorre; l'aria e il fondo degli alvei quando si trova in superficie, i granuli e/o le fratture e le cavità carsiche delle rocce quando si infiltra nel sottosuolo. Le prime carte idrogeologiche sono state prodotte in diversi Paesi nei due decenni successivi al 1940 (UNESCO, 1970, 1983). In Italia, la prima carta nazionale è stata pubblicata a seguito dello studio della Commissione della Comunità Europea (Fried et al., 1982) che ha portato alla suddivisione del territorio nazionale in sette complessi idrogeologici (Tabella 1). I contenuti di tale studio sono stati ripresi anche all'interno della normativa nazionale sulle acque sotterranee del D.Lgs. 30/2009. A scala nazionale, una profonda revisione degli studi disponibili è stata poi effettuata realizzando la Carta dei principali complessi idrogeologici d'Italia e punti della rete di monitoraggio alla scala 1:500.000 (Ministero dell'Ambiente, 1997).

2. HYDROGEOLOGICAL MAPPING IN ITALY

The need to relate water to its geological context had already been understood in past centuries, as noted by Marcus Vitruvius Pollio in De Architectura *(ca. 80-15 BCE), who stated that "we should also consider the nature of the location when searching for water." It is precisely from this premise that hydrogeological maps originated. According to the original historical definition, hydrogeological maps depict the extent of aquifers (natural underground reservoirs made of permable rocks) along with the geological, hydrogeological, and climatological characteristics of the area under consideration. These maps may also include information on surface water features, as such data are often essential for understanding the groundwater regime. Moreover, the distinction between "groundwater" and "surface water" is a conventional one, since both refer to the same resource, which behaves differently depending on the medium it flows; through-air and streambeds at the surface, or grains, fractures, and karst cavities when it infiltrates underground.*

The first hydrogeological maps were produced in various countries during the two decades following the 1940s (UNESCO, 1970,1983). In Italy, the first national-scale hydrogeological map was published following a study conducted by the European Community Commission (Fried et al., 1982), which led to the subdivision of the national territory into seven hydrogeological complexes (Table 1). The contents of this study were later incorporated into national groundwater legislation (Legislative Decree No. 30/2009). At the national level, a comprehensive revision of the available data was carried out through the development of the Map of the Main Hydrogeological Complexes of Italy and Monitoring Network Points at 1:500.000 scale (Italian Ministry of the Environment, 1997).

Tabella 1 - Complessi idrogeologici secondo Fried et al. (1982)
Table 1 - Hydrogeological Complexes according to Fried et al. (1982)

Tipologia di complessi/*Type of Complex*	**Sigla/*Code***
Depositi alluvionali quaternari/ *Quaternary alluvial deposits*	DQ
Alluvioni vallive/*Alluvial valley*	AV
Formazioni detritiche/*Detrital formations*	DET
Complessi carbonatici/*Carbonate complexes*	CA
Vulcaniti permeabili/*Permeable volcanic rocks*	VU
Acquiferi locali/*Local aquifers*	LOC
Formazioni sterili/*Impermeable formations*	STE

A scala regionale e sovraregionale sono invece molteplici gli studi che hanno seguito la carta di Fried et al. (1982). Per citarne alcuni, i primi prodotti hanno riguardato l'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio, Abruzzo, Molise e Campania) con la redazione di una carta idrogeologica in scala 1:400.000 (Celico, 1983) e uno studio di pochi anni successivo che ha affiancato ad una carta idrogeologica in scala 1:500.000 una carta dei bilanci idrogeologici e delle risorse idriche sotterranee in scala 1:1.000.000 (Boni et al., 1986). Nello stesso anno, sono stati pubblicati alcuni contenuti per la realizzazione di una carta idrogeologica in Regione Lombardia (Beretta, 1986). Sempre in Italia meridionale, a metà anni '90 è stata pubblicata una carta idrogeologica di maggior dettaglio (1:200.000) per la Regione Campania (Budetta et al., 1994). La carta idrogeologica di tutto il meridione è stata poi aggiornata con un prodotto in scala 1:250.000 con i lavori di Celico et al. (2005) e De Vita et al. (2018), anche grazie ad azioni coordinate attraverso progetti volti a contrastare la siccità. Negli ultimi vent'anni sono state presentate anche una carta idrogeologica 1:250.000 per Regione Piemonte (Civita et al., 2005), uno Schema Idrogeologico dell'Italia Centro Adriatica (Desiderio et al., 2011) e una carta idrogeologica per la Regione Lazio (Capelli et al., 2012) in scala 1:100.000. In termini di cartografia idrogeologica regionale, i lavori più recenti sono quelli sviluppati per la parte collinare e montana della Regione Lombardia (Masetti et al., 2021; Stevenazzi et al., 2023), in cui è stato presentato un approccio cartografico 3D che ha portato al riconoscimento dei corpi idrici sotterranei caratterizzanti la Regione, con la definizione dei bilanci idrici di ciascuno di essi. Una revisione più completa della cartografia idrogeologica regionale disponibile in Italia è disponibile in Capelli & Mazza (2009) e Mari et al. (2007). Alla scala 1:50.000 sono state compilate la carta idrogeologica della Città di Roma (La Vigna & Mazza, 2015) e, nell'ambito del progetto CARG, ancora un numero ristretto di fogli tematici idrogeologici. È evidente come storicamente la cartografia idrogeologica in Italia si sia focalizzata sulle regioni meridionali, che già in passato, per caratteristiche climatiche, hanno dovuto fronteggiare periodi di scarsità idrica. Gli studi che si sono iniziati a sviluppare in Regioni settentrionali, con focus sulle aree montane che sono universalmente considerate le *water tower* del mondo (Viviroli et al., 2007), sono indice di quanto la conoscenza sulla disponibilità di risorsa, soprattutto in aree chiave e vulnerabili, sia cruciale per uno sviluppo sostenibile (Immerzeel et al., 2020).

At the regional and supra-regional scales, numerous studies have followed the publication of the Fried et al. (1982) map. Notably, early products focused on central-southern Italy (southern Marche and Lazio, Abruzzo, Molise, and Campania), including the 1:400.000 scale hydrogeological map by Celico (1983), and a subsequent study that produced both a 1:500.000 hydrogeological map and a 1:1.000.000 map of hydrogeological balances and groundwater resources (Boni et al., 1986). In the same year, contributions toward the development of a hydrogeological map for the Lombardy Region were published (Beretta, 1986). In southern Italy, a more detailed map (1:200.000 scale) was published for the Campania Region in the mid-1990s (Budetta et al., 1994). The hydrogeological map of the entire south was later updated through a 1:250.000 scale product by Celico et al. (2005) and De Vita et al. (2018), supported by coordinated efforts aimed at combating drought.

In the past two decades, a 1:250.000 scale hydrogeological map of the Piedmont Region was developed (Civita et al., 2005), along with a Hydrogeological Framework of Central Adriatic Italy (Desiderio et al., 2011), and a 1:100.000 hydrogeological map of the Lazio Region (Capelli et al., 2012). Among the most recent regional hydrogeological cartographic efforts are those focused on the hilly and mountainous areas of the Lombardy Region (Masetti et al., 2021; Stevenazzi et al., 2023), which introduced a 3D cartographic approach and led to the identification of groundwater bodies that characterize the region, along with water balance estimates for each. A more comprehensive review of available regional hydrogeological maps in Italy can be found in Capelli & Mazza (2009) and Mari et al. (2007). At the 1:50.000 scale, a hydrogeological map of the City of Rome has been compiled (La Vigna & Mazza, 2015), and within the framework of the CARG project, a limited number of hydrogeological thematic map sheets have also been produced.

It is evident that hydrogeological mapping in Italy has historically focused on southern regions, which, due to their climatic characteristics, have long faced periods of water scarcity. The emergence of studies in northern regions, particularly in mountainous areas universally regarded as the world's "water towers" (Viviroli et al., 2007), highlights the critical importance of understanding water resource availability, especially in key and vulnerable areas, for sustainable development (Immerzeel et al., 2020).

3. OMOGENEIZZAZIONE DEL CONTESTO IDROGEOLOGICO NAZIONALE

3.1 Basi geologiche e topografiche

Una delle maggiori sfide affrontate per la realizzazione di questo prodotto cartografico è quanto fatto per omogeneizzare le informazioni spaziali, in relazione sia alla disponibilità dei dati geologici ed idrogeologici sia alla scelta delle opportune basi cartografiche. Come è noto ad oggi, in Italia, la cartografia geologica alla scala di dettaglio (ISPRA Portale del SGI, 2025), non è ancora stata completata e la cartografia geologica alla scala 1:100.000, sebbene completa, è piuttosto datata e, essendo stata realizzata nell'arco di diversi decenni, spesso presenta disomogeneità e differenze interpretative tra fogli limitrofi. Per le finalità di questo lavoro di insieme e per meglio rappresentare l'assetto idrogeologico nazionale in modo omogeneo, si è quindi deciso di fare riferimento ad una base informativa geologica alla scala 1:500.000, utilizzata per la realizzazione della carta geologica d'Italia alla scala 1:1.000.000 (Compagnoni et al., 2011). Questa base geologica è stata scelta in quanto risulta essere il miglior prodotto omogeneo attualmente disponibile, dato che integra alcuni aggiornamenti apportati rispetto a prodotti precedenti. Nonostante ciò, nell'area della pianura padano-veneta, rappresentata in questa base da una sola unità geologica e, quindi, da un solo grande poligono indifferenziato, si è deciso di incrementare il dettaglio per differenziare i corpi alluvionali. Per operare questo approfondimento, si è scelto di utilizzare un prodotto cartografico alla scala 1:500.000, la carta METIQ della geologia del Quaternario (Chiocci et al., 2023), oltre che alcuni approfondimenti per dei dettagli al bordo della piana (Cremaschi 1978,1979, 1984, Giuliano et al., 1998, Montrasio et al. 1990, Petrucci et al., 1970).La base topografica scelta è derivata dalla elaborazione dei dati del portale EuroGlobalMap (www.mapsforeurope.org/datasets/euro-global-map), mentre per la toponomastica si è fatto riferimento alla Carta Digitale 1:1.000.000 dell'Istituto Geografico Militare (Carta Topografica d'Italia 1:1.000.000 - IGM 2008). Per visualizzare l'andamento del rilievo è stato utilizzato il modello digitale EuroDEM (www.mapsforeurope.org/datasets/euro-dem).

3.2 Raccolta, gestione ed omogeneizzazione dei dati

Per arrivare ad omogeneizzare l'informazione idrogeologica nazionale si è proceduto per le seguenti differenti fasi:

1. *Raccolta delle cartografie idrogeologiche o geologiche digitali esistenti su base regionale (a scala 1:250.000).* Queste sono state raccolte presso gli enti regionali che le hanno realizzate. Laddove non disponibili si sono prese in esame le cartografie geologiche (cfr. par. 3.3).
2. *Unione delle informazioni delle singole cartografie in un'unica legenda di complessi idrogeologici e nella permeabilità relativa.* Le cartografie

3. STANDARDIZATION OF THE NATIONAL HYDROGEOLOGICAL FRAMEWORK

3.1 Geological and Topographic Bases

*One of the major efforts involved in producing this cartographic product was the standardization of spatial information, both in terms of the availability of geological and hydrogeological data and the selection of appropriate cartographic bases. As is well known, to date, detailed-scale geological mapping in Italy (ISPRA SGI Portal, 2025) has not yet been completed. Although 1:100.000-scale geological mapping is available nationwide, it is quite dated and, having been produced over several decades, often presents inconsistencies and interpretative differences between adjacent map sheets. For the purposes of this national overview and to more effectively represent the hydrogeological framework in a consistent manner, a 1:500.000-scale geological base was selected. This base had previously been used for the compilation of the 1:1.000.000 Geological Map of Italy (Compagnoni et al., 2011). This geological base was chosen as the best currently available harmonized product, incorporating several updates made to earlier maps. However, in the Po-Venetian Plain-represented in this base by a single undifferentiated geological unit, and therefore by a single large polygon-further detail was added to distinguish the alluvial bodies. To this end, the 1:500.000-scale Quaternary Geology Map METIQ (Chiocci et al., 2023) was used, along with more detailed studies at the margins of the plain (Cremaschi, 1978, 1979, 1984; Giuliano et al., 1998; Montrasio et al., 1990; Petrucci et al., 1970). The topographic base was derived from the EuroGlobalMap portal (*www.mapsforeurope.org/datasets/euro-global-map*), while place names were taken from the 1:1.000.000-scale Digital Map of the Istituto Geografico Militare (Carta Topografica d'Italia 1:1.000.000 - IGM 2008). Terrain elevation was visualized using a digital elevation model EuroDEM (www.mapsforeurope.org/datasets/euro-dem).*

3.2 Collection, Management, and Standardization of Data

The process of standardizing national hydrogeological information followed these main steps:

1. Collection of existing regional hydrogeological or geological digital maps (at 1:250,000 scale). *These maps were gathered from the regional authorities that had produced them. Where unavailable, geological maps were used as references (see par.3.3).*
2. Merging map content into a single legend of hydrogeological complexes and relative permeability. *The maps were interpreted through a classification of hydrogeological complexes, to which a relative permeability rating was assigned using six classes (High,*

sono state rilette sulla base di una suddivisione in complessi idrogeologici e gli è stato attribuito un grado di permeabilità relativa su 6 classi (Alta, Medio-Alta, Media, Medio-Bassa, Bassa, Bassissima). Successivamente, per ricondurre la carta alla metodologia riportata nelle linee guida (ISPRA, 2018, Roma & Vitale, 2008) della cartografia idrogeologica nazionale del progetto CARG, le classi di permeabilità relativa sono state ridotte a 4 (Alta - AP, Media - MP, Scarsa - SP, Bassissima - BP).

3. *Trasposizione dell'informazione idrogeologica regionale sulla base geologica in scala 1:500.000.* Una volta assegnate tutte le classi di permeabilità relativa ai complessi idrogeologici presenti sulle basi in scala 1:250.000, queste sono state riportate sulla base geologica in scala 1:500.000. Quanto descritto, ancor prima dell'elaborazione in ambiente GIS, è avvenuto attraverso un articolato lavoro di attribuzione delle litologie della base geologica ai complessi individuati, lavorando sulle tabelle degli attributi degli oltre 12.000 poligoni che compongono la base geologica stessa.
4. *Verifica della esattezza delle attribuzioni.* Successivamente si è proceduto a verificare, attraverso controlli puntuali, che le informazioni attribuite ai singoli poligoni fossero coerenti geologicamente, sia con le cartografie idrogeologiche di partenza, sia con le informazioni geologiche di base delle carte di maggior dettaglio.
5. *Collezione e armonizzazione dei tematismi puntuali e lineari.* I tematismi proiettati derivano dalla collezione e armonizzazione, sia dei dati presenti nelle cartografie regionali di partenza, sia da altre fonti (cfr. cap. 5).
   a. Ai dati piezometrici, essendo relativi a studi relizzati in anni differenti, è stato attribuito un colore in base al periodo di acquisizione (vedi legenda in carta). In caso di piezometrie troppo dense o articolate per essere rappresentate alla scala della carta, numero ed equidistanza sono stati rispettivamente ridotto e aumentata e l'andamento è stato regolarizzato senza modificare la direzione principale di flusso e la quota.
   b. Sono state riportate le principali linee di deflusso sotterraneo, specialmente quelle relative all'alimentazione delle sorgenti principali. Laddove presenti in bibliografia sono state riprese le medesime linee, mentre in altri casi sono state tracciate nell'ambito di questo lavoro.
   c. Per la prima volta in una mappa idrogeologica nazionale, sono state mappate tutte le principali linee sorgive (fontanili o zone di risorgiva) che emergono lungo il confine tra alta e bassa pianura nella Pianura Padano-Veneta. Le località sono state ricavate dai database regionali di (Piemonte, Lombardia, Veneto, Friuli-Venezia Giulia, Emilia-Romagna). Nei

Medium-High, Medium, Medium-Low, Low, Very Low). These were then converted into four standardized classes, consistent with the methodology set out in the national guidelines (ISPRA, 2018, Roma & Vitale, 2008)) of the CARG hydrogeological mapping project: High (AP), Medium (MP), Low (SP), and Very Low (BP).

3. Transposition of regional hydrogeological data onto the 1:500.000 geological base. *After assigning permeability classes to the hydrogeological complexes identified in the 1:250.000-scale maps, this information was transferred to the 1:500.000 geological base. Before processing in a GIS environment, a detailed correspondence was established between the lithologies of the geological base and the identified hydrogeological complexes, by working directly with the attribute tables of more than 12.000 polygons that comprise the geological dataset.*
4. Verification of correct attribute assignments. *A quality control process was carried out to ensure that the assigned attributes were geologically consistent with the source hydrogeological maps and, in some cases, with more detailed geological maps.*
5. Collection and harmonization of point and linear thematic data. *The thematic elements were harmonized by integrating data from the regional maps and other sources (see Chapter. 5).*
   a. *Piezometric data were color-coded according to the period of acquisition (see the map legend). Where piezometric lines were too dense or complex for representation at this scale, their number and spacing were reduced and increased, respectively, and their layout regularized without altering flow direction and elevation.*
   b. *Major groundwater flowpaths, particularly those feeding major springs, were included. Where available in the literature, published lines were adopted; otherwise, they were defined during this study.*
   c. *For the first time in a national hydrogeological map, all the main resourgences (fontanili) emerging along the boundary between the upper and lower plains in the Po-Venetian Plain have been mapped. The locations were derived from regional databases of Piedmont, Lombardy, Veneto, Friuli Venezia Giulia, and Emilia-Romagna. In cases where point data were not publicly available, requests were submitted to the competent authorities.*
   d. *Only officially tapped springs (from Istat sources; see Chapter. 5 and ANNEX Table A) were shown as point springs due to data homogeneity. However, since many known springs or spring groups, especially those*

casi in cui i dati puntuali non erano disponibili pubblicamente, sono state fatte richieste alle autorità competenti.

d. Per quanto riguarda le sorgenti puntuali, l'unico dato riportato in carta, perché omogeneo sul territorio, è quello delle sorgenti captate da fonte Istat (cfr. cap. 5 e Tabella Fuori Testo A). Tuttavia, molte sorgenti o gruppi sorgivi noti sarebbero risultati privi di simbologia sulla carta, soprattutto in quei casi in cui l'acqua viene prelevata tramite pozzi o non vi è alcuna captazione. Per ovviare a questa limitazione, si è deciso di includere un altro tematismo specifico, le sorgenti da fonte bibliografica, selezionando le più importanti, quasi esclusivamente con una portata superiore a 1000 L/s, sulla base delle informazioni reperite dalle fonti bibliografiche disponibili (rappresentate in carta come sorgenti >500 L/s). I dati relativi alle sorgenti da fonte bibliografica sono nella Tabella Fuori Testo B disponibile sulla pagina web di ISPRA http://idrogeologia.isprambiente.it/.

e. Le sorgenti termominerali (ovvero con temperatura all'emergenza >20°C) derivano dalla banca dati messa a punto nell'ambito del progetto H2020 GeoERA Hover (programma EU Horizon 2020, grant agreement N.731166), cui il Servizio Geologico d'Italia di ISPRA ha partecipato. Sono state selezionate circa 240 sorgenti già incluse in un database a scala paneuropea, per le quali sono state collezionate le portate di riferimento e le principali caratteristiche fisico-chimiche, che evidenziano anche situazioni estreme di sovra-mineralizzazione ed elevate temperature corrispondenti a siti di importanti stazioni termali e campi geotermici. I dati relativi alle sorgenti termominerali sono nella Tabella Fuori Testo C disponibile sulla pagina web di ISPRA http://idrogeologia.isprambiente.it/.

f. Le sorgenti costiere e quelle sottomarine possono manifestarsi sia come emergenze concentrate e visibili a pochi metri sul livello del mare, sia come scaturigini sottomarine, assumendo forme puntuali oppure distribuite. Per tale motivo è frequente che sfuggano alla rilevazione sistematica, se non in seguito a indagini specifiche. Per la poca omogeneità sul territorio delle informazioni raccolte si è deciso di rappresentare queste due tipologie di emergenze insieme, con unica categoria, riportandone l'ubicazione e differenziando le sorgenti puntuali (simbolo puntuale) da quelle diffuse (simbolo lineare). I dati sono stati estratti dalla bibliografia esistente, da approfondite ricerche in rete oltre che dal contributo specifico degli Enti (Regioni, AdB, ARPA, Università etc) che posseggono un'approfondita conoscenza del territorio di competenza (Cotecchia et al., 1990; Cotecchia et al. 1993;

tapped via wells or not captured, would have been omitted, a separate thematic layer was added for Bibliographically sourced the most significant, almost exclusively springs with discharge >1000 L/s (represented on the map as springs >500 L/s). The data on springs from bibliographic sources are available in ANNEX Table B, accessible on the ISPRA website at http://idrogeologia.isprambiente.it/.

e. Thermal and mineral springs (emergence temperature >20°C) were extracted from the database compiled in the EU H2020 GeoERA HOVER project (grant agreement No. 731166), in which ISPRA's Geological Survey of Italy participated. About 240 springs were included, with discharge and physicochemical characteristics indicating extreme mineralization and high temperatures, often linked to thermal spa and geothermal fields. The data on thermal and mineral springs are available in ANNEX Table C, accessible on the ISPRA website at http://idrogeologia.isprambiente.it/.

f. Coastal and submarine springs can appear as concentrated or diffuse discharges near or below sea level and are often difficult to detect without targeted surveys. Given the inconsistency of available data, both types were grouped under a single category, with point symbols for discrete springs and line symbols for diffuse ones. Data sources include literature, online research, and contributions from regional and national authorities (e.g. Cotecchia et al., 1990, 1993; BGR, EGS, UNESCO, 2008; Capelli et al., 2012; Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 2014; Hydrogeological Map of Italy 1:50.000, Lauria sheet in press).

g. Urbanized areas of major cities were highlighted using a pattern representing continuous urban fabric. Data were taken from the IGM base map and Istat datasets to ensure complete coverage of regionally significant urban centers.

h. In supporting diagrams, outside the map extent, water well density was derived from well data archived under L. 464/1984. These were used to map the water well density per 5 km². Although the dataset is being updated, the preliminary results provide an overview of groundwater abstraction pressure across the country and were also used to assist in assigning productivity classes to geological units (see par. 3.5).

3.3 Main Regional Hydrogeological Mapping Studies and Projects in Italy Used for this National Synthesis

For Northern Italy, the reference studies and cartographic products used in the development of

BGR, EGS, UNESCO, 2008; Capelli et al., 2012; Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 2014; Carta Idrogeologica d'Italia 1:50.000 Foglio Lauria, in fase di stampa).

g. Sono state messe in risalto le aree antropizzate delle principali città, con un pattern rappresentante l'urbanizzato continuo. I dati sono stati estratti sia dalla base topografica IGM che dai dati Istat, al fine di coprire la totalità dei centri urbani di importanza regionale.

h. Nell'ambito degli schemi a corredo, fuori dal campo carta, sono stati utilizzati i pozzi relativi alle comunicazioni ad oggi archiviate nell'ambito della banca dati della L. 464/1984, per mappare la "densità di pozzi" sul territorio rispetto ad una unità di superficie di 25 km^2. I risultati dell'elaborazione dei dati, seppure preliminari, giacché la banca dati è in corso di aggiornamento e implementazione, restituiscono una visione immediata di quello che è lo scenario di sfruttamento della risorsa idrica sotterranea nel Paese e sono stati utilizzati anche per aiutare nell'attribuzione della produttività dei singoli poligoni componenti la base dati (cfr. par 3.5).

3.3 Principali studi e progetti di cartografia idrogeologica regionale in Italia utilizzati per questa sintesi nazionale

Per l'Italia settentrionale, gli studi e i prodotti cartografici di riferimento per lo sviluppo della nuova Carta Idrogeologica d'Italia (1:500.000) sono stati:

- la Carta Idrogeologica schematica del Piemonte (NW Italia) 1:250.000 (Civita et al., 2005), utilizzata principalmente per la verifica dell'attribuzione dei complessi nella zona alpina e nel settore delle Langhe e Monferrato.
- I prodotti relativi alla ricerca sulla vulnerabilità e sul rischio di inquinamento della pianura padana e veneto friulana (Giuliano et al., 1998), che hanno permesso una differenziazione dei maggiori complessi detritici, non evidenziati dalla carta litologica d'Italia 1:500.000 (Compagnoni et al., 2011) utilizzata come base principale di questo studio.
- Lo studio per la definizione dei corpi idrici sotterranei nella regione montana lombarda (Masetti et al., 2022; Stevenazzi et al., 2023), utilizzato per la verifica dell'attribuzione dei complessi e della produttività.
- Le cartografie geologiche regionali in scala 1:250.000, utilizzate come base di confronto in caso di attribuzione dubbia di alcuni complessi.
- Dati relativi a piezometrie e localizzazione dei fontanili nella Pianura Padana messi a disposizione dagli uffici geologici regionali.

In Centro Italia, i lavori cardine sono stati:

- Lo Schema idrogeologico dell'Italia Centrale alla scala 1:500.000 (Boni et al. 1986).
- La carta idrogeologica della Regione Lazio alla scala 1:100.000 (Capelli et al., 2012).

the new Hydrogeological Map of Italy (1:500.000) included:

- *The schematic Hydrogeological Map of Piedmont (NW Italy) at 1:250.000 scale (Civita et al., 2005), mainly used to verify the attribution of complexes in the Alpine zone and in the Langhe and Monferrato sectors.*
- *The results of research on groundwater vulnerability and pollution risk in the Po Plain and Veneto-Friuli Plain (Giuliano et al., 1998), which enabled differentiation of major detrital complexes not represented in the 1:500.000 lithological map of Italy (Compagnoni et al., 2011) used as the main geological base for this study.*
- *The study for the delineation of groundwater bodies in the Lombard mountain region (Masetti et al., 2022; Stevenazzi et al., 2023), which supported the verification of hydrogeological complex assignments and productivity classes.*
- *Regional geological maps at 1:250.000 scale, used for comparison in cases of uncertain attribution of certain complexes.*
- *Piezometric data and locations of resurgence springs (fontanili) in the Po Plain, provided by regional geological authorities.*

In Central Italy, the key references were:

- *The Hydrogeological Framework of Central Italy at 1:500.000 scale (Boni et al., 1986).*
- *The Hydrogeological Map of the Lazio Region at 1:100.000 scale (Capelli et al., 2012).*
- *The Hydrogeological Framework of the Central Adriatic region at 1:250.000 scale (Desiderio et al., 2011).*
- *The Hydrogeological Map of Rome at 1:50.000 scale (La Vigna & Mazza, 2015).*

For Southern Italy, the reference studies were:

- *The Hydrogeological Map of Southern Italy at 1:250.000 scale (Celico et al., 2005).*
- *The study "Hydrogeology of Continental Southern Italy," which summarizes research focused on the characterization of hydrogeological settings and groundwater resource identification in continental Southern Italy, developed within the European INTERREG IIC programme (De Vita et al., 2018).*
- *The Geological Map of Sicily at 1:250.000 scale (Lentini & Carbone, 2014).*
- *The Geological Map of Campania at 1:250.000 scale (Vitale & Ciarcia, 2018).*
- *The geological map of Sardinia (Italy) at 1:250.000 scale (Carmignani et al., 2016).*

3.4 Definition and Description of Hydrogeological Complexes

Hydrogeological complexes are defined as groups of lithological units that are similar in nature, have demonstrated spatial and structural continuity, shared a predominant type of permeability, and

- Lo Schema idrogeologica dell'Italia Centro Adriatica alla scala 1:250.000 (Desiderio et al., 2011).
- La Carta idrogeologica di Roma alla scala 1:50.000 (La Vigna & Mazza, 2015).

Per il Sud Italia, i lavori di riferimento sono stati:

- La Carta idrogeologica dell'Italia Meridionale alla scala 1:250.000 (Celico et al., 2005).
- L'idrogeologia dell'Italia meridionale continentale che riassume i risultati di uno studio incentrato sulla caratterizzazione idrogeologica e sul riconoscimento delle risorse idriche sotterranee nell'Italia meridionale continentale, sviluppato nell'ambito del programma europeo INTERREG IIC (De Vita et al., 2018).
- La Carta geologica della Sicilia alla scala 1:250.000 (Lentini & Carbone, 2014).
- La Carta geologica della Campania alla scala 1:250.000 (Vitale & Ciarcia, 2018).
- La Carta geologica della Sardegna alla scala 1:250.000 (Carmignani et al., 2016).

3.4 Definizione e descrizione dei Complessi Idrogeologici

I complessi idrogeologici sono definiti come l'insieme di termini litologici simili, aventi una comprovata continuità spaziale e giaciturale, un tipo di permeabilità prevalente in comune e un grado di permeabilità relativa che si mantiene in un campo di variazione piuttosto ristretto (Civita, 1973).

La differenziazione tra un complesso ed un altro, nell'ambito di questa cartografia, è data dal grado di permeabilità relativa, indipendentemente dal tipo, e secondo 4 classi come precedentemente indicato. In questa cartografia si è adottato un principio di accorpamento prevalentemente litologico, che, data la scala di rappresentazione, ha comportato diverse semplificazioni. Sono stati identificati 19 complessi idrogeologici. Alle alte permeabilità sono stati assegnati colori in gradazioni di rosso, alle Medie Permeabilità, che riguardano la maggior parte dei complessi, sono stati assegnati colori in gradazioni di giallo fino ai toni di marrone, alle Scarse Permeabilità sono stati assegnati colori in gradazioni di verde, mentre alle Bassissime Permeabilità sono stati assegnati colori in gradazioni di grigio. Non si è ritenuto opportuno riportare retini litologici, per cui i complessi sono rappresentati solo dal colore pieno. Per un opportuno riferimento alle macro categorie di complessi idrogeologici a cui fa riferimento la normativa vigente (D.Lgs. 30/2009) identificati dalla superata cartografia di Fried et al. (1982), ogni complesso idrogeologico in legenda riporta anche la corrispondenza a dette macro categorie (Tabella 1). In taluni casi non è stato possibile identificare una corrispondenza univoca per via del differente criterio di raggruppamento usato da Fried et al. (1982), che oltre alla base litologica considerava anche l'età delle formazioni e la localizzazione geografica.

3.5 Definizione ed attribuzione della produttività

Per produttività si intende la resa di un serbatoio di acqua sotterranea (Bianchi et al., 2020), ossia la ca-

exhibit a degree of relative permeability within a relatively narrow range (Civita, 1973). In this cartographic product, the differentiation between complexes is based solely on their relative permeability, regardless of the permeability type, and is grouped into four classes, as previously described. A primarily lithological grouping criterion was adopted, which-given the map scale-required a certain degree of simplification. A total of 19 hydrogeological complexes were identified. The color scheme was designed as follows: High permeability classes were assigned shades of red; Medium permeability classes (the majority of the map) were represented by yellow to brown tones; Low permeability classes were assigned green tones; Very low permeability classes were shown in shades of grey. No lithological hatching was used; each complex is represented solely by a solid color. To allow cross-reference with the macro-categories of hydrogeological complexes used in the current legal framework (Legislative Decree 30/2009), which are derived from the outdated mapping by Fried et al. (1982), each hydrogeological complex in the legend includes a correspondence to these macro-categories (see Table 1). In some cases, a one-to-one correspondence could not be established due to the different grouping criteria used by Fried et al. (1982), which considered not only lithological characteristics but also formation age and geographic location.

3.5 Definition and Attribution of Productivity

Productivity refers to the yield of a groundwater reservoir (Bianchi et al., 2020), i.e., the ability of a given aquifer to sustainably supply water. It is therefore an indicator of the sustainable exploitation potential of groundwater resources in each area. As in the IHME1500 (Duscher et al., 2015), six productivity classes have been identified in this study, within which the main groundwater flow types are also defined: HPP - High productivity of porous aquifers, MPP - Moderate productivity of porous aquifers, HPF - High productivity of fractured and karst aquifers, MPF - Moderate productivity of fractured and karst aquifers, LPL - Low productivity of aquitards or aquifers of local importance, NGW - Predominantly non-productive zones and aquicludes.

For the assignment of productivity levels to the polygons of hydrogeological complexes in the new Hydrogeological Map of Italy, a multi-phase approach was adopted. Initially, a correlation was established with the complexes defined in the map by Fried et al. (1982)-referenced in Legislative Decree 30/2009-to which productivity values had already been assigned in previous studies (ADB PO, 2016). This correlation enabled a preliminary classification of productivity classes. In a second phase, these preliminary assignments were further assessed by comparison with the information available for groundwater bodies under the

pacità di un certo acquifero di fornire acqua in modo sostenibile. La produttività è quindi un indice delle potenzialità di sfruttamento sostenibile delle risorse idriche in una data area. Come per la IHME1500 (Duscher et al., 2015), si sono riconosciute in questo studio sei classi di produttività al cui interno sono definite anche le principali modalità di flusso (HPP - Alta di acquiferi porosi, MPP - Media di acquiferi porosi, HPF - Alta di acquiferi fratturati o carsici, MPF - Media di acquiferi fratturati e carsici, LPL - Bassa di acquiferi di importanza locale e acquitardi, NGW - Zone in prevalenza improduttive e aquicludi). Per l'attribuzione della produttività ai poligoni dei complessi idrogeologici della nuova Carta Idrogeologica d'Italia si è proceduto in più fasi, creando un collegamento ai complessi definiti nella carta di Fried et al. (1982) - e richiamati dal D. Lgs. 30/2009 - a cui in studi precedenti (ADB PO, 2016) era già stata attribuita una produttività. Questo collegamento ha portato ad una attribuzione delle classi di produttività preliminare. La fase successiva è consistita in un'ulteriore verifica delle produttività attribuite dal confronto con il livello informativo relativo ai corpi idrici sotterranei della Direttiva Acque WFD (WISE, 2022). Successivamente, in considerazione del maggior dettaglio della nuova carta e del maggior numero di complessi presenti, le attribuzioni preliminari sono state valutate localmente anche in base alla conoscenza esperta e ad altri fattori quali la presenza di pozzi o sorgenti. Attraverso l'attribuzione della produttività, non per complessi, ma per singoli poligoni, è stato possibile rappresentare la variabilità della produttività anche nell'ambito dello stesso complesso idrogeologico e anche nella terza dimensione. È il caso dei corpi alluvionali della Pianura Padano-Veneta: nonostante, infatti, alcuni complessi ivi affioranti presentino caratteristiche di scarsa permeabilità, il significativo sistema multi-falda dell'ampia pianura consente l'attribuzione di una produttività alta, verificata anche dalle produttività risultanti sui Corpi Idrici Sotterranei della WFD e dalla presenza di un cospicuo numero di pozzi. Un altro esempio è rappresentato da complessi idrogeologici con un più elevato grado di dettaglio rispetto a quelli di Fried et al. (1982) come il Complesso Marnoso e Calcareo-Marnoso che in Fried et al. (1982) sarebbero ricaduti in un unico complesso carbonatico, caratterizzato quindi da produttività HPF. Nella nuova carta è stato possibile differenziarli, sottolineandone l'effettiva importanza idrogeologica e attribuendo loro una produttività più coerente. Per la rappresentazione del grado di produttività in carta è stato scelto un sovrassegno che si sovrappone ai complessi idrogeologici. Il segno puntinato rappresenta gli acquiferi porosi, relativamente ad alta produttività (puntinato largo) e media (puntinato stretto), mentre le linee continue rappresentano, in verticale l'alta produttività degli acquiferi fratturati e carsici, e con direzione obliqua la produttività media di questi ultimi. Per la bassa produttività si sono scelte delle linee continue orizzontali, mentre per le zone sterili (acquicludi) si è scelto di non sovrapporre alcun segno, lasciando quindi immutato il colore del complesso idrogeologico relativo.

Water Framework Directive (WFD) (WISE, 2022). Subsequently, considering the greater detail of the new map and the increased number of complexes represented, the preliminary classifications were locally refined based on expert knowledge and other factors, such as the presence of wells or springs.

By assigning productivity not at the complex level, but rather at the level of individual polygons, it became possible to represent variations in groundwater productivity within the same hydrogeological complex, including in the vertical dimension. A notable example is that of the alluvial bodies of the Po-Venetian Plain: although some outcropping complexes in the area display low permeability characteristics, the significant multi-aquifer system of the broad plain allows for the assignment of high productivity, as confirmed by both the WFD groundwater body data and the presence of a substantial number of wells. Another example is represented by hydrogeological complexes described with a higher level of detail than those in Fried et al. (1982). For instance, the Marl and Marly-Limestone Complexes, which in the 1982 map would have been included within a single carbonate complex (and thus classified with HPF productivity), have now been differentiated in the new map, highlighting their actual hydrogeological relevance and assigning more appropriate productivity levels.

To depict the degree of productivity on the map, an overlay symbol system was used on top of the hydrogeological complexes. A dotted pattern represents porous aquifers;widely spaced dots for high productivity, and closely spaced dots for medium productivity. Solid lines indicate fractured and karst aquifers: vertical lines for high productivity and diagonal lines for medium productivity. Horizontal solid lines are used for low productivity units. No overlay symbol was applied to non-productive areas (aquicludes), thereby preserving the original color of the corresponding hydrogeological complex.

4. SITUAZIONE CLIMATICA IN ITALIA IN RELAZIONE AGLI APPORTI UTILI ALLA RICARICA DEGLI ACQUIFERI

Barbato G., Giugliano G., Mercogliano P.
CMCC Foundation - Euro-Mediterranean Center on Climate Change, Italy

4.1 Caratteristiche climatiche generali del Paese

I cambiamenti climatici possono influenzare la ricarica delle falde acquifere attraverso la riduzione delle precipitazioni annuali, l'aumento di eventi estremi di precipitazioni e l'innalzamento delle temperature medie. Nello specifico, l'aumento delle temperature può provocare: un incremento dell'evapotraspirazione, riducendo così la quantità di acqua che effettivamente può raggiungere e alimentare le falde sotterranee, una riduzione del manto nevoso e un'anticipazione dei periodi di scioglimento; tutti elementi che hanno di conseguenza impatti importanti nei processi di ricarica degli acquiferi. Secondo quanto riportato nel Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico (PNACC 2023), nel trentennio 1981-2010, in termini di precipitazione totale nella penisola italiana si registrano i valori più alti durante la stagione autunnale soprattutto in Liguria e Friuli-Venezia Giulia; le aree geografiche del Sud - Italia e le isole invece risultano, in particolare nella stagione estiva, le meno piovose. In termini di temperatura media i valori più bassi si registrano in tutte le stagioni lungo le catene montuose delle Alpi e degli Appennini. La forte differenza orografica è messa in perfetta luce nella stagione estiva dalla distribuzione dei valori della temperatura media. Una descrizione dei valori medi di temperatura e precipitazione e di alcuni indici climatici, aggiornata al trentennio più recente, elaborata sulla base di un insieme di stazioni del sistema SCIA ed integrata con dati provenienti da ulteriori fonti, è disponibile nel rapporto ISPRA "*I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia*" (Fioravanti et al., 2022). Nello stesso PNACC le proiezioni climatiche sull'Italia sono fornite a partire dai dati disponibili sul Copernicus Data Store (https://cds.climate.copernicus.eu/), ottenute dal programma EURO-CORDEX (Jacob et al; 2020) a partire dal downscaling dinamico dall'ensemble multi-modello CMIP5 e considerando diversi scenari RCP (Percorsi di Concentrazione Rappresentativi). Il programma EURO-CORDEX rappresenta l'iniziativa di riferimento a livello europeo per la produzione di dati climatici ad alta risoluzione spaziale (circa 12 km), finalizzata a supportare le valutazioni di impatto e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Attraverso una coordinazione scientifica tra i principali centri di modellistica climatica europei, EURO-CORDEX ha reso disponibili dataset fondamentali per lo studio dei cambiamenti climatici in Europa a scala regionale e locale. Il downscaling dinamico, sviluppato all'interno di questo contesto, rappresenta oggi uno degli strumenti più avanzati a supporto dei processi decisionali. Questo approccio consente infatti una caratterizzazione più dettagliata dell'incertezza e una rappresentazione realistica dei fenomeni

4. CLIMATIC CONDITIONS IN ITALY IN RELATION TO EFFECTIVE RECHARGE CONTRIBUTIONS TO AQUIFERS

Barbato G., Giugliano G., Mercogliano P.
CMCC Foundation - Euro-Mediterranean Center on Climate Change, Italy

4.1 General climatic characteristics of the country

Climate change can affect aquifer recharge by reducing annual precipitation, increasing extreme rainfall events, and raising average temperatures. Specifically, rising temperatures can lead to: increased evapotranspiration, thereby reducing the amount of water effectively reaching and recharging the aquifers; reduced snow cover and earlier snowmelt periods. These factors significantly impact aquifer recharge processes. According to the Italian National Climate Change Adaptation Plan (PNACC 2023), during the 1981-2010 period, the highest total precipitation values were recorded in autumn, especially in Liguria and Friuli-Venezia Giulia, whereas southern Italy and the islands were the driest areas, particularly in summer. In terms of average temperature, the lowest values occurred in all seasons along the Alpine and Apennine Mountain ranges. The strong orographic variability is clearly highlighted by the distribution of average temperatures during the summer season. A description of the average values of temperature and precipitation, along with selected climate indices updated for the most recent 30-year period, based on a set of SCIA system stations and supplemented with additional data sources, is available in the ISPRA report "I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia" (Fioravanti et al., 2022).

In the same PNACC, climate projections for Italy are based on data from the Copernicus Data Store (https://cds.climate.copernicus.eu/), derived from the EURO-CORDEX program (Jacob et al., 2020), which applies dynamic downscaling to the CMIP5 multi-model ensemble and considers different Representative Concentration Pathways (RCPs). EURO-CORDEX is the European reference initiative for producing high spatial resolution (\~12 km) climate data, supporting impact assessments and climate adaptation planning. Through coordination among major European climate modeling centers, EURO-CORDEX has made available fundamental datasets for the study of climate change at regional and local scales in Europe. The dynamic downscaling approach developed within this framework is one of the most advanced tools for decision-making support, as it provides a more detailed characterization of uncertainty and a realistic representation of extreme climate phenomena-critical aspects for impact studies and effective adaptation strategies. These projections, in particular, provide an overview of expected changes for the period 2036-2065 relative to the

climatici estremi, aspetti cruciali per lo studio degli impatti e la definizione di strategie di adattamento efficaci. Tali proiezioni in particolare, offrono un quadro delle variazioni attese nel periodo 2036-2065 rispetto al trentennio di riferimento 1981-2010.Nel dettaglio, per quanto riguarda le precipitazioni totali annue, lo scenario ad alte emissioni (RCP8.5) evidenzia una diminuzione nel Sud Italia e in Sardegna, mentre al contrario mostra un aumento nelle regioni del Nord-Ovest e Nord-Est. Lo scenario di mitigazione aggressiva (RCP2.6) suggerisce invece un incremento significativo delle precipitazioni al Nord e una leggera riduzione al Sud. In termini di precipitazioni intense, dalle analisi si evince un loro generalizzato incremento su scala giornaliera, sia in termini di intensità che di frequenza, specie per lo scenario ad elevate emissioni (RCP 8.5), ed in particolar modo per le aree del centro-nord. Per quanto concerne la temperatura media, entro la fine del secolo si prevede un aumento compreso tra 1°C (RCP2.6) e 5°C (RCP8.5) sull'intero territorio italiano. Questo riscaldamento comporta, in tutti gli scenari IPCC considerati, un aumento generalizzato dell'evapotraspirazione potenziale, con possibili implicazioni rilevanti per la disponibilità idrica.

4.2 Distribuzione degli apporti nei distretti idrografici

La distribuzione degli apporti idrici in Italia rappresenta un aspetto cruciale per la gestione delle risorse idriche, fortemente influenzata da fattori climatici, geomorfologici e territoriali. Per una valutazione dettagliata del bilancio idrologico e di ulteriori indicatori rilevanti per la gestione della risorsa idrica, ISPRA elabora con cadenza annuale il rapporto *Bilancio idrologico nazionale: stime BIGBANG e indicatori sulla risorsa idrica* basato sui risultati del modello BIGBANG (Braca et al., 2024). Tale rapporto fornisce diverse informazioni: il bilancio idrologico nazionale che include 17 variabili idrologiche, il quadro quantitativo della risorsa idrica e, più in generale, la situazione idrologica aggiornata all'ultimo anno di dati disponibili, ricostruendo trend e differenze rispetto ai valori medi del trentennio climatologico 1991-2020. L'analisi qualitativa presentata in questo documento propone una panoramica della distribuzione degli apporti idrici in Italia nei distretti idrografici sulla base di due variabili idrologiche essenziali per comprendere il bilancio idrico di ciascun distretto e di conseguenza la potenziale ricarica degli acquiferi: la precipitazione totale annuale (PRCPTOT) e l'evapotraspirazione potenziale (PET). Gli indicatori presi in esame sintetizzano alcune delle caratteristiche del clima che possono influenzare la ricarica delle falde acquifere e quindi risultano utili per valutare i principali impatti locali dei cambiamenti climatici, su cui si basano le strategie di adattamento per la gestione della risorsa idrica. Per questa analisi di dettaglio sono stati utilizzati dati climatici prodotti da modelli di nuova generazione noti come CPM (Convection-Permitting Models). Si tratta di strumenti innovativi, sempre più adottati nella comunità scientifica, in grado di rappresentare con

1981-2010 reference period.

Specifically, regarding total annual precipitation, the high-emissions scenario (RCP8.5) projects a decrease in southern Italy and Sardinia, while an increase is expected in the northwestern and northeastern regions. The strong mitigation scenario (RCP2.6) instead suggests a significant increase in precipitation in the North and a slight reduction in the South. As for intense precipitation, analyses show a general increase at the daily scale, both in terms of intensity and frequency, particularly under the high-emissions scenario (RCP8.5), and especially in central-northern areas.

Regarding average temperature, an increase of between 1°C (RCP2.6) and 5°C (RCP8.5) across the entire Italian territory is projected by the end of the century. This warming, under all considered IPCC scenarios, leads to a generalized increase in potential evapotranspiration, with possible significant implications for water availability.

4.2 Distribution of effective contributions across River Basin districts

The spatial distribution of water inputs in Italy is a key aspect for water resource management and is strongly influenced by climatic, geomorphological, and territorial factors. For a detailed assessment of the hydrological balance and other relevant indicators, ISPRA publishes the annual National Hydrological Budget: BIGBANG estimates and water resource indicators report, based on the BIGBANG model results (Braca et al., 2024). This report includes the national hydrological balance (with 17 variables), a quantitative overview of water resources, and an updated depiction of the hydrological situation for the most recent data year, reconstructing trends and differences compared to the 1991-2020 climatological averages.

The qualitative analysis presented here provides an overview of the distribution of water inputs across Italy's river basin districts based on two key variables for understanding the water balance and the aquifer recharge potential: total annual precipitation (PRCPTOT) and potential evapotranspiration (PET). These indicators summarize relevant climatic characteristics that can influence groundwater recharge and are therefore useful for assessing local impacts of climate change, which inform water management adaptation strategies.

This detailed analysis relies on climate data generated by next-generation models known as Convection-Permitting Models (CPMs). These innovative tools, increasingly adopted by the scientific community, offer high spatial and temporal resolution and can simulate local atmospheric dynamics more accurately (Coppola et al., 2020; Pichelli et al., 2021).

For both the reference period and the future climate assessment, high-resolution data (\~2 km) produced within the European Highlander

maggiore dettaglio il clima e le sue variazioni, grazie alla capacità di simulare le dinamiche atmosferiche locali su scale spaziali e temporali molto dettagliate (Coppola et al., 2020; Pichelli et al., 2021). Sia per lo studio del periodo di riferimento sia per la valutazione del clima futuro atteso, sono stati utilizzati dati ad altissima risoluzione (circa 2 km) sviluppati nell'ambito del progetto europeo Highlander (https://highlander-project.eu/). Questi dati consentono di analizzare in modo approfondito le dinamiche atmosferiche locali e la loro evoluzione nello spazio e nel tempo, offrendo un supporto per la comprensione delle dinamiche atmosferiche a livello locale. Nello specifico, per il periodo di riferimento (1981-2010), come ulteriore strumento a supporto delle stime ottenute mediante il modello BIGBANG, è stato utilizzato un dataset ad altissima risoluzione realizzato dal CMCC (VHR-REA_IT, Raffa et al., 2021, Adinolfi et al., 2023), basato su downscaling della rianalisi ERA5 di ECMWF. Come riferimento, è stato utilizzato il periodo 1981-2010 in quanto rappresenta quello più recente che è possibile considerare utilizzando gli esperimenti IPCC del progetto CIMP5, su cui si è basata l'analisi del clima atteso, ottenuta utilizzando le proiezioni climatiche ad altissima risoluzione realizzata dal CMCC (VHR-PRO_IT, Raffa et al., 2023), oggetto del successivo paragrafo. Per approfondire la valutazione della condizione climatica osservata su periodi più recenti (1991-2020) si rimanda ai report ISPRA citati sopra. Un quadro generale sul periodo di riferimento 1981-2010 viene riportato in Tabella 2 in termini di valore medio spaziale e di deviazione standard come stima della variabilità spaziale degli indicatori all'interno dei distretti. In linea generale, i distretti settentrionali e alpini mostrano condizioni molto diverse rispetto alle

project (https://highlanderproject.eu/) were used. These data provide a detailed analysis of local atmospheric dynamics and their spatiotemporal evolution, supporting a better understanding of local climate dynamics.

Specifically, for the reference period (1981-2010), as additional support to the BIGBANG model estimates, the high-resolution dataset VHR-REA_IT developed by CMCC (Raffa et al., 2021; Adinolfi et al., 2023), based on the ERA5 reanalysis by ECMWF, was used. The 1981-2010 period is the most recent that can be considered using the IPCC CMIP5 experiments, which underpin the high-resolution climate projections developed by CMCC (VHR-PRO_IT, Raffa et al., 2023) discussed in the next section. For a more recent climatic assessment (1991-2020), reference can be made to the above-mentioned ISPRA reports.

A general overview of the reference period 1981-2010 is provided in Table 2, showing spatial averages and standard deviations as an estimate of spatial variability of the indicators within the districts. Overall, northern and Alpine districts show markedly different conditions from southern and insular areas, with substantial implications for aquifer recharge. In particular, the Eastern Alps district records the highest precipitation values and among the lowest evapotranspiration rates, creating favorable conditions for recharge. In contrast, the Sicily and Sardinia districts show critical conditions, with potential evapotranspiration clearly exceeding precipitation. These findings are consistent with those derived from the BIGBANG model, particularly the climatological values 1981-2010 reported in ISPRA Report 339/2021 Il Bilancio

Tabella 2 - Medie spaziali annuali degli indicatori calcolati per distretto a partire dal dataset VHR-REA_IT per il periodo 1981-2010; nelle colonne +/-DS viene invece riportata una stima della variabilità su scala distrettuale (tramite il calcolo della deviazione standard).
Table 2 - Annual spatial averages of the indicators calculated by river basin district based on the VHR-REA_IT dataset for the period 1981-2010; the +/-SD columns report an estimate of the intra-district spatial variability (as the standard deviation).

	PRCPTOT (mm/year)		**PET (mm/year)**	
Distretto/*District*	**Valore medio/*Mean***	**+/-SD**	**Valore medio/*Mean***	**+/-SD**
Fiume Po/*Po River*	1075	472	722	166
Alpi Orientali/*Eastern Alps*	1362	448	645	163
Appennino Settentrionale/ *Northern Appennines*	762	270	771	77
Appennino Centrale/*Central Appennines*	835	274	761	99
Appennino meridionale/ *Southern Appennines*	771	263	801	96
Sardegna/*Sardinia*	466	121	809	62
Sicilia/*Sicily*	513	187	849	84

aree meridionali e insulari, con implicazioni sostanziali per la ricarica degli acquiferi. Nello specifico, il distretto Alpi Orientali presenta il valore più elevato di precipitazioni e uno dei valori più bassi di evapotraspirazione, creando condizioni molto favorevoli per la ricarica degli acquiferi mentre il distretto Sicilia, come quello Sardegna, presenta condizioni critiche per la ricarica degli acquiferi, con una evapotraspirazione potenziale che supera nettamente le precipitazioni. Tali risultati risultano essere coerenti con quelli elaborati da ISPRA mediante il modello BIGBANG, in particolare con i valori climatologici 1981-2010 presentati nel report ISPRA 339/2021 *Il Bilancio Idrologico Gis BAsed a scala Nazionale su Griglia regolare-BIGBANG: metodologia e stime. Rapporto sulla disponibilità naturale della risorsa idrica.*

4.3 Scenari futuri e ipotesi di variazioni degli apporti rispetto ai modelli presi come riferimento

Le variazioni climatiche medie annuali delle precipitazioni totali (PRCPTOT) e dell'evapotraspirazione potenziale (PET) sono state valutate per il trentennio intorno al 2050 (2036-2065) rispetto al clima di riferimento (1981-2010) utilizzando le proiezioni ad altissima risoluzione realizzate dal CMCC (VHR-PRO_IT, Raffa et al., 2023), secondo due scenari IPCC: scenario ad elevate emissioni (RCP8.5) e scenario di forte mitigazione (RCP4.5) (cfr. schemi a bordo carta). Le proiezioni climatiche VHR-PRO_IT tramite la risoluzione spaziale che le caratterizza sono in grado di risolvere in modo esplicito i fenomeni convettivi, restituendo quindi una migliore rappresentazione degli eventi di precipitazione intense e localizzate sia nel tempo che nello spazio e, quindi, analizzare aree morfologicamente complesse come il territorio nazionale. Le variazioni climatiche percentuali di precipitazioni totali (PRCPOT) e di evapotraspirazione potenziale (PET) per distretto secondo due scenari IPCC (RCP4.5 e RCP8.5) vengono sintetizzate nella Tabella 3. Come tendenza generale, si evince una rilevante riduzione delle precipitazioni nel sud Italia ed un aumento generalizzato dell'evapotraspirazione potenziale in tutti i distretti, con valori più elevati al sud (12-15%) rispetto al nord (10-11%). Si noti che le elevate deviazioni standard indicano che alcuni territori all'interno dei distretti potrebbero sperimentare condizioni diverse rispetto alla media distrettuale. Per approfondimenti, ulteriori mappe di variazione climatiche elaborate a partire dal dataset VHR-PRO_IT risultano disponibili tramite la Dataclime cards "Proiezioni climatiche CMCC ad altissima risoluzione" presente nella piattaforma Dataclime sviluppata dal CMCC (https://www.dataclime.com/). In particolare, per quanto riguarda le temperature medie annuali, si evince un generale aumento della temperatura media su tutta l'Italia per entrambi gli scenari (RCP4.5 e RCP8.5). Questo incremento risulta più marcato per lo scenario ad elevate emissioni (RCP 8.5) e per le aree montane dove l'anomalia raggiunge quasi i 3°C. L'aumento delle temperature medie annuali può avere conseguenze significative sul manto nevoso (come Idrologico Gis BAsed a scala Nazionale su Griglia regolare-BIGBANG: metodologia e stime.

4.3 Climate change projections and impacts on recharge

Annual mean changes in total precipitation (PRCPTOT) and potential evapotranspiration (PET) were assessed for the mid-century period (2036-2065) relative to the historical reference period (1981-2010), using the very high-resolution projections developed by CMCC (VHR-PRO_IT, Raffa et al., 2023), under two IPCC emission scenarios: a high-emissions scenario (RCP8.5) and a strong mitigation scenario (RCP4.5)(see the side schemes on the map). Due to their spatial resolution, the VHR-PRO_IT projections explicitly resolve convective phenomena, offering an improved representation of intense and localized precipitation events in both space and time. This capability is especially valuable for analyzing morphologically complex areas such as the Italian territory.

The percentage changes in PRCPTOT and PET by river basin district under the two IPCC scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) are summarized in Table 3. Overall, results indicate a significant reduction in precipitation across Southern Italy and a general increase in potential evapotranspiration across all districts, with higher increases in the south (12-15%) compared to the north (10-11%). The high standard deviation values reflect the presence of substantial intra-district variability, indicating that certain areas within a district may experience climate conditions that deviate from the district-wide mean.

For further insights, additional climate variation maps derived from the VHR-PRO_IT dataset are available through the CMCC Dataclime cards "CMCC Very High-Resolution Climate Projections" on the Dataclime platform (https://www.dataclime.com/).

With regard to annual mean temperatures, projections show a widespread increase across all of Italy under both scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), with the most pronounced warming under RCP8.5 and in mountainous regions, where anomalies approach +3°C. Rising average temperatures are expected to significantly affect snow cover-reducing both its extent and duration-with consequential impacts on freshwater availability.

In general, climate projections depict a complex and evolving scenario that demands the development and implementation of climate adaptation strategies at the district level, aimed at managing the impacts on the overall hydrogeological system.

riduzione e durata del manto nevoso), con effetti rilevanti poi per la disponibilità delle risorse idriche. In generale, le proiezioni climatiche evidenziano un quadro complesso che richiede la definizione e la pianificazione di strategie di adattamento al cambiamento climatico a livello distrettuale al fine di gestire l'impatto sul sistema idrogeologico complessivo.

Tabella 3: Variazioni percentuali delle medie spaziali annuali degli indicatori calcolati per distretto; nelle colonne +/-SD viene invece riportata una stima della variabilità spaziale su scala distrettuale (tramite il calcolo della deviazione standard). Le variazioni sono calcolate per il periodo 2036-2065 rispetto al 1981-2010 sotto gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5 a partire dal dataset VHR-PRO_IT.

Table 3. Percentage variations in spatial annual averages of the indicators calculated by river basin district; the +/-SD columns report an estimate of the spatial variability at the district scale (calculated as the standard deviation). Variations are calculated for the period 2036-2065 relative to 1981-2010 under the IPCC scenarios RCP4.5 and RCP8.5, based on the VHR-PRO_IT dataset.

	PRCPTOT (mm/mm) *100				**PET (mm/mm) *100**			
	RCP4.5		**RCP8.5**		**RCP4.5**		**RCP8.5**	
Distretto/*District*	**Valore medio/** *Mean*	**+/-SD**	**Valore medio/** *Mean*	**+/-SD**	**Valore medio/** *Mean*	**+/-SD**	**Valore medio/** *Mean*	**+/-SD**
Fiume Po/ *Po River*	-2	3	0	5	12	2	13	3
Alpi Orientali/*Eastern Alps*	-1	2	4	4	10	1	11	2
Appennino Settentrionale/*Northern Appennines*	-2	4	5	4	11	1	13	1
Appennino Centrale/ *Central Appennines*	-2	4	1	6	11	1	13	1
Appennino meridionale/ *Southern Appennines*	-8	4	-9	5	11	1	14	2
Sardegna/*Sardinia*	-2	6	-1	4	12	1	14	1
Sicilia/*Sicily*	-7	6	-17	5	12	1	15	2

5. LE SORGENTI IN ITALIA E L'UTILIZZO DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE

Tersigni S.[1], Ramberti S.[2], Baldoni T.[2]
1 - Istituto Nazionale di Statistica, Istat - Dipartimento per le statistiche sociali e demografiche
2 - Istituto Nazionale di Statistica, Istat - Dipartimento per le statistiche economiche, ambientali e dei conti nazionali, Direzione centrale per le statistiche ambientali e territoriali

5.1 Definizioni

Un elemento informativo di primaria importanza riportato nella carta idrogeologica è costituito dalla precisa indicazione dei punti di prelievo delle sorgenti. Questi punti rappresentano la localizzazione di specifiche opere di presa, ossia infrastrutture appositamente realizzate per intercettare e captare l'acqua proveniente da sorgenti naturali o da sistemi di drenaggio artificiale. Queste opere di presa, e quindi i corrispondenti punti di prelievo indicati nella carta idrogeologica, rivestono un ruolo essenziale per il prelievo di risorse idriche di qualità destinate all'approvvigionamento pubblico a uso potabile. L'acqua captata viene successivamente convogliata nelle reti di distribuzione comunali, sia urbane sia extraurbane, oppure indirizzata verso impianti di trattamento (potabilizzazione), qualora necessario. La corretta identificazione e caratterizzazione di questi punti di prelievo è pertanto fondamentale anche per una migliore pianificazione e gestione delle risorse idriche, garantendo la disponibilità di acqua potabile per la popolazione e contribuendo all'efficienza del servizio idrico integrato. Il termine sorgente, nel contesto specifico delle opere di presa e della loro rappresentazione nella carta idrogeologica, assume una connotazione più ampia e funzionale rispetto alla sua definizione puramente geologica di emergenza naturale di acqua sotterranea. In questo contesto applicativo, il termine "sorgente" include anche diverse modalità di captazione che vengono equiparate a sorgenti vere e proprie ai fini della rappresentazione cartografica e della gestione delle risorse. Queste opere intercettano e raccolgono l'acqua sotterranea in diverse strutture geologiche e idrogeologiche, e comprendono in particolare:

- gallerie drenanti;
- trincee drenanti;
- bottini di presa;
- dreni orizzontali.

In sintesi, la carta idrogeologica localizza con precisione i punti in cui vengono realizzate opere di presa per l'approvvigionamento idrico pubblico, comprendendo sotto il termine "sorgente" sia le emergenze naturali che le diverse tipologie di captazione artificiale finalizzate all'intercettazione e alla raccolta dell'acqua sotterranea. Le portate medie indicate nella carta idrogeologica in corrispondenza di questi punti di prelievo si riferiscono specificamente ai volumi d'acqua effettivamente captati e successivamente immessi nel sistema di adduzione, ovvero nella rete che trasporta l'acqua verso i centri di trattamento e distribuzione per il consumo umano. È da considerare che le portate effettivamente scaturite dalle sorgenti, ovvero il volume totale di acqua che emerge naturalmente

5. SPRINGS IN ITALY AND THE USE OF GROUNDWATER RESOURCES

Tersigni S.[1], Ramberti S.[2], Baldoni T.[2]
1- Italian National Institute of Statistics, Istat - Department for Social and Demographic Statistics
2 - Italian National Institute of Statistics, Istat - Department for Economic, Environmental and National Accounts Statistics, Directorate for Environmental and Territorial Statistics

5.1 Definitions

A key informational element presented in the hydrogeological map is the precise identification of spring abstraction points. These locations represent the specific intake works-i.e., infrastructures constructed for the purpose of intercepting and capturing water from natural springs or artificial drainage systems. These intake works, and thus the corresponding abstraction points shown on the hydrogeological map, play a crucial role in the extraction of high-quality water resources for public drinking water supply. The abstract water is subsequently conveyed through municipal distribution networks, both urban and extra-urban, or directed to treatment plants (potabilization), when necessary. The accurate identification and characterization of these abstraction points is therefore essential for improved planning and management of water resources, ensuring the availability of potable water for the population and contributing to the efficiency of the integrated water service.

The term spring, in the specific context of intake works and their representation in the hydrogeological map, takes on a broader and more functional meaning than its purely geological definition as a natural outflow of groundwater. In this applied context, the term "spring" also encompasses various forms of water capture infrastructure that are treated as equivalent to natural springs for the purposes of cartographic representation and water resource management. These works intercept and collect groundwater from various geological and hydrogeological structures and include in particular:

- *drainage galleries;*
- *drainage trenches;*
- *intake wells (locally known as* bottini*);*
- *horizontal drains.*

In summary, the hydrogeological map accurately locates the points at which intake works for public water supply are carried out, using the term "spring" to refer both to natural emergences and to various types of artificial capture systems aimed at intercepting and collecting groundwater. The average flow rates indicated on the hydrogeological map at these abstraction points specifically refer to the volumes of water captured and subsequently introduced into the conveyance system, that is, the network transporting water to treatment and distribution centers for human consumption.

It should be noted that the actual discharge of the spring, i.e., the total volume of water naturally emerging from the subsurface or intercepted by the

dal sottosuolo o che viene intercettato dalle opere di presa, sono generalmente maggiori rispetto alle quantità captate e convogliate verso la rete di distribuzione. Questo accade perché una parte dell' acqua sorgiva può continuare il suo percorso naturale, alimentando corpi idrici superficiali (fiumi, ruscelli, laghi o zone umide). La differenza tra la portata totale della sorgente e la portata captata tende ad essere più significativa soprattutto nel caso di sorgenti caratterizzate da portate complessivamente molto grandi. In queste situazioni, anche una frazione relativamente piccola della portata naturale non captata può rappresentare un volume d'acqua considerevole che continua ad alimentare l'ambiente circostante. Pertanto, la portata indicata nella carta idrogeologica rappresenta la quantità di acqua resa disponibile per l'approvvigionamento idrico pubblico, ma non necessariamente la portata idrologica complessiva della sorgente in condizioni naturali. In situazioni in cui si riscontrano diverse emergenze geograficamente poco distanti tra loro e alimentate dallo stesso acquifero, queste vengono rappresentate sulla carta idrogeologica con un unico punto, identificato come il centroide dell'area di captazione complessiva. In questi casi specifici, il valore della portata associato a questo punto unico rappresenta la somma delle portate delle singole sorgenti. Questo approccio mira a semplificare la rappresentazione cartografica, fornendo comunque un'indicazione della capacità idrica complessiva di un'area di captazione omogenea. Nella carta idrogeologica sono riportati i punti di prelievo da sorgente dove si registrano nel 2022 portate prelevate medie pari ad almeno 10 L/s (Tabella Fuori Testo A).

5.2 La fonte dei dati

Le informazioni relative ai punti di prelievo idrico presenti nella carta idrogeologica derivano da un'attività di rilevazione statistica di tipo censuario, condotta dall'Istituto Nazionale di Statistica (Istat), il *Censimento delle acque per uso civile*. Questa rilevazione è inclusa nel Programma Statistico Nazionale (codice PSN IST-02192) e viene realizzata con cadenza biennale, garantendo un aggiornamento costante e sistematico dei dati (Istat, 2019). Tale rilevazione fornisce un quadro informativo completo sull'intera filiera d'uso di gestione pubblica delle risorse idriche in Italia. Questo include le fasi cruciali del prelievo, del trasporto e della distribuzione dell'acqua potabile, fino alla raccolta e al trattamento delle acque reflue urbane. L'unità di rilevazione è costituita dagli enti gestori dei servizi idrici per uso civile. Le unità di analisi sono gli enti gestori e gli impianti gestiti da ciascun ente per lo svolgimento dei servizi di: prelievo e trasporto di acqua potabile, distribuzione dell'acqua potabile, reti fognarie e depurazione delle acque reflue urbane. I dati pervenuti sono sottoposti a procedure di controllo, correzione e validazione, al fine di individuare mancate risposte parziali, valori anomali e incongruenze. Alcuni degli indicatori prodotti attraverso questa rilevazione, con riferimento ai prelievi di acqua per uso potabile, all'efficienza della rete di distribuzio-

intake works, is generally greater than the volume abstracted and conveyed to the distribution network. This is because part of the spring water may continue its natural course, feeding surface water bodies such as rivers, streams, lakes, or wetlands. The difference between the total discharge of the spring and the abstract flow tends to be particularly significant in the case of springs with very large overall discharges. In these situations, even a relatively small fraction of the unabstracted natural flow can represent a substantial volume of water that continues to sustain the surrounding environment. Therefore, the flow rate shown on the hydrogeological map represents the amount of water made available for public water supply, but not necessarily the total natural hydrological discharge of the spring.

In cases where multiple emergences occur in proximity and are fed by the same aquifer, they are represented on the hydrogeological map with a single point, identified as the centroid of the overall abstraction area. In such cases, the flow rate value associated with this single point represents the sum of the discharges from the individual springs. This approach aims to simplify the cartographic representation while still providing an indication of the overall water capacity of a homogeneous abstraction area.

The hydrogeological map reports spring abstraction points where, in 2022, the average flow rates captured were at least 10 L/s (ANNEX Table A).

5.2 Data Source

The information regarding water abstraction points included in the hydrogeological map originates from a statistical census survey conducted by the Italian National Institute of Statistics (Istat), namely the Urban water census. This survey is part of the National Statistical Program (code PSN IST-02192) and is carried out on a biennial basis, ensuring regular and systematic data updates (Istat, 2019). The survey provides a comprehensive overview of the entire public water management cycle in Italy, including the key phases of abstraction, transport, and distribution of drinking water, as well as the collection and treatment of urban wastewater.

The reporting units are the entities responsible for managing civil-use water services. The units of analysis are both the managing entities and the facilities they operate to provide services related to: the abstraction and conveyance of drinking water, distribution of drinking water, sewer networks, and treatment of urban wastewater. The data collected undergo processes of verification, correction, and validation to detect missing or partial responses, anomalous values, and inconsistencies.

Some of the indicators produced through this survey-particularly those relating to potable water abstraction, distribution network efficiency, and characteristics of the sewer and wastewater treatment system-contribute to Goal 6 of the

ne e alle caratteristiche del sistema fognario-depurativo confluiscono nel *Goal* 6 degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (*Sustainable Development Goals*, SDGs), che compongono l'Agenda 2030 adottata dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite. Con riferimento all'approvvigionamento per uso potabile, nella valutazione degli indicatori occorre tenere in considerazione che il monitoraggio dei punti di prelievo e delle reti di adduzione e distribuzione, nonché la raccolta dei volumi movimentati e la misurazione delle variabili varia in base al modello gestionale: è meno sistematico nelle gestioni in economia (comuni o altri enti locali che gestiscono direttamente il servizio), poiché questi enti comunali spesso non dispongono degli stessi strumenti e delle stesse competenze che invece, ad oggi, sono maggiormente presenti nelle gestioni specializzate. Differenze nei modelli di calcolo e nelle informazioni di base possono influenzare i risultati e determinare variazioni nel tempo di alcuni indicatori, senza che questo sia legato necessariamente a cambiamenti reali nel servizio. I principali risultati della rilevazione sono resi disponibili sul sito dell'Istat attraverso "Statistiche report" e "Tavole di dati". Periodicamente viene anche aggiornata la banca dati Istat Data. I dati raccolti sono analizzati e pubblicati anche su volumi a carattere generale. Il livello di dettaglio territoriale disponibile per l'analisi varia in funzione dello specifico indicatore considerato. In generale, gli indicatori sono analizzati a diverse scale geografiche, tra cui il livello nazionale, regionale, di distretto idrografico (un'unità di gestione fondamentale per le risorse idriche), provinciale, di città metropolitana e per tipologia di comune. Alcuni indicatori particolarmente rilevanti sono disponibili a un livello ancora più granulare, ovvero per i comuni capoluogo di provincia e di città metropolitana, consentendo analisi più di dettaglio.

5.3 Analisi statistiche

Nel 2022, 9,14 miliardi di metri cubi di acqua sono complessivamente prelevati per uso potabile. Il prelievo è gestito da 1.492 enti: nel 79,4% dei casi si tratta di gestori in economia, prevalentemente comuni, (1.184 enti) e nel restante 20,6% di gestori specializzati (308). Calabria (262) e Sicilia (248) sono i territori con il maggior numero di operatori attivi nell'ambito del prelievo idropotabile (Istat, 2025).

Benché in numero nettamente inferiore, gli enti gestori specializzati dominano il prelievo idropotabile poiché generalmente operano su ampie aree del territorio e su fonti di approvvigionamento rilevanti: i 308 gestori specializzati hanno prelevato il 91% del totale (circa 8,3 miliardi di metri cubi), un dato in leggero incremento rispetto al 2020, a testimonianza del progressivo processo di accentramento nella gestione del servizio. I 1.184 gestori in economia sono invece responsabili del prelievo del 9% del volume totale, pari a circa 812 milioni di metri cubi, quasi interamente derivati da fonti sotterranee (sorgenti e pozzi). Nel 2022, il maggiore prelievo di acqua per uso potabile avviene nel distretto idrografico del Fiume Po (Tabella 4): 2,80 miliardi di

Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda adopted by the United Nations General Assembly.

Regarding drinking water supply, it should be noted that the monitoring of abstraction points and distribution networks, as well as the collection of volumes moved and the measurement of relevant variables, varies according to the management model: monitoring is generally less systematic in in-house management (i.e., by municipalities or other local authorities that directly manage the service), as these entities often lack the instruments and expertise more commonly found in specialized water utilities.

Differences in calculation models and baseline information may influence results and cause temporal variations in certain indicators, which may not necessarily reflect actual changes in service performance.

The main findings of the survey are made available on the Istat website through "Statistical Reports" and "Data Tables." The Istat Data database is also updated periodically. The data collected are also analyzed and published in general statistical volumes.

The territorial detail available for analysis varies depending on the specific indicator. In general, the indicators are analyzed at various geographic scales, including national, regional, river basin district (a key water management unit), provincial, metropolitan city, and municipality-type levels. Some particularly relevant indicators are available at an even more detailed level, such as provincial and metropolitan capital municipalities, allowing for more in-depth analyses.

5.3 Statistical analyses

In 2022, a total of 9,14 billion cubic meters of water were withdrawn for drinking water use. The withdrawals were managed by 1.492 entities: in 79,4% of cases these were direct-management entities, mostly municipalities (1.184 entities), while the remaining 20,6% were specialized operators (308 entities). Calabria (262) and Sicily (248) are the regions with the highest number of operators active in the drinking water sector (Istat, 2025).

Although fewer in number, specialized operators dominate drinking water withdrawals, as they generally cover extensive areas and manage major water sources. The 308 specialized operators withdrew 91% of the total volume (about 8,3 billion cubic meters), a slightly increasing figure compared to 2020, indicating a gradual centralization in service management. The 1.184 direct-management entities, on the other hand, were responsible for 9% of the total volume, amounting to approximately 812 million cubic meters, almost entirely derived from groundwater sources (springs and wells).

In 2022, the highest volume of water withdrawn for drinking purposes was recorded in the Po River Basin District (Table 4): 2,80 billion cubic

Tabella 4 - Prelievi di acqua per uso potabile per tipologia di fonte e distretto idrografico (a). Anno 2022, volumi in milioni di metri cubi e pro capite in litri per abitante al giorno.
Table 4 - Water withdrawals for public water supply by source type and river basin district (a). Year 2022, volumes in million cubic meters and per capita values in liters per inhabitant per day.

DISTRETTI IDROGRAFICI/ ***RIVER BASIN DISTRICT***	**Sorgente/** ***Spring***	**Pozzo/** ***Well***	**Acque superficiali/** ***Surface water***	**Acque marine o salmastre/** ***Marine or brackish water***	**Totale/** ***Total***	**Prelevato pro capite/*Per capita***
Fiume Po/*Po River*	570,8	1.866,2	366,3	-	2.803,3	392
Alpi orientali/*Eastern Alps*	318,2	607,4	51,5	-	977,0	418
Appennino settentrionale/*Northern Apennines*	92,8	349,0	125,9	0,8	568,6	310
Appennino centrale/*Central Apennines*	1.006,4	374,9	61,9	0,2	1.443,5	457
Appennino meridionale/ *Southern Apennines*	1.120,5	763,3	436,3	-	2.320,0	491
Sardegna/*Sardinia*	34,3	30,3	238,6	-	303,2	525
Sicilia/*Sicily*	169,0	439,3	109,6	8,9	726,8	413
ITALIA/*ITALY*	**3.311,9**	**4.430,6**	**1.390,0**	**9,9**	**9.142,4**	**424**

Fonte: Istat, Censimento delle acque per uso civile - (a) Le acque superficiali comprendono: corso d'acqua superficiale, lago naturale e bacino artificiale.
Source: Istat Urban water census - (a) Surface waters include rivers, natural lakes, and artificial reservoirs.

metri cubi (30,7% del totale nazionale), segue il distretto idrografico dell'Appennino meridionale (2,32 miliardi di metri cubi d'acqua per uso potabile, 25,4% del volume nazionale). Si conferma il consueto assetto tra le regioni, che vede la Lombardia con il volume maggiore di acqua prelevata per uso potabile (1,48 miliardi di metri cubi; 16,2% del totale nazionale). Quantitativi consistenti sono captati anche nel Lazio (1,12 miliardi di metri cubi; 12,2%) e in Campania (0,90; 9,8%). I volumi regionali pro capite, strettamente legati alla disponibilità della risorsa, presentano un *range* molto ampio: dai 110 litri per abitante al giorno della Puglia ai 2.160 del Molise. Gli scambi idrici interregionali sono presenti soprattutto nel Sud: i prelievi di Basilicata e Molise, al netto delle dispersioni in adduzione e di eventuali usi locali all'ingrosso per industria e agricoltura, confluiscono in parte nelle regioni confinanti per approvvigionare i territori in cui la disponibilità idrica locale è insufficiente.
Sebbene il 2022 sia stato l'anno più caldo e il meno piovoso dal 1961, il prelievo ad uso potabile non sembra aver subito, nel complesso, variazioni significative, nonostante a livello locale si siano, in alcuni casi, registrate importanti criticità in determinati periodi dell'anno.
I prelievi per uso potabile si riducono dello 0,5% rispetto al 2020 e del 4% rispetto al 2015. La lieve contrazione dei volumi rilevata rispetto al 2020 è piuttosto generalizzata a livello regionale, con l'eccezione di Liguria, Lombardia, Calabria e Sardegna, dove si registra un aumento della risorsa prelevata. Occorre segnalare che Liguria e Lombardia sono tra i casi più evidenti in cui il passaggio al servizio idrico integrato, avvenuto per alcuni comuni nel biennio 2021-2022, ha prodotto variazioni significative rispetto alle stime effettuate precedentemente dai gestori in economia.
L'Italia si conferma - da oltre un ventennio - al primo

meters (30,7% of the national total), followed by the Southern Apennines Basin District (2,32 billion cubic meters, 25,4% of the national volume). The usual distribution among regions was confirmed, with Lombardy accounting for the largest volume of drinking water withdrawn (1,48 billion cubic meters; 16,2% of the national total). Significant volumes were also withdrawn in Lazio (1,12 billion cubic meters; 12,2%) and Campania (0,90 billion cubic meters; 9,8%).
Per capita regional volumes-closely related to water availability-show a wide range: from 110 liters per capita per day in Apulia to 2.160 in Molise. Interregional water transfers are especially relevant in southern Italy: withdrawals in Basilicata and Molise, net of conveyance losses and potential wholesale uses for industry and agriculture, partially supply neighboring regions where local water availability is insufficient.
Although 2022 was the hottest and driest year since 1961, overall drinking water withdrawals did not show significant variations, despite notable local criticalities in some periods of the year.
Withdrawals for drinking purposes decreased by 0,5% compared to 2020 and by 4% compared to 2015. The slight decline in volumes compared to 2020 is widespread across regions, except for Liguria, Lombardy, Calabria, and Sardinia, where an increase in withdrawals was recorded. It is worth noting that Liguria and Lombardy are among the clearest cases where the transition to integrated water services-implemented in some municipalities between 2021 and 2022-led to significant variations compared to previous estimates made by direct-management operators.
For over twenty years, Italy has ranked first in the

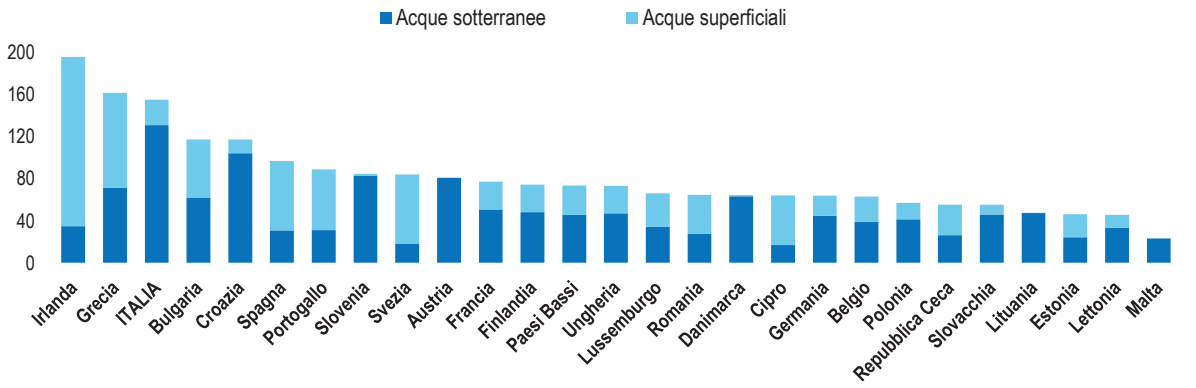


Figura 1 - Prelievi di acqua continentale per uso potabile nei Paesi Ue27 per tipologia di fonte. Anno 2022 o ultimo disponibile, in metri cubi annui per abitante - Fonte: Istat, Censimento delle acque per uso civile

Figure 1 - Freshwater withdrawals for public water supply in EU27 countries by source. Year 2022 or latest available, in cubic meters per inhabitant per year -Source: Istat, Census of water for civil use

posto nell'Unione europea per la quantità, in valore assoluto, di acqua dolce prelevata per uso potabile da corpi idrici superficiali o sotterranei (escludendo quindi i prelievi da acque marine). Tra i Paesi Ue27 dell'area mediterranea, l'Italia è tra quelli che utilizzano maggiormente acque sotterranee, prelevate da pozzi e sorgenti, per soddisfare le richieste idropotabili della popolazione. In termini pro capite, il divario tra i Paesi Ue27 è ampio e l'Italia - con 155 metri cubi annui per abitante - si colloca in terza posizione, preceduta solo da Irlanda (196) e Grecia (162), e seguita a netta distanza da Bulgaria (118) e Croazia (117). La maggior parte degli Stati membri (20 su 27) ha prelevato tra 45 e 90 metri cubi di acqua dolce per persona per l'approvvigionamento pubblico. Nella parte bassa della graduatoria si colloca la maggioranza dei Paesi dell'Europa dell'Est. Malta chiude la classifica con 24 metri cubi annui a persona (Figura 1).

Nel 2022, l'84,7% del prelievo deriva da acque sotterranee (48,5% da pozzo e 36,2% da sorgente) e il 15,2% da acque superficiali (bacino artificiale, corso d'acqua superficiale e lago naturale). A integrazione delle fonti di acqua dolce, per sopperire alle carenze idriche, una piccola parte del prelievo è derivata da acque marine o salmastre (lo 0,1% del totale), concentrata soprattutto in Sicilia per approvvigionare le isole minori, e in minima parte anche in Toscana e Lazio (Figura 2). Le fonti sotterranee sono la modalità di approvvigionamento prevalente in Italia, con quote superiori al 75% in tutti i distretti idrografici, ad eccezione della Sardegna in cui lo sfruttamento di sorgenti e pozzi è piuttosto contenuto e incide sul 21% circa del prelievo. L'uso di fonti sotterranee è preponderante nei distretti Appennino centrale e Alpi orientali, dove rappresenta oltre il 94% del prelevato. Lo sfruttamento di sorgenti a scopo idropotabile prevale nel distretto dell' Appennino centrale (70% circa del volume complessivo), seguito dal distretto dell'Appennino meridionale (48% circa). L'utilizzo di pozzi è peculiare del distretto del Fiume Po, soprattutto nell'area della Pianura Padana, che concorre al 42,1% del volume complessivamente prelevato a livello nazionale da

European Union in absolute terms of freshwater withdrawals for drinking purposes from surface and groundwater bodies (excluding withdrawals from marine waters). Among the EU27 Mediterranean countries, Italy is also among those that most heavily rely on groundwater-withdrawn from wells and springs-to meet public drinking water needs. On a per capita basis, the disparity among EU27 countries is substantial: with 155 cubic meters per capita annually, Italy ranks third, behind Ireland (196) and Greece (162), and well ahead of Bulgaria (118) and Croatia (117). Most Member States (20 out of 27) withdrew between 45 and 90 cubic meters of freshwater per person for public supply. Eastern European countries account for most of the lower range, with Malta closing the ranking at 24 cubic meters per capita annually (Figure 1).

In 2022, 84,7% of the withdrawn water derived from groundwater (48,5% from wells and 36,2% from springs), while 15,2% came from surface waters (artificial reservoirs, rivers, and natural lakes). To supplement freshwater sources and address water shortages, a small share of the total withdrawal (0,1%) came from marine or brackish water, mainly in Sicily to supply smaller islands, and to a lesser extent in Tuscany and Lazio (Figure 2).

Groundwater is the predominant source of water supply in Italy, accounting for more than 75% of withdrawals in all river basin districts, except for Sardinia, where the exploitation of springs and wells is limited to about 21% of the total volume. Groundwater use is especially predominant in the Central Apennines and Eastern Alps districts, where it accounts for over 94% of the total volume. The use of springs for drinking water is most common in the Central Apennines district (about 70% of the total volume), followed by the Southern Apennines district (about 48%). Wells are primarily used in the Po River Basin district, especially in the Po Valley, which contributes 42,1% of the national volume withdrawn from this source.

The use of surface water for drinking purposes

questo tipo di fonte. L'uso idropotabile di acque superficiali è prevalente nel distretto della Sardegna, soprattutto per i prelievi da bacino artificiale che incidono sul 78,6% del volume complessivo. Rispetto al volume prelevato, il ricorso ad acque superficiali è massimo nel distretto Appennino meridionale (oltre 436 milioni di metri cubi, pari al 31,4% del rispettivo volume nazionale). L'attività di prelievo è garantita da una rete capillare di circa 37.400 fonti di approvvigionamento, distribuite sul territorio con una media di 12 fonti ogni 100 km² (Baldoni et al., 2024). Oltre il 50% delle fonti di approvvigionamento per uso potabile è rappresentato dalle sorgenti che contribuiscono al 36,2% del prelievo totale con un volume di 3,3 miliardi di metri cubi. Più di 900 sorgenti (circa il 5% del totale) hanno portate prelevate superiori o pari ai 10 litri al secondo e forniscono 2,7 miliardi di metri cubi d'acqua per uso potabile, pari all'80% dei volumi da sorgente e al 29% del totale prelevato da tutte le fonti in uso. Tali sorgenti non sono distribuite in modo omogeneo sul territorio nazionale. Le sorgenti con prelievi superiori ai 100 litri al secondo si trovano soprattutto nei distretti idrografici dell'Appennino centrale e dell'Appennino meridionale; le Regioni Campania, Abruzzo e Lazio da sole contribuiscono al 43% del totale prelevato da sorgente. Considerando le emergenze sorgive con portate prelevate pari ad almeno 10 litri al secondo, le sorgenti con prelievi non superiori ai 50 litri al secondo rappresentano il 76% dei casi e il 16% del volume prelevato e si trovano prevalentemente nei distretti idrografici del Fiume Po e dell'Appennino meridionale. Dall'analisi in serie storica risulta che, a partire dal 2012, il prelievo dalle sorgenti con portate prelevate a scopo idropotabile pari ad almeno 10 litri al secondo è nel complesso stazionario, con la sola eccezione dell'anno 2020, in cui c'è stata una leggera flessione dei volumi prelevati, presumibilmente legata agli effetti della pandemia da Covid-19 sugli usi non domestici dell'acqua.
I dati relativi alle sorgenti captate sono disponibili nella Tabella Fuori Testo C disponibile sulla pagina web di ISPRA http://idrogeologia.isprambiente.it/.

is most prominent in Sardinia, especially from artificial reservoirs, which account for 78,6% of total withdrawals. In absolute terms, the Southern Apennines district shows the highest volume of surface water use (over 436 million cubic meters, or 31,4% of the respective national volume).
Water withdrawals are supported by a widespread network of about 37.400 water supply sources, distributed across the territory with an average of 12 sources per 100 km² (Baldoni et al., 2024). Springs represent over 50% of drinking water supply sources and contribute 36,2% of total withdrawals, corresponding to 3,3 billion cubic meters. More than 900 springs (about 5% of the total) have flow rates equal to or greater than 10 liters per second and provide 2,7 billion cubic meters of drinking water-80% of the volume from springs and 29% of the total withdrawn from all sources.
These springs are unevenly distributed across the national territory. Springs with withdrawals exceeding 100 liters per second are mainly located in the Central and Southern Apennines districts. The Campania, Abruzzo, and Lazio regions alone account for 43% of total spring withdrawals. Considering springs with flows of at least 10 liters per second, those with flow rates not exceeding 50 liters per second represent 76% of the cases and 16% of the volume withdrawn. These are mostly found in the Po River and Southern Apennines basin districts.
Historical data analysis shows that, since 2012, withdrawals from springs with flow rates equal to or greater than 10 liters per second for drinking purposes have remained broadly stable, with the only exception being 2020, when a slight decline was recorded, likely due to the impact of the COVID-19 pandemic on non-domestic water use.
The data concerning tapped springs are provided in Off-text Table C, which is available on the ISPRA website at http://idrogeologia.isprambiente.it/.

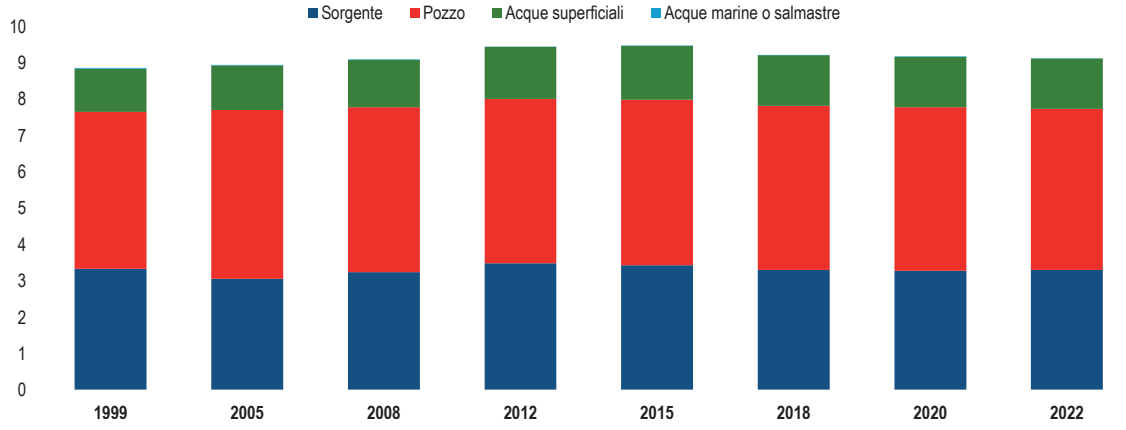


Figura 2. Prelievi di acqua per uso potabile in Italia, per tipologia di fonte (a). Anni 1999-2022, valori in miliardi di metri cubi
Fonte: Istat, Censimento delle acque per uso civile
Figure 2 - Water withdrawals for public water supply by source type in Italy (a). Years 1999-2022, values in billion cubic meters - Source: Istat, Urban water census

6. IDROGEOLOGIA DEI DISTRETTI IDROGRAFICI ITALIANI

6.1 Distretto Idrografico del Fiume Po

Moroni F., Battaglini F., Vasini C., Bertolo B.
Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po

6.1.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

Il distretto idrografico del Fiume Po, il più esteso d'Italia, copre un'area di circa 86.860 km^2 che interessa otto Regioni del nord Italia e la Provincia Autonoma di Trento, oltre che porzioni di territorio francese, svizzero e Repubblica di San Marino. Il bacino padano si è formato attraverso un processo geologico legato all'evoluzione dell'avanfossa appenninica. Ha iniziato a svilupparsi nel Pliocene medio-superiore, circa 3,5 milioni di anni fa, in seguito alla progressiva subsidenza dell'area e all'accumulo di materiali erosi dalle catene montuose circostanti. Studi condotti grazie alla prospezione petrolifera hanno evidenziato che il substrato del bacino padano è composto da strati profondi deformati, suggerendo la prosecuzione in profondità della catena appenninica. La deformazione diminuisce verso la superficie, evidenziando un rallentamento dell'attività tettonica durante il riempimento del bacino (Amorosi & Pignone, 2009). Con l'inizio del Quaternario, quando la regione alpina e gran parte della fossa padana erano ormai completamente emerse, il bacino ha iniziato ad essere colmato da un'ingente quantità di sedimenti. Il materiale alluvionale trasportato dai sistemi fluviali si è progressivamente accumulato nella vasta depressione dell'avampaese, alternandosi a depositi di origine marina derivanti dalle fasi di trasgressione. Questa alternanza sedimentaria è stata principalmente influenzata dai cicli eustatici globali, regolati dalle oscillazioni climatiche che hanno caratterizzato l'intero Quaternario. Le ripetute fasi glaciali e interglaciali hanno determinato variazioni del livello del mare e dei sistemi fluviali, influenzando in modo significativo la stratificazione del bacino e contribuendo a modellare l'attuale morfologia della Pianura Padana. Il principale asse fluviale drenante la pianura è il Fiume Po, lungo circa 652 km dal Monviso al mare Adriatico, dove sfocia con un'importante delta. Il Fiume Po ha subito diverse modifiche del suo tracciato per ragioni naturali ma anche per soddisfare esigenze antropiche, con profonde alterazioni dei processi erosivi e deposizionali originali. Le Alpi, la più importante catena montuosa italiana, cingono il bacino padano a nord e a ovest. La classificazione SOIUSA (2005) introduce una bipartizione del sistema alpino. Nelle Alpi Occidentali (dal Colle di Cadibona al Passo dello Spluga) si trovano le cime più elevate di tutto il paese, tra cui il Monte Bianco (4806 m s.l.m.). In questa porzione prevalgono le rocce granitiche. Nelle Alpi Orientali (a est dello Spluga), si incontrano invece più frequentemente anche le rocce carbonatiche (es. Prealpi lombarde, Dolomiti di Brenta). Nel contesto alpino, si trovano alcuni importanti fondivalle di origine glaciale e tettonica (es. Val di Susa, Valle d'Aosta,

6. HYDROGEOLOGY OF THE ITALIAN RIVER BASIN DISTRICTS

6.1 Po River Basin District

Moroni F., Battaglini F., Vasini C., Bertolo B.
Po River basin District Authority

6.1.1 Geological and Hydrogeological Features

The Po River Basin District, the largest in Italy, covers an area of approximately 86.860 km² and encompasses eight northern Italian regions and the Autonomous Province of Trento, as well as parts of French, Swiss, and Republic of San Marino territories. The Po Basin originated through geological processes related to the evolution of the Apennine foredeep. It began developing in the mid-to-late Pliocene, about 3,5 million years ago, due to progressive subsidence and the accumulation of sediments eroded from surrounding mountain ranges. Studies conducted during hydrocarbon exploration have revealed that the Po basin's substratum is composed of deeply deformed layers, suggesting a continuation at depth of the Apennine chain. Deformation decreases toward the surface, indicating a reduction in tectonic activity during the basin infilling phase (Amorosi & Pignone, 2009).

With the onset of the Quaternary, when the Alpine region and much of the Po foredeep had emerged, the basin began to be filled by large volumes of sediment. Alluvial material transported by river systems progressively accumulated in the broad foreland depression, alternating with marine deposits resulting from transgressive phases. This sedimentary alternation was mainly influenced by global eustatic cycles driven by the climatic oscillations that characterized the entire Quaternary. Repeated glacial and interglacial stages caused variations in sea level and river systems, significantly affecting basin stratification and shaping the current morphology of the Po Plain.

The Po River, approximately 652 km long from Monviso to the Adriatic Sea, is the main fluvial axis draining the plain, where it forms a significant delta. The river has undergone numerous changes to its course due to both natural dynamics and human interventions, which have greatly altered its original erosional and depositional processes.

The Alps, Italy's most prominent mountain range, border the Po Basin to the north and west. According to the SOIUSA classification (2005), the Alpine system is divided into two main sections. The Western Alps (from the Cadibona Pass to the Spluga Pass) host the country's highest peaks, including Mont Blanc (4806 m a.s.l.), where granitic rocks prevail. In the Eastern Alps (east of Spluga), carbonate rocks are more frequent, as seen in the Lombard Prealps and the Brenta Dolomites. Major glacial and tectonic valleys such as the Susa Valley, Aosta Valley, and Valtellina are also found in the Alpine context.

Valtellina).I ghiacciai alpini hanno lasciato tracce anche ai margini settentrionali del bacino padano, formando le colline moreniche, che circondano i principali laghi glaciali italiani (Maggiore, Como, Iseo, Idro, Garda) e lo sbocco della Dora Baltea nell'alta pianura piemontese (anfiteatro morenico di Ivrea). Questi laghi, fondamentali serbatoi idrici per il distretto, hanno inoltre influenzato i processi sedimentari. In Piemonte si trova anche il Monferrato, distaccato da altre catene orogeniche, di natura collinare e poco permeabile. Esso è attraversato dal fondovalle del fiume Tanaro, il più importante affluente di destra idrografica del Fiume Po. L'Appennino Ligure e l'Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo rappresentano il confine sud-occidentale del distretto, dal Colle di Cadibona fino allo spartiacque tra Marecchia-Conca ed il Foglia, ai limiti delle provincie di Rimini e Pesaro-Urbino. La cima più elevata è il Monte Cimone (2165 m s.l.m.). In questa catena prevalgono rocce sedimentarie (arenarie, argilliti, flysch), con presenze carbonatiche e ofiolitiche (Liguridi). Sul versante meridionale del distretto, invece, si riconoscono le conoidi appenniniche, formate della deposizione dei materiali grossolani trasportati dai fiumi emiliano-romagnoli. Questi depositi, oltre a modellare il paesaggio, rivestono un ruolo strategico per gli approvvigionamenti idrici, contribuendo alla ricarica delle falde acquifere e alla regolazione delle risorse idriche del territorio.

6.1.2 Principali acquiferi del territorio del distretto

L'intera Pianura Padana si trova sopra il bacino molassico dell'orogenesi appenninica, soggetto a subsidenza durante il Pliocene e il Quaternario. I depositi sedimentari variano in spessore e distribuzione, con spessori che aumentano verso sud e verso est, raggiungendo oltre 8000 metri nella fascia pedeappenninica orientale. La struttura geologica presenta un substrato Pre-Pliocenico di origine marina, visibile lungo i margini appenninici nelle colline del Monferrato, su cui si appoggiano depositi continentali pleistocenici e Olocenici. Questi sedimenti fluviali, fluvio-glaciali, deltizi, litoranei e di conoide costituiscono potenti acquiferi, suddivisi in macroambienti idrogeologici, caratterizzati da diverse proprietà idrodinamiche e litologiche. Come già descritto nel paragrafo precedente il bacino del Fiume Po, situato nella Pianura Padana, si suddivide morfologicamente in ambiti montuosi e pianeggianti, con caratteristiche idrogeologiche variabili. L'ambito montuoso comprende le aree alpine e appenniniche, con diversi fondivalle sedimentari, mentre l'ambito di pianura si distingue in quattro settori principali: alta pianura pedealpina, alta pianura pedeappenninica, media pianura e bassa pianura, con differenze significative nei depositi geologici e nelle caratteristiche idrogeologiche.

L'alta pianura pedealpina è caratterizzata da grandi conoidi fluvio-glaciali e fluviali, con depositi ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi ad alta permeabilità. La falda freatica qui è generalmente libera e alimenta le falde più profonde della media pianura.

L'alta pianura pedeappenninica, invece, include la

Glaciers have left marks on the northern margins of the Po Basin, forming morainic hills around major glacial lakes (Maggiore, Como, Iseo, Idro, Garda) and the outlet of the Dora Baltea in the upper Piedmont plain (Ivrea morainic amphitheater). These lakes are essential water reservoirs for the district and have influenced sedimentary processes.

In the Piedmont region, the Monferrato area is also present, geologically detached from other mountain chains. It is characterized by hilly morphology and low permeability. The area is crossed by the valley floor of the Tanaro River, the main right-bank tributary of the Po River.

The Ligurian and Northern Apennines form the southwestern boundary of the district, from the Cadibona Pass to the divide between the Marecchia-Conca and Foglia rivers, at the borders of the Rimini and Pesaro-Urbino provinces. The highest peak is Monte Cimone (2165 m a.s.l.). Sedimentary rocks (sandstones, argillites, flysch) prevail here, along with carbonate and ophiolitic rocks (Ligurid Units).

Along the southern edge of the district are the Apennine alluvial fans, composed of coarse deposits transported by rivers from Emilia-Romagna. These deposits not only shape the landscape but play a strategic role in water supply, contributing to aquifer recharge and regulating the region's water resources.

6.1.2 Main Aquifers of the District Area

The entire Po Plain lies above the molasse basin related to the Apennine orogeny, which underwent subsidence during the Pliocene and Quaternary. Sedimentary deposits vary in both thickness and distribution, increasing toward the south and east, and reaching over 8.000 meters in the eastern foothill zone of the Apennines. The geological structure features a pre-Pliocene marine substrate, visible along the Apennine margins in the Monferrato hills, overlain by Pleistocene and Holocene continental deposits. These fluvial, fluvio-glacial, deltaic, coastal, and alluvial fan sediments constitute extensive aquifers, which can be categorized into hydrogeological macro-environments with distinct lithological and hydrodynamic properties.

As described in the previous paragraph, the Po River basin, situated within the Po Plain, is morphologically divided into mountainous and lowland zones, each with different hydrogeological characteristics. The mountainous zone includes Alpine and Apennine areas with various sediment-filled valleys, while the lowland zone is further subdivided into four main sectors: the northern upper plain (pedealpine), the southern upper plain (pedeapennine), the middle plain, and the lower plain. These sectors differ significantly in terms of geological deposits and hydrogeological behavior.

The northern upper plain is characterized by large fluvio-glacial and fluvial alluvial fans, composed of highly permeable gravel and gravelly-sandy

parte terminale delle conoidi fluviali e presenta un substrato composto da ghiaie, sabbie, silt e argille. La falda freatica in questa zona è discontinua, sia longitudinalmente che trasversalmente, limitata dalla presenza di intercalazioni argillose.
La media pianura, interposta tra alta e bassa pianura, è costituita da alternanze di sedimenti grossolani e fini, derivanti dalle conoidi fluvio-glaciali alpine e fluviali appenniniche, ed è sede perlopiù di acquiferi confinati, anche in pressione.
La bassa pianura, a quote inferiori ai 50 m s.l.m., è composta da sedimenti alluvionali fini provenienti dalla valle del Po e dai suoi affluenti. Questa zona, con una superficie a forma triangolare, si estende dalla parte occidentale dalla fascia pedeappenninica fino alla line di costa adriatica. Gli acquiferi sono perlopiù confinati, e quelli sfruttabili sono generalmente più profondi e meno produttivi di quelli di alta e media pianura. Particolari strutture geologiche antiche determinano l'avvicinamento alla superficie di dorsali sepolte che condizionano l'idrochimica e un chimismo di acque salate anche a profondità non elevate.
Le falde più profonde sono presenti nei depositi alluvionali della pianura, con valori piezometrici che variano a seconda della posizione geografica. I depositi alluvionali più grossolani, come ghiaie e sabbie, sono localizzati nelle zone di alta pianura, mentre i sedimenti più fini e meno permeabili si trovano nel centro della parte orientale della pianura. Oltre agli acquiferi alluvionali, le zone montane presentano acquiferi nelle formazioni carbonatiche delle Alpi, permeabili grazie alla fratturazione e fenomeni carsici, che determinano elevate possibilità di immagazzinamento delle risorse idriche sotterranee e conseguenti elevate portate delle sorgenti (oltre diversi m^3/s) alimentando a valle anche le falde nei mezzi a porosità interstiziale (Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, 2010).

6.1.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

L'analisi del bilancio idrogeologico del bacino padano è una operazione complessa data l'estensione dell'area, l'enorme spessore di sedimenti della pianura, e la complessità geologica sia delle parti montuose che di quelle di pianura. La zona di pianura è la protagonista principale per i grandi volumi idrici in gioco, dell'ordine dei miliardi di m^3 all'anno, mentre il bilancio delle zone montane rimane importante sia a livello locale che generale in quanto nelle aree con depositi carbonatici si hanno importanti captazioni di acque sorgive. Anche i cambiamenti climatici in atto rendono molto difficile stimare i numeri attualmente in gioco, vista la necessità di un'analisi critica delle serie storiche dei dati disponibili. Le voci di bilancio prendono in considerazione: i processi e volumi di ricarica degli acquiferi, quelli di scambio tra acque sotterranee e superficiali e viceversa, ed i prelievi antropici per i diversi usi, tra cui i principali sono il potabile, l'industriale, l'irriguo. La ricarica degli acquiferi avviene principalmente tramite infiltrazione di acque meteoriche, alimentazione dalle acque irrigue e dai corsi d'acqua. Le falde dell'alta pianura sono alimentate in particolare dalle aree ai piedi

deposits. The unconfined water table in this area is typically shallow and provides recharge to deeper aquifers in the middle plain.
The southern upper plain includes the distal portions of fluvial fans and consists of gravel, sand, silt, and clay. The phreatic aquifer here is discontinuous, both longitudinally and transversely, due to the presence of interbedded clay layers.
The middle plain, situated between the upper and lower plains, is composed of alternating coarse and fine sediments derived from both Alpine and Apennine alluvial fans. This zone hosts mainly confined and artesian aquifers.
The lower plain, at elevations below 50 m a.s.l., consists of fine alluvial sediments from the Po River and its tributaries. This triangular-shaped area extends from the eastern foothills of the Apennines to the Adriatic coastline. Aquifers are generally confined, and the exploitable ones tend to be deeper and less productive than those in the upper and middle plains. Ancient geological structures influence the hydrogeological setting, with buried ridges approaching the surface and affecting groundwater chemistry, sometimes resulting in saline waters at relatively shallow depths.
The deepest aquifers are found in the alluvial deposits of the plain, with piezometric levels varying according to geographic location. Coarser deposits such as gravel and sand dominate the upper plain, while finer, less permeable sediments prevail in the central and eastern portions. In addition to the alluvial aquifers, the mountainous areas host aquifers in fractured carbonate formations of the Alps. These units, affected by fracturing and karstification, offer significant groundwater storage potential and sustain high-discharge springs (exceeding several cubic meters per second), which also contribute to recharging downstream interstitial-porosity aquifers (Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, 2010).

6.1.3 Notes on the District Water Balance

Analyzing the hydrogeological balance of the Po Basin is a complex task, due to the vast area involved, the significant thickness of plain sediments, and the geological complexity of both mountain and lowland sectors. The plain area plays a central role in terms of groundwater volumes, which are on order of billions of cubic meters per year. However, the mountain zones are also relevant at both local and regional scales, especially in carbonate rock areas where significant spring abstractions occur.
Ongoing climate change further complicates current assessments, as historical data series require critical re-evaluation. The hydrogeological budget considers aquifer recharge processes and volumes, surface-groundwater interactions, and anthropogenic withdrawals for various uses-primarily domestic, industrial, and agricultural.
Aquifer recharge mainly occurs through infiltration of meteoric water, irrigation return flows, and

delle catene montuose, dove sono presenti acquiferi di elevato interesse. In alcune aree delle parti pedealpina e pedeappenninica della pianura, la falda emerge in superficie formando risorgive, particolarmente al cambio di permeabilità tra alta e bassa pianura. I corsi d'acqua e i canali irrigui contribuiscono alla ricarica delle falde, specialmente nella pianura piemontese e lombarda, dove la rete artificiale è particolarmente sviluppata con metodi a scorrimento e sommersione. I fiumi emiliano-romagnoli sono a diretto contatto con le conoidi nella fascia pedeappenninica alimentando le acque sotterranee, mentre più a valle si ha una sparsa dispersione delle acque a causa della ridotta permeabilità dei depositi superficiali, relazionandosi con falde superficiali. Un limite convenzionale tra alta e medio-bassa pianura è costituito dall'andamento della via Emilia a cui corrisponde anche una variazione delle condizioni idrauliche delle falde (da libere a confinate-semiconfinate). Nei periodi di magra però può anche avvenire che siano le falde acquifere più superficiali ad alimentare il deflusso di base dei corsi d'acqua con scarse portate, rappresentando quindi delle uscite di acqua sotterranea dal sistema. L'intensa urbanizzazione delle aree dell'alta pianura, impermeabilizzando i suoli, concorre a ridurre la ricarica meteorica, assieme alla diversa distribuzione delle precipitazioni intra-annuale e inter-annuale dovuta al cambiamento climatico. Per quanto riguarda i prelievi antropici, le risorse idriche sotterranee del bacino padano sono da sempre intensamente sfruttate, vista la loro elevata disponibilità in pianura e relativa facilità di estrazione. Gli usi più pregiati, il potabile e l'industriale, tendono a prelevare da acquiferi confinati, mentre i prelievi irrigui tendono ad essere concentrati nei livelli acquiferi più superficiali. Il bilancio idrogeologico di un territorio così ricco di risorse ma così complesso ed antropizzato ha bisogno di conoscenze approfondite, di dati aggiornati ed omogeni su tutto il territorio, e di considerare in modo integrato il ciclo delle acque superficiali e sotterranee, essendo un unico sistema strettamente interconnesso. In quest'ottica, l'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (ADBPO) sta portando avanti il progetto MidAS-Po, finalizzato alla realizzazione di un quadro conoscitivo idrogeologico in grado di rispondere alle esigenze di pianificazione distrettuale e fornire le basi per la progettazione e realizzazione di un modello idrogeologico delle acque sotterranee. Il focus principale è sugli acquiferi porosi del distretto idrografico del fiume Po, attraverso la definizione di un modello concettuale e numerico condiviso che consenta una gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee a scala distrettuale nell'area di pianura.

6.2 Distretto Idrografico delle Alpi Orientali

Cisotto A., Dalla Libera N., Baidot A.
Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali

6.2.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche e principali acquiferi del territorio del distretto

Nell'ambito territoriale del Distretto delle alpi Orientali

interactions with surface water bodies. The aquifers of the upper plain are recharged particularly in the foothill areas of the Alps and Apennines, where high-permeability aquifers are located. In some portions of the piedmont plain, particularly at the transition between the upper and lower plain, the water table reaches the surface, forming natural springs where permeability decreases.

Rivers and irrigation canals play a significant role in aquifer recharge, especially in the Piedmont and Lombardy plains, where artificial networks employing surface irrigation methods (e.g., flooding and furrow systems) are highly developed. In the Po Plain of Emilia-Romagna, rivers directly recharge aquifers in the Apennine foothill zone via contact with alluvial fan sediments. Farther downstream, water tends to disperse due to the lower permeability of surface deposits, interacting primarily with shallow aquifers.

A conventional boundary between the upper and the middle-lower plain is marked by the route of the Via Emilia, which also corresponds to a transition in aquifer conditions-from unconfined to confined or semi-confined systems.

During low-flow periods, shallow aquifers may contribute to baseflow in rivers with low discharge, thus acting as an outflow from the groundwater system. Urbanization in the upper plain has led to extensive soil sealing, which, along with altered intra- and inter-annual precipitation patterns caused by climate change, reduces meteoric recharge.

As for anthropogenic withdrawals, groundwater resources in the Po Basin have long been intensively exploited, due to their abundance in the plains and ease of extraction. Higher-quality uses, such as drinking water and industrial applications, generally rely on confined aquifers, whereas irrigation typically draws from shallow groundwater levels.

The hydrogeological budget of such a resource-rich yet highly complex and anthropized region requires detailed knowledge, up-to-date and harmonized data across the territory, and an integrated approach to surface and groundwater systems, which are closely interconnected.

In this context, the Po River District Basin Authority (ADBPo) is implementing the MidAS-Po project, aimed at establishing a comprehensive hydrogeological knowledge base to support district-scale planning and the development of a regional-scale groundwater model. The project focuses on the porous aquifers of the Po River District, with the goal of defining a shared conceptual and numerical model to enable the sustainable management of groundwater resources throughout the plane.

6.2 Eastern Alps River Basin District

Cisotto A., Dalla Libera N., Baidot A.
Eastern Alps River Basin District Authority

6.2.1 Geological and Hydrogeological Features and Main Aquifers of the District Area

si possono distinguere due macrostrutture idrogeologiche: la regione alpina e quella della pianura veneto-friulana.
In estrema sintesi, la regione alpina può essere a sua volta suddivisa in quattro principali strutture idrogeologiche:

- Strutture delle rocce carbonatiche;
- Strutture delle rocce silicee;
- Strutture delle valli alpine;
- Strutture delle coltri eluviali e dei depositi quaternari sciolti di pendio.

Le strutture carbonatiche presentano una conducibilità idraulica principalmente dovuta a fessurazione o a carsismo e quindi si ha una durezza elevata delle acque. La serie stratigrafica sud-alpina è sorretta da un basamento cristallino a scarsissima permeabilità (aquiclude basale); all'interno della successione si possono distinguere almeno 3 strutture carbonatiche che risultano molto importanti sia per il loro notevole spessore, sia per le caratteristiche di permeabilità delle rocce serbatoio. La prima struttura è composta dalle formazioni carbonatiche dell'Anisico, la seconda struttura è composta dalla Dolomia Principale del Norico, molto fratturata e interessata da importanti fenomeni carsici, e la terza è costituita dalle formazioni che vanno dal Giurassico inferiore al Cretaceo inferiore. Particolarmente importanti sono gli acquiferi contenuti nelle aree carsiche e, tra queste, ricordiamo le aree intensamente carsificate presenti nella fascia prealpina (ad esempio Monti Lessini, Altopiano di Asiago, Altopiano del Cansiglio, etc.) e la zona del Carso classico isontino e triestino. Le strutture silicee sono sede di acquiferi generalmente meno importanti in termini di quantità e produttività rispetto a quelli carbonatici. In alcuni ambiti dove sono presenti rocce magmatiche, è possibile rilevare la presenza di Radon nel terreno e nell'acqua. Per quanto riguarda le strutture delle valli alpine, la composizione del fondovalle è generalmente caratterizzata, nella sua parte superiore, da sedimenti sciolti di tipo alluvionale che possono alternarsi, soprattutto in profondità, con sedimenti glaciali e interglaciali e le profondità dei sedimenti possono essere ragguardevoli (ad esempio 670 m dal piano campagna nella conca di Merano). Gli acquiferi di fondovalle possono presentare estensioni elevate che comprendono intere vallate, e il flusso delle acque è in gran parte lento, regolare e di ridotta pendenza. La struttura geologica del sottosuolo può determinare la presenza di acquiferi multifalda, ma anche confinati. L'acqua sotterranea di fondovalle viene prevalentemente utilizzata tramite l'emungimento da pozzi e rappresenta una delle maggiori fonti di approvvigionamento idrico specialmente per gli usi agricoli ed industriali. All'interno del gruppo delle Strutture delle coltri eluviali e dei depositi quaternari sciolti di pendio si inseriscono le aree di affioramento del substrato cristallino e delle vulcaniti e, subordinatamente, i depositi quaternari discontinui di pendio e delle alte quote che rappresentano strutture di limitata estensione, dotate in genere di modeste riserve idriche. Malgrado la loro modesta entità,

Within the territory of the Eastern Alps River Basin District, two main hydrogeological macro-structures can be distinguished: the Alpine region and the Veneto-Friuli Plain.
In brief, the Alpine region can be further subdivided into four main hydrogeological structures:

- *Structures of carbonate rocks;*
- *Structures of siliceous rocks;*
- *Structures of alpine valleys;*
- *Structures of eluvial covers and unconsolidated Quaternary slope deposits.*

The carbonate rock structures exhibit hydraulic conductivity primarily due to fracturing or karstification and are thus characterized by high water hardness. The Southern Alps stratigraphic sequence rests on a crystalline basement with very low permeability (a basal aquiclude). Within this sequence, at least three carbonate rock structures can be distinguished that are particularly significant both for their considerable thickness and the permeability characteristics of the reservoir rocks. The first structure comprises the Anisian carbonate formations; the second consists of the Norian Dolomia Principale, which is highly fractured and affected by significant karst phenomena; the third includes formations ranging from the Lower Jurassic to the Lower Cretaceous. Particularly important are the aquifers found in karst areas, including those extensively karstified in the Prealpine belt (e.g., Monti Lessini, Asiago Plateau, Cansiglio Plateau, etc.) and the classic karst areas of the Isonzo and Trieste regions.
The siliceous rock structures host aquifers that are generally less significant in terms of quantity and yield compared to the carbonate ones. In some areas where magmatic rocks are present, Radon can be detected in soil and water.
As for the structures of the alpine valleys, the valley floors are generally composed, in their upper part, of unconsolidated alluvial sediments, which may alternate, especially at depth, with glacial and interglacial deposits. These sediment thicknesses can be considerable (e.g., 670 m below ground level in the Merano basin). Valley floor aquifers can extend over entire valleys, and groundwater flow is largely slow, steady, and with a low gradient. The geological structure of the subsurface can result in the presence of both multi-layered and confined aquifers. Groundwater in valley floors is primarily exploited through well pumping and represents one of the main sources of water supply, especially for agricultural and industrial uses.
The group of eluvial covers and unconsolidated Quaternary slope deposits includes outcropping areas of the crystalline basement and volcanic rocks, and subordinately, discontinuous slope and high-altitude Quaternary deposits, which are generally limited in extent and hold modest water reserves. Despite their limited size, these structures are of considerable socio-economic importance, particularly for water supply to local

queste strutture rivestono una notevole importanza economico-sociale soprattutto ai fini dell'approvvigionamento idrico di insediamenti turistici ed agricolo-zootecnici locali, poiché rappresentano le uniche risorse disponibili alle quote più elevate. Le manifestazioni idrogeologiche principali nella Regione Alpina sono rappresentate dalle sorgenti con prevalenza di quelle alimentate da acquiferi costituiti da depositi quaternari più o meno permeabili (detrito di falda e depositi glaciali) e da calcari carsificati. Frequenti anche le sorgenti poste sui limiti di permeabilità fra rocce serbatoio e rocce impermeabili o poco permeabili. L'estrema varietà, inoltre, delle litologie nelle successioni stratigrafiche fa sì che unità idrogeologiche "minori", siano spesso contenute nei più estesi complessi idrogeologici. L'intensa tettonizzazione determina numerose possibilità di drenaggio preferenziale lungo fasce subverticali e verso le quote più basse. Nella regione della Pianura Veneto-Friuliana, l'assetto idrogeologico del sottosuolo varia sensibilmente da zona a zona in relazione alle differenti caratteristiche sedimentologico-granulometriche dei materiali, alle diverse relazioni tra corsi d'acqua e acque sotterranee, rilievi carbonatici e depositi alluvionali e, in generale, alla differente genesi e alla diversa evoluzione della sedimentazione della pianura. Per un corretto inquadramento idrogeologico risulta utile suddividere distinguendo da monte verso valle la Alta e la Bassa Pianura, con una zona di passaggio tra le due unità che è rappresentata dalla cosiddetta "fascia delle risorgive", dove si ha l'emersione di una consistente quantità di acqua.

Nell'Alta pianura lo spessore dei sedimenti saturi va aumentando verso Sud Est raggiungendo, in corrispondenza della fascia delle "risorgive", una potenza che può oltrepassare i 600 m. Il processo di alimentazione della falda freatica dell'Alta pianura dipende in maniera determinante dalle rilevanti dispersioni che si verificano lungo gli alvei ghiaiosi, soprattutto allo sbocco in pianura delle valli montane, mentre l'alimentazione diretta delle piogge riveste un ruolo meno preponderante. Inoltre, particolare importanza per l'alimentazione rivestono le pratiche irrigue (scorrimento e sommersione) e le dispersioni da parte dei canali irrigui non rivestiti. La falda freatica dell'alta pianura possiede in generale un regime analogo a quello dei corsi d'acqua, con una o due fasi di piena annuali. Le escursioni della falda durante l'anno sono molto differenti da zona a zona: dai valori più bassi riscontrabili all'estremità meridionale della pianura lungo la Fascia delle Risorgive con pochi metri di oscillazione, si passa alle decine di metri della parte centrale, fino ai 40-50 m riscontrati al limite settentrionale del conoide Cellina-Meduna a ridosso degli alvei torrentizi. I parametri relativi alla permeabilità dei depositi alluvionali contenenti la falda freatica possono variare da zona a zona, ma nel complesso il comportamento idrogeologico dei depositi si presenta in pratica omogeneo come risulta da diverse indagini e prove in situ. Per quanto riguarda la granulometria nell'Alta pianura i depositi, sia in superficie che in profondità, in genere

tourist settlements and agropastoral activities, as they often constitute the only available water resources at higher altitudes.

The main hydrogeological features in the Alpine Region are springs, most of which are fed by aquifers composed of permeable Quaternary deposits (slope debris and glacial deposits) and by karstified limestones. Springs are also frequently found at the permeability boundaries between reservoir rocks and impermeable or poorly permeable rocks. Furthermore, the great variety of lithologies in the stratigraphic sequences often results in "minor" hydrogeological units embedded within larger hydrogeological complexes. The intense tectonization creates numerous pathways for preferential drainage along subvertical zones and towards lower elevations.

In the Veneto-Friuli Plain, the hydrogeological setting of the subsurface varies significantly across the region due to the different sedimentological and granulometric characteristics of the deposits, the varying relationships between surface water and groundwater, carbonate uplands and alluvial deposits, and, more generally, the different origin and evolution of sedimentation in the Plain. For a proper hydrogeological framework, it is useful to divide the plain from north to south into the Upper and Lower Plain, with a transitional zone between them represented by the so-called "spring belt", where a significant volume of groundwater emerges.

In the Upper Plain, the thickness of the saturated sediments increases southeastward, reaching values exceeding 600 m in the spring belt. The recharge of the unconfined aquifer in the Upper Plain is largely governed by substantial infiltration losses occurring along gravel riverbeds, especially at the mountain valley outlets into the plain, while direct rainfall recharge plays a lesser role. Irrigation practices (surface irrigation and flooding) and seepage from unlined irrigation canals also contribute significantly to recharge. The unconfined aquifer in the Upper Plain generally shows a regime like that of surface water courses, with one or two flood peaks annually. The amplitude of the groundwater level fluctuations varies widely: from a few meters in the southernmost edge of the plain near the spring belt to tens of meters in the central areas and up to 40-50 m at the northern boundary of the Cellina-Meduna alluvial fan near the riverbeds.

The permeability of the alluvial deposits hosting the unconfined aquifer varies locally but overall shows consistent hydrogeological behavior, as indicated by various field tests and investigations. In terms of grain size, both surface and deep deposits in the Upper Plain generally contain over 65-70% gravel. Effective porosity values range from 8% to 20%, the latter measured in riverbed deposits. Hydraulic gradients generally range between 2 and 3 ‰, increasing near the transition between the plain and the foothills.

presentano una percentuale di ghiaia superiore al 65-70%; per quanto riguarda la porosità efficace sono stati misurati valori compresi tra l'8 e il 20%, quest'ultimo misurato sui depositi in alveo. I gradienti idraulici generalmente sono compresi tra il 2 ed il 3 ‰, con valori che aumentano in corrispondenza del raccordo fra pianura e fascia dei rilievi.
Nella Bassa pianura, spostandosi verso meridione, partendo dalla fascia delle Risorgive, l'acquifero freatico si suddivide in un complesso multifalda caratterizzato da livelli ghiaioso-sabbiosi variamente intercalati a depositi argillosi sempre più frequenti e più potenti. A cavallo della fascia si hanno quindi una modesta falda freatica superficiale e alcune falde confinate, collegate verso monte con l'acquifero freatico. A valle della fascia, la falda freatica non è più presente con continuità, non essendoci depositi sufficientemente permeabili negli strati superficiali. Tutta questa zona è così caratterizzata dalla presenza di sistemi multifalda artesiani che subiscono una generale diminuzione di potenza e di permeabilità procedendo da nord verso sud e da est verso ovest. In quest'ultima zona, non si hanno molti dati sui valori di permeabilità degli acquiferi: risulta da prove di laboratorio che quelli francamente sabbiosi hanno una conducibilità idraulica di $1x10^{-5}$ - $1x10^{-6}$ m/s, di 2-3 ordini di grandezza inferiori a quelli dei livelli prettamente ghiaiosi. Misure di permeabilità effettuate su alcuni campioni argilloso-limosi prelevati in profondità hanno evidenziato valori di conducibilità idraulica $1x10^{-10}$ - $1x10^{-11}$ m/s che definiscono la loro quasi impermeabilità dei litotipi.

6.2.2 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

La qualità delle acque presenti nei depositi alluvionali di pianura è generalmente buona e infatti la maggior parte dei prelievi acquedottistici per soddisfare i bisogni idro-potabili del Veneto e del Friuli-Venezia Giulia avvengono attraverso pozzi che estraggono sia dall'alta che dalla medio-bassa pianura. L'industrializzazione del dopoguerra ha poi spinto ad utilizzare massicciamente l'acqua del sottosuolo per le più svariate applicazioni. Attualmente i principali usi della risorsa sotterranea, a parte quello per il consumo umano, sono per l'utilizzo agricolo, industriale e tutta una serie di utilizzi diversi che hanno comportato l'apertura di diverse migliaia di pozzi che pescano dagli acquiferi alluvionali. Inoltre, ancora oggi soprattutto nella media e bassa pianura esistono migliaia di nuclei abitativi non allacciati all'acquedotto che utilizzano un pozzo domestico (non soggetto a concessione) per il rifornimento giornaliero di acqua. Per la definizione del bilancio idrico, l'Autorità di bacino distrettuale delle Alpi Orientali ha attivato una serie di iniziative atte a produrre prossimamente gli strumenti conoscitivi necessari a supportare la corretta stima del bilancio. Attualmente sono state effettuate da parte di alcune amministrazioni delle iniziative che hanno interessato parti del territorio distrettuale, nelle quali sono state calcolati dei bilanci idrologici e idrogeologici. A titolo di esempio si riporta in Tabella 5 le voci principali calcolate per il bilancio idrico delle risorse sotterranee della pianura del Friuli-Venezia Giulia.

In the Lower Plain, moving southward from the spring belt, the unconfined aquifer becomes a multilayered system characterized by gravelly-sandy layers interbedded with increasingly frequent and thicker clay deposits. Across the spring belt, there exists a shallow unconfined aquifer and several confined aquifers hydraulically connected upstream with the unconfined aquifer. South of the spring belt, the unconfined aquifer is no longer continuous due to the lack of sufficiently permeable surface deposits. This entire area is therefore characterized by artesian multilayer systems, with a general decrease in thickness and permeability from north to south and east to west.
In the latter area, permeability data are limited: laboratory tests show that clearly sandy layers have a hydraulic conductivity of $1x10^{-5}$ - $1x10^{-6}$ m/s, which is 2-3 orders of magnitude lower than the conductivity of predominantly gravel layers. Permeability measurements on deep clayey-silty samples have shown hydraulic conductivities of $1x10^{-10}$ - $1x10^{-11}$ m/s, indicating the near-impermeability of these lithotypes.

6.2.2 Notes on the District Water Balance

The water quality of the alluvial plain aquifers is generally good. Consequently, most of the public water supply withdrawals for the Veneto and Friuli Venezia Giulia regions come from wells tapping both the upper and the central-lower plains. The post-war industrialization period led to extensive exploitation of groundwater for a wide range of applications. Currently, aside from domestic use, the main uses of groundwater include agricultural and industrial purposes, along with a variety of other applications, which has led to the construction of several thousand wells tapping the alluvial aquifers. Furthermore, in the central and lower plains, there are still thousands of households not connected to the public water supply network, relying instead on private domestic wells (not subject to licensing) for daily water needs.
To assess the water balance, the Eastern Alps River Basin District Authority has launched a series of initiatives aimed at developing the necessary knowledge tools to support a proper estimation of the water balance in the near future. Some local administrations have already carried out initiatives in parts of the district, where hydrological and hydrogeological balances have been calculated. Table 5 presents an example with the main components of the water balance for the groundwater resources of the Friuli Venezia Giulia Plain.

6.3 Northern Apennines River Basin District

Consumi F.
Northern Apennines River Basin District Authority

6.3.1 Geological and Hydrogeological Features

The Northern Apennines River Basin District

Tabella 5 - Voci principali del bilancio idrico delle risorse sotterranee nella Pianura del Friuli-Venezia Giulia
Table 5 - Main components of the groundwater balance in the Friuli Venezia Giulia Plain

Voce bilancio/*Balance component*	**m^3/anno - *m^3/year***
Input da precipitazione efficace/*from effective precipitation*	$1{,}5736464 \times 10^9$
Input da dispersione fluviale/*from river seepage*	$4{,}115448 \times 10^9$
Input da infiltrazione irrigua/*from irrigation infiltration*	$4{,}856544 \times 10^8$
Output attraverso le risorgive/*through spring discharge*	$4{,}2321312 \times 10^9$
Output per prelievo da pozzi/*from well abstraction*	$1{,}8700848 \times 10^9$

6.3 Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale

Consumi F.
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale

6.3.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

Il Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale occupa una superficie di c.a. 24.300 km^2 e si colloca, geograficamente, nel sistema delle Catene alpine del Mediterraneo centrale. Comprende al suo interno, bacini idrografici con caratteristiche fisiografiche, geologiche e morfologiche diversificate e, come corpi ricettori finali distinti, il Mar Ligure e il Mar Tirreno. Il livello di complessità dei sistemi idrici, derivante dagli aspetti morfometrici e climatici, è assai elevato: il distretto è composto da una sommatoria di bacini idrografici limitrofi, in generale simili come caratteristiche ma ognuno con la propria peculiarità che possono anche comportare la necessità di una diversa gestione. Si tratta di quasi trenta bacini significativi con recapito diretto a mare e con dimensioni assai variabili, comprese tra 11 km^2 (bacino del torrente Chiaravagna in Liguria) e 9.149 km^2 (Fiume Arno in Toscana). In Liguria sono presenti due sistemi orogenici a vergenza opposta corrispondenti al dominio alpino, nella parte occidentale e a quello appenninico nella porzione orientale. Questi due domini sono separati da una zona fortemente tettonizzata che tradizionalmente viene posta in corrispondenza della linea Sestri-Voltaggio. Le Alpi Marittime, ubicate a ovest di questa discontinuità tettonica, sono composte principalmente da unità di crosta oceanica e di mantello (Gruppo di Voltri) a vario grado metamorfico, a cui sono associate rocce del margine continentale europeo, come graniti e gneiss, e delle loro coperture sedimentarie, con simile evoluzione metamorfica. Il dominio appenninico, ubicato nella porzione orientale della Regione, risulta invece prevalentemente caratterizzato dalla presenza di flysch a composizione calcarea (Flysch ad elmintoidi) e subordinatamente arenacei con metamorfismo scarso o assente. Al di sopra di queste unità tettoniche si trovano, in discordanza, i depositi del bacino terziario piemontese e quindi i sedimenti marini del Pliocene. La costa ligure è dominata da un sistema di terrazzi marini, legati principalmente alle oscillazioni eustatiche quaternarie e al lento sollevamento subito dall'area costiera. Le vallate interne sono spesso caratterizzate da sedimenti di origine alluvionale e fluviale, che si sono accumulati principalmente nei periodi di

covers an area of approximately 24.300 km² and is geographically located within the chain system of the central Mediterranean Alps. It includes river basins with diverse physiographic, geological, and morphological features, draining into two distinct terminal recipients: the Ligurian Sea and the Tyrrhenian Sea. The complexity of the hydrological systems, stemming from morphometric and climatic factors, is particularly high. The district is composed of a series of adjacent river basins, generally similar in their characteristics but each with its own peculiarities, which require different management strategies. Nearly thirty significant river basins flow directly into the sea, ranging in size from 11 km² (the Chiaravagna stream basin in Liguria) to 9.149 km² (the Arno River basin in Tuscany).

In Liguria, two orogenic systems with opposing vergence are present: the Alpine domain in the western part and the Apennine domain in the eastern portion. These domains are separated by a highly tectonized zone, traditionally associated with the Sestri-Voltaggio Line. The Maritime Alps, located west of this tectonic discontinuity, consist primarily of oceanic crust and mantle units (Voltri Group) at various stages of metamorphism, associated with rocks from the European continental margin such as granites and gneisses, and their sedimentary covers, which share similar metamorphic evolution. The Apennine domain, located in the eastern part of the region, is mainly characterized by limestone-rich flysch formations (Helminthoid Flysch), with minor arenaceous components and minimal or absent metamorphism. Overlying these tectonic units are the discordant deposits of the Tertiary Piedmont Basin, followed by Pliocene marine sediments.

The Ligurian coast is shaped by a system of marine terraces, primarily associated with Quaternary eustatic oscillations and the slow uplift of the coastal area. Inland valleys often contain fluvial and alluvial sediments, mostly deposited during periods of increased erosion driven by the isostatic uplift of the orogenic chain. Liguria also exhibits significant geothermal activity, with thermal springs particularly common in the hilly areas. In summary, the geology of Liguria is dominated by metamorphic rocks of various grades and compositions, crystalline rocks, and a wide range of sediments derived from mountain erosion, all strongly influenced by marine

maggiore erosione determinati dal sollevamento isostatico della catena orogenica. Inoltre, la Liguria presenta una notevole attività geotermica, con sorgenti termali, soprattutto nelle zone collinari. In sintesi, la geologia della Liguria è dominata da rocce metamorfiche di vario grado e composizione, rocce cristalline e una ricca varietà di sedimenti derivati dall'erosione delle catene montuose, il tutto elaborato dalla forte influenza dell'attività marina e fluviale. Anche il territorio toscano del Distretto presenta una variegata successione di rocce sedimentarie, metamorfiche e ignee, riflettendo una lunga storia geologica. Nella parte settentrionale, dove prevalgono i bacini sedimentari tardo-orogenici e post-orogenici, si trovano formazioni sedimentarie risalenti al Miocene, come argille, sabbie e marne, a cui seguono i sedimenti neoautoctoni marini e continentali Plio-quaternari. Le aree collinari-montuose, come le Alpi Apuane, i Monti Pisani e la dorsale medio toscana, sono caratterizzate dalla presenza di rocce metamorfiche in facies di scisti verdi che vanno dal paleozoico al miocene inferiore (serie toscana), rocce non metamorfiche o anchimetamorfiche di natura prevalentemente calcarea e silicoclastica del trias superiore-miocene inferiore (falda toscana) e flysch calcareo-marnosi e arenacei del cretaceo superiore-eocene (falde liguri) associati ad unità di crosta oceanica giurassica (ofioliti) e alle relative coperture sedimentarie. L'attività vulcanica passata è testimoniata dal Monte Amiata, un vulcano estinto che presenta affioramenti di rocce ignee; in Toscana meridionale questa residua attività vulcanica ha fatto sviluppare un geotermalismo molto importante.

6.3.2 Principali acquiferi del territorio del distretto

Questa estrema complessità, sia geologica che idrografica, contribuisce alla formazione di un grande numero di corpi idrici sotterranei. Sono stati individuati 129 corpi idrici sotterranei che si distinguono fra quelli appartenenti a formazioni rocciose (56) e quelli appartenenti a mezzi porosi (73). La gran parte del territorio distrettuale è interessata da corpi idrici sotterranei, il più esteso dei quali è quello delle "Arenarie di Avanfossa della Toscana nordorientale - zona dorsale appenninica", con i suoi 3.892 Km^2, mentre il meno esteso risulta quello alluvionale del "Sori" in Liguria, con 0,21 Km^2. L'utilizzo dei corpi idrici sotterranei come fonte di approvvigionamento idrico riveste notevole importanza, basti pensare che i due terzi dei prelievi totali di acqua avviene da acque sotterrane, sia per l'utilizzo potabile che per gli altri usi, in particolare agricolo ma anche industriale, concentrato per quest'ultimo in specifici distretti, quali quello della carta (Lucca), del tessile (Prato), e del cuoio (Santa Croce sull'Arno). I sistemi acquiferi delle pianure alluvionali sono quelli generalmente più sfruttati e costituiti dall'acquifero di pianura, dalle conoidi alluvionali e dalle piane alluvionali peri-tirreniche appenniniche e sono caratterizzati da un assetto multistrato in cui la circolazione idrica è condizionata dalle relazioni con il reticolo fluviale, dall'infiltrazione delle precipitazioni e

and fluvial processes.
The Tuscan portion of the district also displays a varied succession of sedimentary, metamorphic, and igneous rocks, reflecting a long and complex geological history. In the northern part, where post-orogenic and late-orogenic sedimentary basins prevail, Miocene formations are widespread, including clays, sands, and marls, followed by Plio-Quaternary neoautochthonous marine and continental sediments. The hilly and mountainous areas, such as the Apuan Alps, the Monti Pisani, and the central Tuscan ridge, are characterized by metamorphic rocks in greenschist facies ranging from the Paleozoic to the Early Miocene (Tuscan series), unmetamorphosed or weakly metamorphosed calcareous and siliciclastic rocks of Upper Triassic to Early Miocene age (Tuscan nappe), and calcareous-marly and arenaceous flysch of Upper Cretaceous to Eocene age (Ligurian nappes), associated with Jurassic oceanic crust units (ophiolites) and their sedimentary covers.
Past volcanic activity is evidenced by Monte Amiata, an extinct volcano with outcrops of igneous rocks. In southern Tuscany, residual volcanic activity has given rise to significant geothermal systems.

6.3.2 Main Aquifers in the District Area

This geological and hydrographic complexity contributes to the formation of many groundwater bodies. A total of 129 groundwater bodies have been identified, comprising both bedrock aquifers (56) and porous media aquifers (73). Most of the district is underlain by groundwater bodies. The largest of these is the "Arenarie di Avanfossa della Toscana nordorientale - zona dorsale appenninica," covering 3.892 km², while the smallest is the alluvial aquifer of the "Sori" stream in Liguria, covering just 0,21 km².
The use of groundwater bodies as a source of water supply is highly significant: about two-thirds of total water withdrawals originate from groundwater, for both drinking and other uses, particularly agriculture and, to a lesser extent, industry, concentrated in specific industrial districts such as paper (Lucca), textiles (Prato), and leather (Santa Croce sull'Arno). The aquifer systems of the alluvial plains are generally the most exploited. They include plain aquifers, alluvial fans, and peri-Tyrrhenian Apennine alluvial plains, and are characterized by multilayered structures where groundwater circulation is influenced by interactions with the river network, precipitation infiltration, and subsurface inflows from mountainous and foothill systems. Examples include the aquifers of the Florence-Prato-Pistoia plain, the Lucca plain, and the Arno Valley, which comprise highly transmissive aquifers. Recharge of alluvial aquifers largely results from interaction with surface water: in many cases, induced recharge from under-riverbed withdrawals is the main source of recharge, making the abstraction sustainable-such as in the well fields of the Arno and Serchio

dagli apporti sotterranei provenienti dai sistemi montani e pedemontani. Esempi in tal senso sono i corpi idrici della piana Firenze Prato Pistoia, della pianura di Lucca e della valle dell'Arno, che comprendono acquiferi molto trasmissivi. L'alimentazione delle falde alluvionali trae un notevole apporto dall'interazione con il reticolo superficiale: in molti casi l'alimentazione indotta dai prelievi di subalveo è il maggiore termine di ricarica e consente la sostenibilità del prelievo, ad esempio nei campi pozzi nei subalvei dei Fiumi Arno e Serchio; in altri casi i prelievi possono determinare abbassamenti di livello nei fiumi, in particolare nel periodo estivo, tipicamente e naturalmente critico per il reticolo superficiale, compromettendo anche il deflusso minimo vitale ad uso ambientale. Molti degli acquiferi porosi sono costieri, per lo più caratterizzati da alternanze di depositi di origine alluvionale e marina a granulometria variabile e a carattere multistrato. Il livello piezometrico è in genere prossimo al piano campagna e molto vicino al livello del mare che ne condiziona la quota piezometrica. La qualità delle acque è principalmente legata al processo di intrusione marina che può avvenire sia per avanzamento del cuneo salino nel sottosuolo sia per risalita dell'acqua di mare lungo gli alvei dei corsi d'acqua e successiva infiltrazione nell'acquifero. Tali processi, limitano lo sfruttamento delle acque. Rivestono una particolare rilevanza i sistemi idrici montani e pedemontani che riguardano la porzione appenninica del territorio del distretto (Arenarie di avanfossa); i complessi carbonatici metamorfici e non metamorfici delle Alpi Apuane con le loro sorgenti ed il complesso vulcanico dell'Amiata anch'esso sede di numerose e importanti sorgenti captate ad uso idropotabile. Infatti, lo sfruttamento delle maggiori sorgenti ad uso idropotabile è rilevante per alcune aree del Distretto: fra queste quelle delle Alpi Apuane con portate maggiori di 50 L/s sono fra le più importanti insieme alla sorgente dell'Ermicciolo del complesso vulcanico del Monte Amiata. Una particolare importanza rivestono anche le sorgenti idrotermali di cui la Toscana meridionale è ricca. Le falde nei depositi alluvionali dei bacini liguri sono tutte di subalveo nelle quali il rapporto con le portate del reticolo è un termine rilevante del bilancio idrico. Fra queste l'acquifero del Fiume Roia, è l'unico del Distretto ad essere alimentato da un bacino alpino. Questo corpo idrico, sede di trasmissivi orizzonti di ghiaie, ha subito dal 2020 una anomala discesa dei livelli piezometrici a causa di una riduzione di permeabilità imputabile al trasporto di materiale fine del fiume, conseguente ad un forte evento alluvionale, che ha intasato il subalveo.

6.3.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

A scala di distretto nel periodo 2013-2023 le precipitazioni annue sono state mediamente 1067 mm totali, che corrispondono ad un volume di circa 25000 Mm^3 di acqua, di cui più della metà esce dal sistema per evapotraspirazione (Braca G. et al., 2024). La quantità di risorsa che si infiltra nel sottosuolo può essere valutata in circa 200 mm nell'anno medio, corrispon-

rivers. In other cases, withdrawals may cause river level reductions, especially in summer, a season that is naturally critical for surface water, thereby affecting environmental flow requirements.

Many porous aquifers are coastal, typically formed by alternating alluvial and marine deposits with variable grain size and multilayered structures. The piezometric level is usually close to the land surface and very near sea level, which influences its elevation. Water quality is mainly affected by seawater intrusion, which may occur through saltwater wedge advancement in the subsurface or by seawater rising along riverbeds and subsequently infiltrating the aquifer. These processes limit the potential use of groundwater.

Particular attention is warranted for the mountainous and foothill hydrogeological systems, such as the Arenarie di Avanfossa in the Apennine sector, the metamorphic and non-metamorphic carbonate complexes of the Apuan Alps with their springs, and the volcanic complex of Monte Amiata, which also hosts numerous significant springs used for drinking water supply. The exploitation of major springs for potable use is significant in some areas of the district. Among the most important are those of the Apuan Alps, with flows exceeding 50 L/s, and the Ermicciolo spring on the Monte Amiata volcanic complex. Also of notable importance are the hydrothermal springs, which are abundant in southern Tuscany.

The aquifers in the alluvial deposits of the Ligurian basins are all under-riverbed systems, in which the interaction with river discharges plays a key role in the water balance. Among these, the Roia River aquifer is the only one in the district fed by an Alpine catchment. This aquifer, composed of highly transmissive gravel layers, has experienced an anomalous drop in piezometric levels since 2020 due to reduced permeability caused by the deposition of fine materials transported by the river after a major flood event, which clogged the riverbed.

6.3.3 Notes on the District Water Balance

At the district scale, during the period 2013-2023, average annual precipitation was around 1.067 mm, corresponding to a total volume of approximately 25.000 Mm^3 of water, more than half of which is lost through evapotranspiration (Braca G. et al., 2024). The volume of water infiltrating into the subsurface is estimated at about 200 mm per average year, equating to around 5.000 Mm^3.

This water availability is only apparent, as other components of the water balance-such as discharge to the sea, drainage to rivers, or exchanges with adjacent aquifers-are not quantified. Moreover, these estimates apply at the annual average scale, whereas critical conditions typically occur during the summer. For water resource management purposes, more spatially and temporally detailed assessments are required. Accordingly, in addition

dente a circa 5000 Mm^3. La disponibilità idrica è apparente in quanto manca una quantificazione di altre voci di bilancio che influiscono sui valori complessivi quali lo scarico a mare, il drenaggio verso i fiumi o altri acquiferi adiacenti. Inoltre, queste valutazioni sono corrette alla scala media annuale, mentre le criticità si riscontrano per lo più nella stagione estiva. Ai fini della gestione della risorsa occorrono valutazioni a scala spaziale e temporale più di dettaglio, quindi, oltre alle valutazioni complessive, sono stati effettuati bilanci idrogeologici, attraverso l'implementazione dei modelli numerici di flusso, per i corpi idrici più rilevanti o più critici e di questi sono state valutate le disponibilità idriche, sostenibili o meno al prelievo. Fra questi il corpo idrico della Pianura di Empoli e di Prato e la costa livornese e della Versilia.

6.4 Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale

Ruisi M.
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale

6.4.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

Il distretto dell'Appennino centrale si estende su una superficie di 42.275 km^2 a cavallo tra il Mar Tirreno e il Mar Adriatico e interessa il territorio delle regioni Abruzzo, Emilia-Romagna, Lazio, Marche, Molise, Toscana e Umbria.

L'assetto geologico del distretto è il risultato del processo di evoluzione della catena Appenninica, durante il quale gli sforzi compressivi sono migrati dai settori occidentali peritirrenici verso quelli orientali dell'area adriatica. Le fasi compressive sono state accompagnate e poi seguite, a partire dal Miocene superiore, da una tettonica distensiva, anch'essa in migrazione da ovest verso est e non ancora ultimata. La migrazione ha portato allo sviluppo di sistemi di faglie normali neogenico-quaternarie che hanno dislocato le strutture della catena e generato depressioni tettoniche, anche intramontane, in cui si sono deposte successioni sedimentarie da marine a continentali. La dorsale Appenninica è prevalentemente costituita da successioni carbonatiche marine meso-cenozoiche, tipiche di ambienti di deposizione riconducibili al dominio di piattaforma carbonatica (Lazio-Abruzzo), caratterizzato da successioni calcaree e calcareo dolomitiche, al dominio pelagico (Umbria e Marche) con alternanze di rocce calcareo-silico-marnose, e al dominio di transizione interposto con caratteristiche intermedie. Le grandi unità sopra descritte sono state raggiunte e ricoperte da abbondanti apporti silicoclastici torbiditici di età tra l'Oligocene superiore e il Pliocene inferiore. I depositi più recenti ed esterni colmano una marcata avanfossa, ancora ben distinguibile nel tratto marchigiano-abruzzese. L'intera catena è caratterizzata da accavallamenti e falde sovrapposte con vergenza orientale e nord-orientale. Alla tettonica distensiva plio-pleistocenica, prevalentemente sul versante Tirrenico della catena, è legata la formazione delle estese depressioni interne alla dorsale appenninica, e l'impostazione di una serie di apparati vulcanici sul versante Tirrenico. Il vulca-

to overall evaluations, hydrogeological budgets have been developed using numerical flow models for the most relevant or critical groundwater bodies. These include assessments of available water resources and the sustainability of withdrawals, with particular focus on areas such as the Empoli and Prato plain, the Livorno coast, and Versilia.

6.4 Central Apennines River Basin District

Ruisi M.
Central Apennines River Basin District Authority

6.4.1 Geological and Hydrogeological Features

The Central Apennine River Basin District covers an area of 42.275 km² between the Tyrrhenian and Adriatic seas, including parts of the regions of Abruzzo, Emilia-Romagna, Lazio, Marche, Molise, Tuscany, and Umbria.

The geological setting of the district results from the evolutionary processes of the Apennine chain, during which compressive stresses migrated from the peri-Tyrrhenian western sectors towards the eastern Adriatic sectors. These compressive phases, beginning in the Late Miocene, were accompanied and then followed by extensional tectonics, also migrating from west to east and still ongoing. This migration led to the development of Neogene-Quaternary normal fault systems, which displaced the chain structures and created tectonic depressions, including intramontane basins, where marine to continental sedimentary sequences accumulated.

The Apennine ridge is mainly composed of Mesozoic to Cenozoic marine carbonate sequences, typical of depositional environments associated with the carbonate platform domain (Lazio-Abruzzo), characterized by limestone and dolomitic-limestone successions; the pelagic domain (Umbria and Marche), with alternations of calcareous, siliceous, and marly rocks; and an intermediate transitional domain. These major units were later overlain by abundant siliciclastic turbidite deposits dating from the Late Oligocene to Early Pliocene. The younger, outermost deposits fill a pronounced foredeep, still clearly visible in the Marche-Abruzzo sector.

The entire chain is characterized by thrusts and overlapping nappes with eastward and northeastward vergence. The Plio-Pleistocene extensional tectonics, mainly along the Tyrrhenian side of the chain, led to the formation of extensive intramontane depressions within the Apennine ridge and the emplacement of a series of volcanic complexes on the Tyrrhenian flank. Volcanic activity developed in a NW-SE direction, with progressively younger ages from north to south. The collapse of the volcanic edifices, caused by the emptying of magma chambers and associated with peri-Tyrrhenian extensional tectonics, produced wide depressions, often occupied by lakes (Bolsena, Vico, Bracciano, Albano, and Nemi).

The geological and tectonic framework strongly

nismo si è sviluppato in direzione NW-SE con età decrescente da Nord verso Sud. Lo svuotamento delle camere magmatiche, associato alla tettonica distensiva peritirrenica, ha prodotto il collasso delle sommità degli apparati e la formazione di vaste depressioni, spesso colmate da laghi (Bolsena, Vico, Bracciano, Albano e Nemi).
L'assetto geologico e tettonico condiziona fortemente le caratteristiche idrogeologiche del distretto.
Le dorsali carbonatiche, che occupano tutta la porzione centromeridionale del distretto (serie di bacino nel settore umbro-marchigiano e depositi di piattaforma carbonatica nel settore laziale-abruzzese), svolgono il ruolo di importanti serbatoi di acque sotterranee utilizzate prevalentemente per il consumo umano. Le idrostrutture carbonatiche sono chiuse da limiti prevalentemente tettonici con andamento appenninico e antiappennico. Di particolare importanza è il motivo tettonico compressivo noto come "linea Olevano-Antrodoco-Monti Sibillini" che condiziona l'assetto strutturale dell'intera Italia centrale, portando i depositi di ambiente pelagico e i depositi di transizione, interessati da movimenti traslativi con marcata vergenza orientale, ad accavallarsi sui depositi di piattaforma costituendo un netto limite di permeabilità.

6.4.2 Principali acquiferi del territorio del distretto

Gli acquiferi più rilevanti, sia dal punto di vista quantitativo che dal punto di vista qualitativo, sono contenuti nelle dorsali carbonatiche. Le importanti risorse immagazzinate nelle idrostrutture vanno a sostenere, attraverso sorgenti lineari e puntuali, il flusso di base dei principali corsi d'acqua. In tale contesto le sorgenti lineari costituiscono circa l'80% delle portate emergenti dall'intera struttura carbonatica (Boni et alii 1986).
Estesi acquiferi sono, inoltre, contenuti nelle dorsali montuose di piattaforma carbonatica appenninica laziale-abruzzese caratterizzata da permeabilità molto elevata per fessurazione e carsismo. Questi acquiferi alimentano sorgenti basali di notevole portata, ubicate nelle zone più depresse, dove l'acquifero è tamponato da sedimenti a permeabilità più bassa, costituiti dai depositi terrigeni flyschoidi tardo-miocenici o dai sedimenti plio-quaternari di riempimento delle valli fluviali e delle depressioni tettoniche intramontane. Tra le emergenze alimentate dai settori carbonatici di piattaforma laziale-abruzzese troviamo sorgenti con portata di oltre 30 m^3/s.
Il dominio vulcanico tosco-laziale ospita acquiferi multistrato fra loro idraulicamente interconnessi, con circolazione idrica diffusa nelle piroclastiti più o meno coerenti, nelle colate piroclastiche e laviche, prodotte sia dall'attività centrale che periferica. L'ampia coltre vulcanica può raggiungere spessori superiori a 1000 m e ricopre un substrato sedimentario, localmente affiorante o sub-affiorante, riferibile a diversi cicli deposizionali (successione carbonatica mesozoica basale, complesso alloctono flyschoide, sedimenti neo-autoctoni neogenici in facies prevalentemente marina, sedimenti in facies continentale del Pleistocene medio-superiore) (Capelli et al., 2005). Gli acquiferi sono

controls the hydrogeological features of the district. The carbonate ridges, which cover the entire central-southern portion of the district (basinal series in the Umbria-Marche sector and carbonate platform deposits in the Lazio-Abruzzo sector), act as major groundwater reservoirs, primarily used for human consumption. These carbonate hydrostructures are bounded by predominantly tectonic limits aligned along and across the Apennine trend. Particularly significant is the compressive tectonic structure known as the "Olevano-Antrodoco-Monti Sibillini line," which controls the structural setting of central Italy by thrusting pelagic and transitional deposits-with a pronounced eastward vergence-over the platform deposits, thus forming a distinct permeability boundary.

6.4.2 Main Aquifers in the District Area

The most important aquifers, both in terms of quantity and quality, are hosted within the carbonate ridges. The substantial resources stored in these hydrostructures sustain the baseflow of the main watercourses through linear and point springs. In this context, linear springs account for approximately 80% of the total discharge from the carbonate structures (Boni et al., 1986).
Extensive aquifers also occur in the Lazio-Abruzzo carbonate platform ridges, which exhibit high permeability due to fracturing and karstification. These aquifers feed high-yield basal springs, located in the lower areas where the aquifer is confined by lower-permeability sediments, either late Miocene flysch-like terrigenous deposits or Plio-Quaternary sediments filling river valleys and intramontane depressions. Among the springs fed by the Lazio-Abruzzo carbonate platform aquifers, some have flow rates exceeding 30 m^3/s.
The Tuscan-Latium volcanic domain hosts multilayer aquifers that are hydraulically interconnected, with widespread water circulation in the pyroclastic deposits, pyroclastic flows, and lava flows derived from both central and peripheral volcanic activity. The extensive volcanic cover can exceed 1000 meters in thickness and overlies a sedimentary substratum, which can be locally exposed or sub-outcropping, and includes various depositional cycles (Mesozoic carbonate succession, allochthonous flysch complexes, Neogene marine sedimentary sequences, and Middle-Upper Pleistocene continental sediments) (Capelli et al., 2005). These aquifers are underlain by low-permeability pre-volcanic sediments.
The groundwater circulation is organized into distinct, hydraulically defined hydrogeological systems, each corresponding to a specific volcanic district (Vulsini, Cimini-Vicano, Sabatini, and Alban Hills). Each volcanic district has its own internal groundwater flow regime, which only locally connects with neighboring districts through limited hydraulic interactions. In the Latium volcanic domain, the most important springs are linear

sostenuti alla base dal substrato a bassa permeabilità dei depositi sedimentari pre-vulcanici. La circolazione idrica sotterranea è caratterizzata da una suddivisione in sistemi idrogeologici idraulicamente definiti, corrispondenti a ciascun distretto vulcanico (vulsino, cimino - vicano, sabatino e albano). Ogni distretto vulcanico, quindi, è caratterizzato da una propria circolazione idrica sotterranea che solo localmente presenta limitate e circoscritte situazioni di interconnessioni idrauliche con distretti limitrofi. Nel dominio vulcanico laziale, le sorgenti più importanti sono quelle di tipo lineare, presenti nei corsi d'acqua che scorrono lungo i versanti degli edifici vulcanici. Queste sorgenti si manifestano negli alvei la cui profondità di incisione raggiunge la quota di saturazione della falda. Le discontinuità tettoniche, che interrompono la continuità del substrato a bassa permeabilità, possono favorire la miscelazione delle acque della falda regionale con i circuiti idrotermali profondi, determinando locali situazioni di termalismo e mineralizzazione delle acque sotterranee. In corrispondenza dei centri di emissione, quando sono presenti specchi lacustri, l'assenza del substrato a bassa permeabilità può favorire la connessione idraulica fra le diverse circolazioni. I laghi, infatti, sono generalmente alimentati dai contributi sotterranei delle diverse falde più superficiali e, dove particolarmente profondi, si raccordano idraulicamente con la falda basale (Capelli et al., 2005).

Altri acquiferi presenti nel distretto dell'Appennino centrale sono quelli alluvionali che occupano porzioni molto estese di territorio, nelle valli del Fiume Tevere e dei corsi d'acqua adriatici dell'Abruzzo e delle Marche. Si tratta di acquiferi caratterizzati da elevata produttività, che si presentano generalmente con caratteristiche ambientali scadenti per via dell'eccessivo uso delle risorse e del depauperamento qualitativo.

Si riconoscono, infine, acquiferi nelle conche intramontane, nelle valli e nelle depressioni quaternarie laziali, umbre e abruzzesi (Piane di Terni e Leonessa, Piana Reatina, Piana di Sulmona, Valle dell'Aterno, Media Valle del Tevere) e nelle fasce costiere. Gli acquiferi costieri sono soggetti spesso a pressioni eccessive che possono determinare fenomeni di intrusione salina.

Nel Piano di Gestione delle Acque del distretto dell'Appennino centrale sono stati individuati 144 Corpi idrici sotterranei, che corrispondono prevalentemente alle idrostrutture principali descritte, attraverso il raggruppamento dei complessi idrogeologici nei sette macrogruppi secondo la legenda ricavata dalla Carta idrogeologica di Fried et al. (1982) in applicazione della procedura di cui al DLgs 30/2009: 56 corpi idrici calcarei (CA), 42 delle alluvioni vallive (AV), 19 delle alluvioni delle depressioni quaternarie (DQ), 7 delle vulcaniti (VU), 2 delle formazioni detritiche plio-quaternarie (DET) e 18 degli acquiferi locali (LOC). Rientrano in quest'ultima tipologia i corpi idrici che per esigenze di gestione sono molto estesi ma comprendono molti acquiferi di dimensioni e/o produttività ridotti, come quelli contenuti negli affioramenti marnoso-arenacei, nei travertini e di altri acquiferi locali non raggruppabili in altri macrogruppi.

springs that emerge along streams flowing down the volcanic slopes. These springs appear where stream incision reaches the saturated zone of the aquifer.

Tectonic discontinuities, which interrupt the continuity of the low-permeability substratum, may promote mixing between regional aquifers and deep hydrothermal circuits, producing local conditions of thermal and mineralized waters. At emission centers where lakes are present, the absence of a low-permeability substratum can facilitate hydraulic connectivity among different flow systems. Lakes are generally fed by shallow groundwater contributions, and where particularly deep, may also connect with the basal aquifer (Capelli et al., 2005).

Additional aquifers in the Central Apennine district include alluvial aquifers occupying large portions of the Tiber River valley and the valleys of Adriatic rivers in Abruzzo and Marche. These are highly productive aquifers but often exhibit poor environmental conditions due to overexploitation and water quality degradation.

Further aquifers occur in intramontane basins, valleys, and Quaternary depressions in Lazio, Umbria, and Abruzzo (e.g., Terni and Leonessa Plains, Rieti Plain, Sulmona Plain, Aterno Valley, Middle Tiber Valley), as well as in coastal areas. Coastal aquifers are often under significant pressure, leading to seawater intrusion phenomena.

In the River Basin Management Plan of the Central Apennines District, 144 groundwater bodies have been identified. These largely correspond to the main hydrostructures described, resulting from the grouping of hydrogeological complexes into seven macro-groups according to the legend derived from the hydrogeological map by Fried et al. (1982), following the procedure established by Legislative Decree 30/2009. The classification includes 56 carbonate groundwater bodies (CA), 42 from valley alluvium (AV), 19 from the alluvium of Quaternary depressions (DQ), 7 from volcanic formations (VU), 2 from Plio-Quaternary clastic formations (DET), and 18 local aquifers (LOC). The latter category includes groundwater bodies that, for management purposes, are very extensive but encompass multiple aquifers of limited size and/or productivity, such as those hosted in marl-arenaceous outcrops, travertine deposits, and other local aquifers that cannot be grouped into the other macro-categories.

6.4.3 Notes on the District Water Balance

Due to the territorial extent and the varying hydrogeological characteristics within the district, detailed assessments of water resource availability are required. Important quantitative hydrogeological studies carried out in central Italy since the 1980s (Boni et al., 1986) have allowed for the estimation of hydrogeological budgets of individual hydrostructures, along with average precipitation and effective infiltration values, the

6.4.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

L'estensione territoriale del distretto e le differenti caratteristiche idrogeologiche in esso presenti rendono necessario effettuare valutazioni di dettaglio delle risorse idriche disponibili. Gli importanti studi di idrogeologia quantitativa eseguiti nell'Italia centrale a partire dagli anni ottanta (Boni et alii, 1986) hanno permesso di stimare i bilanci idrogeologici delle singole idrostrutture e di valutare i valori medi di precipitazione e i valori medi di infiltrazione efficace, indicativa della disponibilità delle risorse idriche. A fronte di valori di precipitazione media annua dell'ordine dei 1100 mm/a è stata calcolata una infiltrazione efficace variabile dal 30% al 70% circa con risorse idriche sotterranee complessive dell'ordine dei 400 m^3/s.

Attualmente sono in corso di ultimazione importanti aggiornamenti dei bilanci idrogeologici dei principali corpi idrici sotterranei del distretto allo scopo di valutare l'impatto della variabilità climatica sulla ricarica naturale, da una parte, e il contestuale aumento dei prelievi antropici, dall'altra, e pervenire in tal modo alla definizione dei relativi bilanci idrici.

6.5 Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale

Sollitto D., Ruocchio A.
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale

6.5.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

L'Assetto geologico-strutturale del Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale comprende i principali domini strutturali dell'orogenesi appenninica rappresentati, da ovest verso est, dai rilievi del settore meridionale della Catena Appenninica, dall'Avanfossa Bradanica e dall'Avampaese Apulo.

Le unità tettoniche appartenenti alla dorsale appenninica presentano una struttura a falde, ossia formata da unità geologiche accavallate tra loro attraverso pieghe e sovrascorrimenti tettonici prodotti nel corso dell'orogenesi, la cui natura litologica e petrografica varia considerevolmente in base al relativo contesto paleo-geografico di formazione. Possono, infatti, distinguersi: gruppi litologici a prevalente componente calcareo-dolomitica riconducibili alla Piattaforma carbonatica sud-appenninica; gruppi litologici a prevalente componente quarzarenitica e argillitica, calcareo-marnosa e flysch riferibili alle unità dei bacini Lagonegrese e Sicilide; gruppi litologici a prevalente componente arenacea quarzoso-feldspatica, argilloso-siltosa e torbiditica riferibili alle unità sin- e post-orogeniche del Miocene; gruppi litologici a prevalente componente sabbioso-argillosa di derivazione per lo più continentale e riconducibile ai bacini infra-appenninici.

L'Avanfossa Bradanica, è caratterizzata dalla presenza di una potente successione sedimentaria composta da unità litologiche terrigene, di origine sia marina che continentale, depositati attraverso il susseguirsi di cicli sedimentari trasgressivo-regressivi, fino al continuo riempimento dell'avanfossa, avvenuto tra il Pliocene e il Pleistocene. Il termine predominante di tale successione è rappresentato dalle argille gri-

latter being indicative of water resource availability. With an average annual precipitation of approximately 1100 mm/year, effective infiltration was estimated to range from about 30% to 70%, leading to a total groundwater availability of around 400 m^3/s.

Currently, major updates are being finalized for the hydrogeological budgets of the main groundwater bodies within the district. These updates aim to assess the impact of climate variability on natural recharge, alongside the concurrent increase in anthropogenic withdrawals, in order to define updated water budgets.

6.5 Southern Apennines River Basin District

Sollitto D., Ruocchio A.
Southern Apennines River Basin District Authority

6.5.1 Geological and Hydrogeological Features

The geological-structural framework of the Southern Apennines River Basin District includes the main structural domains of the Apennine orogen, which, from west to east, comprise the reliefs of the southern sector of the Apennine Chain, the Bradanic Foredeep, and the Apulian Foreland.

The tectonic units belonging to the Apennine ridge exhibit a nappe structure, formed by geological units stacked through folds and thrusts generated during the orogenic phases. The lithological and petrographic nature of these units varies significantly depending on their respective palaeogeographic settings. Distinct groups can be identified: lithological groups with a predominantly carbonate-dolomitic composition, referable to the Southern Apennine carbonate platform; groups with a predominantly quartz-arenitic and argillaceous, calcareous-marly, and flysch composition, associated with the Lagonegro and Sicilide basin units; groups with a predominantly quartzofeldspathic arenitic, argillaceous-silty, and turbiditic composition, attributable to the syn- and post-orogenic Miocene units; and groups with a predominantly sandy-clayey composition of mostly continental origin, associated with intra-Apennine basins.

The Bradanic Foredeep is characterized by a thick sedimentary succession composed of terrigenous lithological units of both marine and continental origin, deposited through a series of transgressive-regressive sedimentary cycles that led to the progressive infilling of the foredeep between the Pliocene and the Pleistocene. The dominant lithotype of this succession consists of the grey-blue clays attributed to the Sub-Apennine Clays Formation (Calabrian), which are widely distributed at the base of the foredeep and locally overlain by the closing units of the Bradanic sedimentary cycle. These include sandy-calcarenitic and conglomeratic lithologies assigned to the Monte Marano Sands (Calabrian), Monte Castiglione Sands (Calabrian), Staturo Sands (Villafranchian), Calcigne Clays

gio-azzurre ascrivibili alla formazione delle *Argille Subappennine* (Calabriano), presenti estesamente alla base dell'intera avanfossa e localmente ricoperte dalle unità di chiusura del ciclo sedimentario bradanico, rappresentate da litologie a prevalente componente sabbioso-calcarenitica e conglomeratica, ascrivibili alle formazioni delle *Sabbie di Monte Marano* (Calabriano), delle *Sabbie di Monte Castiglione* (Calabriano), delle *Sabbie dello Staturo* (Villafranchiano), delle *Argille Calcigne* (Villafranchiano) e alla formazione dei *Conglomerati di Irsina* (Villafranchiano).
L'Avampaese Apulo è il dominio strutturale dell'orogene appenninico le cui unità geologiche si rinvengono in affioramento esclusivamente nell'ambito del Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale, caratterizzando le aree geografiche del Gargano, delle Murge e del Salento nel territorio regionale della Puglia. Dal punto di vista litologico, tale dominio strutturale è caratterizzato dalla presenza di una potente successione di rocce carbonatiche mesozoiche, formatesi nel contesto paleo-ambientale della piattaforma carbonatica tetidea attiva fino alla fine del Cretaceo e denominata Piattaforma Apula, i cui caratteri litologici sono piuttosto uniformi, con strati e banchi di calcari prevalentemente micritici alternati a calcari dolomitici e a dolomie.
Completano il quadro geologico i gruppi formazionali di origine ignea e metamorfica che caratterizzano i massicci della Sila, delle Serre e dell'Aspromonte in Calabria, e le unità laviche e piroclastiche che caratterizzano gli apparati vulcanici di Roccamonfrina, dei Campi Flegrei, di Somma Vesuvio e del Monte Vulture.
La complessità strutturale della catena appenninica che si manifesta nei rapporti geometrici tra le varie unità stratigrafico-strutturali si traduce in una notevole variabilità delle caratteristiche litologiche e di permeabilità, condizionando la distribuzione e la geometria delle strutture idrogeologiche e lo schema di circolazione idrica sotterranea a piccola e a grande scala.
Le strutture idrogeologiche esistenti presentano una potenzialità idrica variabile in funzione dei caratteri litologici e delle relative caratteristiche idrogeologiche, oltre che dell'estensione del dominio idrogeologico, delle aree di ricarica e delle modalità di alimentazione degli acquiferi.

6.5.2 Principali acquiferi del territorio del distretto

Sulla base delle prevalenti caratteristiche litologiche, i sistemi acquiferi nel territorio possono essere in via preliminare raggruppati nelle tipologie di seguito richiamate:

- *Sistemi carbonatici (Tipo A)* - Sono costituiti da complessi calcarei ed in subordine da complessi dolomitici, i primi contraddistinti da elevata permeabilità per fratturazione e per carsismo, i secondi da permeabilità medio-alta principalmente per fratturazione. Tali sistemi comprendono idrostrutture carbonatiche caratterizzate dalla presenza di falde di base e falde sospese; gran parte delle idrostrutture carbonatiche presentano notevole estensione ed "*alta potenzialità idrica*".

(Villafranchian), and the Irsina Conglomerates Formation (Villafranchian).
The Apulian Foreland is the structural domain of the Apennine Orogen whose geological units are exposed exclusively within the Southern Apennines River Basin District. It defines the geographic areas of Gargano, Murge, and Salento in the Apulia region. Lithologically, this domain is characterized by a thick succession of Mesozoic carbonate rocks formed in the palaeoenvironmental context of the Tethyan carbonate platform, which was active until the end of the Cretaceous and is referred to as the Apulian Platform. The lithological features are relatively homogeneous, with layers and beds of mainly micritic limestones alternating with dolomitic limestones and dolomites.
The geological framework is completed by igneous and metamorphic formation groups that characterize the massifs of the Sila, Serre, and Aspromonte in Calabria, and by the volcanic and pyroclastic units associated with the volcanic complexes of Roccamonfina, Campi Flegrei, Somma-Vesuvius, and Monte Vulture.
The structural complexity of the Apennine chain, as expressed by the geometric relationships among the various stratigraphic-structural units, results in a high degree of variability in lithological characteristics and permeability. This, in turn, influences the distribution and geometry of hydrogeological structures and the pattern of groundwater circulation at both local and regional scales.
The existing hydrogeological structures exhibit variable groundwater potential depending on lithological and hydrogeological characteristics, as well as on the extent of the hydrogeological domain, recharge areas, and the aquifer recharge mechanisms.

6.5.2 Main Aquifers in the District Area

Based on the prevailing lithological features, the aquifer systems in the district area can be preliminarily grouped into the following types:

- Carbonate systems (Type A)*: Comprising primarily limestone complexes and secondarily dolomitic complexes. The former exhibit high permeability due to fracturing and karstification, while the latter show medium-high permeability mainly due to fracturing. These systems include carbonate hydrostructures with basal and perched aquifers; most carbonate hydrostructures are extensive and have "high water potential."*
- Mixed systems (Type B)*: Predominantly composed of calcareous-marly and clayey lithologies, with permeability ranging from medium to high where carbonates prevail (depending on the degree of fracturing and karstification), and from medium to low where pelitic lithologies dominate. In the latter case, the sequences act as impermeable base layers in contact with carbonate hydrostructures.*

- *Sistemi di tipo misto (Tipo B)* - Sono costituiti prevalentemente da complessi litologici calcareo-marnoso e argillosi, caratterizzati da permeabilità variabile da media ad alta, laddove prevalgono i termini carbonatici e in relazione al grado di fatturazione e di carsismo, e da media a bassa, ove prevalgono i termini pelitici. In quest'ultimo caso le successioni svolgono un ruolo di base impermeabile a contatto con le strutture idrogeologiche carbonatiche. Tali sistemi comprendono acquiferi a "*potenzialità idrica variabile da medio-bassa a bassa*" e presentano falde allocate in corrispondenza dei livelli a permeabilità maggiore, spesso sovrapposti.
- *Sistemi silico-clastici (Tipo C)* - Sono costituiti da complessi litologici conglomeratici e sabbiosi, caratterizzati da permeabilità prevalente per porosità da media a bassa, in relazione alla granulometria ed allo stato di addensamento e/o di cementazione del deposito. Tali sistemi comprendono acquiferi a "*potenzialità idrica variabile da medio-bassa a bassa*" e presentano una circolazione idrica in genere modesta, frazionata in più falde, spesso sovrapposte.
- *Sistemi clastici di piana alluvionale e di bacini fluvio-lacustri intramontani (Tipo D)* - Sono costituiti da complessi litologici di ghiaie, sabbie ed argille alluvionali e fluvio-lacustri, a luoghi interessati dalla presenza di unità detritiche. La permeabilità è prevalentemente per porosità ed il grado è estremamente variabile da basso ad alto in relazione alle caratteristiche granulometriche, allo stato di addensamento e/o di cementazione del deposito. Il deflusso idrico ha luogo in corrispondenza dei livelli a permeabilità maggiore, spesso sovrapposti ed interconnessi, con "*potenzialità idrica medio-bassa*" che, ove sono a contatto con idrostrutture carbonatiche, possono ricevere cospicui travasi da queste ultime.
- *Sistemi dei complessi vulcanici quaternari (Tipo E)* - Sono costituiti dai complessi delle lave, dei tufi e delle piroclastiti. I complessi delle lave sono contraddistinti da permeabilità da medie ad alte in relazione al grado di fessurazione, mentre nei complessi dei tufi e delle piroclastiti la permeabilità assume valori da bassi a medio bassi in relazione allo stato di fessurazione e/o allo stato di addensamento. Tali sistemi comprendono acquiferi vulcanici con "*potenzialità idrica variabile da medio-alta a medio-bassa*" e le falde sono principalmente allocate in corrispondenza dei livelli a permeabilità maggiore, spesso sovrapposti e talora interconnessi.
- *Sistemi degli acquiferi cristallini e metamorfici (Tipo F)* - Sono costituiti dai complessi ignei e metamorfici, contraddistinti per lo più da permeabilità secondaria per fratturazione, sebbene siano caratterizzati spesso da una superficiale coltre di alterazione resa granulare dai processi di degradazione chimico-fisici e caratterizzata da permeabilità per porosità, con un grado di perme-

These systems include aquifers with "medium-low to low water potential," often featuring overlapping aquifer levels where more permeable strata are present.

- Siliciclastic systems (Type C)*: Composed of conglomeratic and sandy lithologies, with prevailing permeability by porosity ranging from medium to low, depending on grain size and the degree of compaction and/or cementation. These systems include aquifers with "medium-low to low water potential," generally characterized by modest and multilayered groundwater flow.*
- Clastic alluvial plain and intramontane fluvio-lacustrine basin systems (Type D)*: Made up of gravel, sand, and clay of alluvial and fluvio-lacustrine origin, sometimes including detrital units. Permeability is mainly porosity-driven and highly variable (from low to high) based on grain size, compaction, and cementation. Groundwater flow occurs along the more permeable strata, which are often overlapping and interconnected. These aquifers have "medium-low water potential" and may receive substantial inflows from adjacent carbonate hydrostructures.*
- Quaternary volcanic complex systems (Type E)*: Comprised of lava flows, tuffs, and pyroclastic deposits. Lava flows show medium to high permeability depending on fracturing, while tuffs and pyroclastics exhibit low to medium-low permeability depending on fracturing and/or compaction. These systems include volcanic aquifers with "medium-high to medium-low water potential," with groundwater typically found along the more permeable and often layered and interconnected horizons.*
- Crystalline and metamorphic aquifer systems (Type F)*: Consist of igneous and metamorphic complexes, predominantly characterized by secondary permeability due to fracturing. These formations often have a surface weathered layer made granular by chemical and physical degradation processes, exhibiting porosity-driven permeability of generally medium-low degree. These systems include aquifers with "medium-low water potential," with groundwater circulation occurring in the relatively shallow zones (up to 40-50 m depth) where fractures are interconnected.*

Although groundwater resources are not uniformly distributed, due to the highly heterogeneous hydrogeological properties of the main hydrostructures, certain hydrogeological conditions enable hydraulic interconnections and exchanges between adjacent aquifers. Groundwater flow may produce significant water transfers that exceed surface basin and regional administrative boundaries.

abilità nel complesso medio-basso. Tali sistemi comprendono acquiferi con "*potenzialità idrica medio-bassa*", dove la circolazione delle acque sotterranee avviene nella parte relativamente superficiale (fino alla profondità massima di 40-50 m), dove le fratture risultano anastomizzate.

Sebbene le risorse idriche sotterranee non siano distribuite omogeneamente, in relazione ai caratteri idrogeologici molto eterogenei delle principali idro-strutture, esistono tuttavia particolari condizioni idrogeologiche che determinano interconnessione idraulica e travasi tra acquiferi adiacenti, in quanto la circolazione idrica sotterranea, genera notevoli flussi che travalicano i confini dei bacini superficiali e dei territori regionali.

6.5.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

Lo stato ambientale dei corpi idrici sotterranei costituisce un indicatore degli effetti indotti dalle attività antropiche sulle condizioni qualitative e quantitative delle risorse idriche, rappresentando un indice di sostenibilità strettamente connesso al bilancio idrogeologico.

La conoscenza del bilancio idrogeologico, rappresenta la parte cruciale nel processo di valutazione dello stato quantitativo, sebbene la sua valutazione non possa prescindere dalla più ampia conoscenza di fattori idrogeologici e ambientali ad esso correlati.

Nell'ambito dell'ultimo ciclo di aggiornamento del Piano di Gestione delle Acque (2022-2027) sono state delineate una serie di misure specifiche volte a risolvere o attenuare le criticità connesse alla valutazione e al monitoraggio dello stato quantitativo, all'aggiornamento del quadro delle pressioni antropiche, alla definizione del bilancio idrologico e idrico dei corpi idrici e del Deflusso Ecologico.

Nello specifico, si sta attuando il *Programma delle attività finalizzato alla valutazione e al monitoraggio dello stato quantitativo, alla definizione del bilancio idrologico e idrico dei corpi idrici e del Deflusso Ecologico* finalizzato ad implementare, con dettaglio progressivamente crescente e attraverso l'adozione di un approccio *multi-scalare* di tipo *top-down*, gli indicatori di stato quantitativo delle risorse idriche sotterranee e di pressione antropica, avendo come termine di riferimento l'unità di bilancio idrogeologico rispetto alla quale valutare i termini di bilancio idrologico e idrogeologico e adottare misure di tutela e di salvaguardia della risorsa, anche in relazione alle derivazioni idriche.

6.6 Distretto Idrografico della Sardegna

Botti P.[1], Lorrai M.[1], Da Pelo S.[2], Buttau C.[2], Funedda A.[2]

1 - Regione Autonoma della Sardegna - Autorità di Distretto della Sardegna
2 - Università degli Studi di Cagliari

6.6.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

La geologia della Sardegna è caratterizzata da un basamento cristallino di origine varisica (dal Cambriano al Carbonifero), costituito da rocce di origine sedimentaria, metamorfica e magmatica, e di una

6.5.3 Notes on the District Water Balance

The environmental status of groundwater bodies serves as an indicator of the effects induced by anthropogenic activities on both the qualitative and quantitative conditions of water resources. It represents a sustainability index that is closely linked to the hydrogeological balance.

Knowledge of the hydrogeological balance is a critical component in the process of assessing the quantitative status of groundwater bodies, although such an assessment cannot be separated from a broader understanding of the hydrogeological and environmental factors associated with it.

As part of the latest update cycle of the River Basin Management Plan (2022-2027), a series of targeted measures have been outlined to address or mitigate the challenges associated with the assessment and monitoring of quantitative status, the update of the anthropogenic pressure framework, the definition of the hydrological and water budget of groundwater bodies, and the determination of ecological flow.

Specifically, a program of activities is currently being implemented to support the assessment and monitoring of quantitative status, as well as the definition of the hydrological and water balance of groundwater bodies and the ecological flow. The objective is to progressively refine, using a top-down, multi-scale approach, the indicators of groundwater quantitative status and anthropogenic pressure. The reference unit for this process is the hydrogeological balance unit, with respect to which the hydrological and hydrogeological budget terms are evaluated and protection measures are defined, including those related to water abstractions.

6.6 Sardinia River Basin District

Botti P.[1], Lorrai M.[1], Da Pelo S.[2], Buttau C.[2], Funedda A.[2]

1 - Sardinia Autonomus Region - Sardinia River Basin District Authority
2 - University of Cagliari

6.6.1 Geological and Hydrogeological Features

The geology of Sardinia is characterized by a Variscan crystalline basement (from the Cambrian to the Carboniferous), composed of sedimentary, metamorphic, and magmatic rocks, overlain by a post-Variscan cover consisting of volcanic and sedimentary successions. The basement rocks have undergone polyphase deformation and regional metamorphism, resulting in complex structures and a tectono-metamorphic zonation ranging from the External Zone, with very low-grade metamorphism in the southwest, to a highly deformed Internal Zone in the north (Carmignani et al., 2016). This geological complexity directly influences groundwater flow.

Hydrogeological complexes of low to medium permeability (granites, Paleozoic schistose metamorphic rocks, volcanic rocks, and clastic sediments ranging from the Permian to the Quaternary) have the greatest thickness and cover

copertura post-varisica, caratterizzata da successioni vulcaniche e sedimentarie. Le rocce del basamento hanno subito deformazioni polifasiche e metamorfismo regionale, generando strutture complesse e una zonazione tettonometamorfica che si estende dalla Zona Esterna, con metamorfismo di bassissimo grado a sud-ovest, fino a una Zona Interna, fortemente deformata, a nord. (Carmignani et al., 2016). Questa complessità geologica ha ripercussioni dirette sulla circolazione idrica sotterranea. I complessi idrogeologici di bassa e media permeabilità (graniti e rocce metamorfiche scistose del Paleozoico, rocce vulcaniche e sedimenti clastici databili dal Permiano al Quaternario) presentano gli spessori maggiori e coprono circa l'80% del territorio Sardo. I complessi ad alta permeabilità (calcari e dolomie del Cambriano e del Mesozoico, i depositi alluvionali quaternari e i basalti scoriacei) rappresentano circa il 17% del territorio, mentre i complessi totalmente impermeabili (principalmente marnosi) sono poco diffusi. Questa distribuzione delle proprietà idrogeologiche, con la netta predominanza del basamento cristallino, si riflette sulla quantità e sulla portata delle sorgenti. Sull'isola ne sono state censite oltre 30.000, di cui circa 6.000 con portata di magra superiore a 0,10 L/s. Complessivamente, la portata totale in condizioni di magra è stimata a circa 6.000 L/s, pari a circa 200 Mm^3/anno, anche se solo una piccola parte viene utilizzata a causa della dispersione dei punti d'acqua (Ghiglieri & Da Pelo, 2019; Manfredi, 1934; Pala, 1999). Tra tutte le sorgenti, solo 250 superano i 2 L/s di portata, e 24 hanno una portata superiore ai 20 L/s, escludendo le fonti termali più note. Le sorgenti con oltre 50 L/s sono appena 12, ma forniscono il 27% del volume idrico sorgivo complessivo; sette superano i 100 L/s, di cui tre (Su Gologone, S. Pantaleo attualmente sommersa dall'invaso artificiale del Cedrino, e Pubusinu) raggiungono e superano i 200 L/s. Le sorgenti più abbondanti sono alimentate da complessi calcareo-dolomitici ed espandimenti basaltici. Lungo la costa si riscontrano sorgenti sottomarine e flussi diffusi, in particolare nei sistemi carbonatici di Sant'Antioco, Fertilia, Porto Conte, l'Iglesiente e il golfo di Orosei (Caboi et al., 1982; De Waele & Nieddu, 2005; Pala, 1999). Sul versante occidentale dell'isola, caratterizzato da precipitazioni generalmente più abbondanti e condizioni idrogeologiche favorevoli, si trovano gli acquiferi più produttivi, tra cui quelli calcareo-dolomitici dell'Iglesiente, Sulcis e della Nurra e quello prevalentemente basaltico del Montiferru. Sul versante orientale, aree particolarmente ricche di risorse idriche sotterranee sono il Monte Albo, che ospita il sistema carsico Locoli e Frunch'e Oche (Murgia, 2013), e il Supramonte di Oliena, che ospita il sistema carsico che alimenta la sorgente di Su Gologone (Sanna et al., 2019).

6.6.2 Principali acquiferi del territorio del distretto

Sulla base delle ricerche idrogeologiche (Caboi et al., 1982; Ghiglieri & Da Pelo, 2019; Pala, 1999; RAS,

about 80% of Sardinia's territory. High-permeability complexes (Cambrian and Mesozoic limestones and dolomites, Quaternary alluvial deposits, and scoriaceous basalts) account for approximately 17% of the territory, whereas totally impermeable complexes (mainly marly formations) are scarcely represented. This distribution of hydrogeological properties, with the clear predominance of the crystalline basement, is reflected in the number and discharge of springs. Over 30.000 springs have been surveyed on the island, of which about 6,000 have a low flow discharge greater than 0.10 L/s. The total discharge under low-flow conditions is estimated at about 6,000 L/s, corresponding to approximately 200 Mm^3/year, although only a small portion is utilized due to the scattered distribution of water points (Ghiglieri & Da Pelo, 2019; Manfredi, 1934; Pala, 1999). Of all the springs, only 250 exceed 2 L/s, and 24 have a discharge greater than 20 L/s, excluding the most well-known thermal springs. Springs with discharges over 50 L/s number just 12, yet account for 27% of the total spring water volume; seven exceed 100 L/s, of which three (Su Gologone, S. Pantaleo-currently submerged by the Cedrino artificial reservoir-and Pubusinu) reach or exceed 200 L/s. The most abundant springs are fed by carbonate-dolomitic complexes and basaltic flows. Along the coast, submarine springs and diffuse outflows occur, especially in the carbonate systems of Sant'Antioco, Fertilia, Porto Conte, the Iglesiente area, and the Gulf of Orosei (Caboi et al., 1982; De Waele & Nieddu, 2005; Pala, 1999). On the island's western side, characterized by generally higher rainfall and favorable hydrogeological conditions, lie the most productive aquifers, including the carbonate-dolomitic ones of Iglesiente, Sulcis, and Nurra, and the predominantly basaltic aquifer of Montiferru. On the eastern side, particularly rich groundwater areas include Monte Albo, hosting the Locoli and Fruncu'e Oche karst system (Murgia, 2013), and the Supramonte of Oliena, which feeds the Su Gologone Spring (Sanna et al., 2019).

6.6.2 Main Aquifers in the District Area

Based on hydrogeological research (Caboi et al., 1982; Ghiglieri & Da Pelo, 2019; Pala, 1999; RAS, 2021), the hydrogeological framework of Sardinia can be summarized in the following complexes, classified according to their permeability:

1. *Carbonate complex (12) - High permeability, Mesozoic and Paleozoic in age, mainly composed of limestone and dolomitic rocks, with thicknesses up to 700 m. It includes Cambrian formations of Sulcis and Iglesiente-often in sub-vertical settings-and Mesozoic formations of Nurra, Monte Albo, the Gulf of Orosei, Supramonte of Oliena, and the "Tacchi" of Sarcidano, Ogliastra, and Barbagia.*
2. *Volcanic complex of Pliocene-Pleistocene age (15) - High permeability, mainly located in Montiferru and Logudoro, consisting of basaltic*

2021), i lineamenti idrogeologici della Sardegna possono essere sintetizzati attraverso i seguenti complessi, distinti in base alla loro permeabilità:

1. Complesso carbonatico (12), ad alta permeabilità del Mesozoico e Paleozoico, costituito prevalentemente da rocce calcareo-dolomitiche con spessori variabili sino a 700 m. Comprende le formazioni cambriane del Sulcis e dell'Iglesiente, spesso in giacitura sub-verticale, nonché quelle mesozoiche della Nurra, del Monte Albo, del Golfo di Orosei, del Supramonte di Oliena, e dei "Tacchi" del Sarcidano, d'Ogliastra e Barbagia.
2. Complesso delle vulcaniti ad alta permeabilità del Pliocene-Pleistocene (15), localizzate principalmente nel Montiferru e nel Logudoro. Sono costituite da lave basaltiche e affini, caratterizzate da tessitura scoriacea, che talvolta raggiungono spessori fino a 250 m.
3. Complesso a ghiaia o sabbia prevalenti (alluvionali) ad alta e media permeabilità (4 e 3) del Pliocene-Quaternario, con spessori fino a 200 m. Si estendono principalmente nel Campidano e, in misura minore, in alcune pianure costiere (Nurra, Sarrabus-Gerrei, Basso Sulcis, ecc.).
4. Complesso delle vulcaniti (16 e 17) e complessi sedimentari (complesso arenaceo-conglomeratico (9) e complesso marnoso (10) a media o bassa permeabilità del Cenozoico. Comprendono arenarie, marne, ignimbriti, tufi e andesiti, distribuiti nel Logudoro, Anglona, Trexenta, Sulcis e Quirra con spessori fino a 800 m. I depositi miocenici marnosi a bassa permeabilità, con spessori fino a 400 m, sono diffusi nella Marmilla e Trexenta, il Campidano di Cagliari e parte del Logudoro.
5. Complesso metamorfico (19) e complesso intrusivo (18) del Paleozoico, caratterizzati da una permeabilità generalmente da scarsa a media, sebbene possa risultare discreta lungo le principali faglie e dislocazioni tettoniche, nonché nelle aree di intensa arenizzazione del granito. Il basamento metamorfico, in particolare, ha un limitato ruolo idrogeologico. Tuttavia, in aree fortemente fratturate, soprattutto in prossimità di intrusioni granitiche o filoni, si possono trovare acquiferi di interesse locale.

Nell'ambito del Piano di Gestione del Distretto Idrografico (PdG) sono stati individuati nel territorio regionale 38 complessi idrogeologici principali, 83 acquiferi, 114 corpi idrici sotterranei.

I corpi idrici della Sardegna sono stati delimitati per garantire una valutazione adeguata dello stato chimico e quantitativo delle acque sotterranee. La loro perimetrazione e, dove possibile, la ricostruzione tridimensionale delle geometrie, si basano sulla cartografia geologica ufficiale della Sardegna in scala 1:25.000 (RAS, 2025), sulle stratigrafie dei sondaggi disponibili per le aree non affioranti e su modelli idrogeologici interpretativi. La suddivisione dei complessi idrogeologici in acquiferi è stata effettuata tenendo conto dei limiti geologici e idrodinamici. La suddivisio-

and related lavas with scoriaceous textures, sometimes up to 250 m thick.

3. *Alluvial complex with prevalent gravel or sand (4 and 3) - High to medium permeability, Pliocene-Quaternary in age, with thicknesses up to 200 m. Found mainly in Campidano and, to a lesser extent, in coastal plains (Nurra, Sarrabus-Gerrei, Lower Sulcis, etc.).*
4. *Volcanic (16 and 17) and sedimentary complexes - Oligo-Miocene and Cenozoic in age, with medium to low permeability, including: arenaceous-conglomeratic complex (9) and marly complex (10). These include sandstones, marls, ignimbrites, tuffs, and andesites, distributed in Logudoro, Anglona, Trexenta, Sulcis, and Quirra, with thicknesses up to 800 m. Low-permeability Miocene marly deposits, up to 400 m thick, are widespread in Marmilla, Trexenta, the Campidano of Cagliari, and parts of Logudoro.*
5. *Metamorphic complex (19) and intrusive complex (18) - Paleozoic in age, generally with low to medium permeability, though permeability may be moderate along major faults and tectonic dislocations, as well as in areas of intense granite arenization. The metamorphic basement plays a limited hydrogeological role. However, in highly fractured areas-especially near granite intrusions or dikes-locally important aquifers can be found.*

Within the River Basin Management Plan (RBMP), 38 main hydrogeological complexes, 83 aquifers, and 114 groundwater bodies have been identified in Sardinia.

The delineation of groundwater bodies in Sardinia aims to ensure an adequate assessment of the chemical and quantitative status of groundwater resources. Their delimitation, and-where possible-the 3D reconstruction of their geometry, was based on the official 1:25.000 scale geological mapping of Sardinia (RAS, 2025), borehole stratigraphy in non-outcropping areas, and interpretative hydrogeological models. The subdivision of hydrogeological complexes into aquifers is considered both geological and hydrodynamic boundaries. The further subdivision of aquifers into groundwater bodies also accounted for factors such as the distribution of anthropogenic pressures and differences in water quality status observed through monitoring.

6.6.3 Notes on the District Water Balance

Below is a summary of the evaluation of long-term natural recharge (Long Term Annual Average Recharge - LTAAR) for all aquifers in Sardinia. This study used the inverse water balance method (Civita, 2005), based on the well-known equation: P = ETr + Ie + Rs (P = precipitation; ETr = actual evapotranspiration; Ie = effective infiltration; Rs = surface runoff).

The LTAAR corresponds to the effective infiltration

ne degli acquiferi in corpi idrici ha inoltre considerato fattori quali la distribuzione delle pressioni antropiche e le differenze nello stato di qualità emerse dai monitoraggi disponibili.

6.6.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

Di seguito è riportato un approfondimento riguardante la valutazione della ricarica naturale su lungo termine (*Long Term Annual Average Recharge LTAAR*) per tutti gli acquiferi della Sardegna. In tale studio è stato utilizzato il metodo del bilancio inverso (Civita, 2005) basato sulla nota equazione P = ETr + Ie + Rs (P: precipitazioni meteoriche, Etr: evapotraspirazione reale, Ie: infiltrazione efficace, Rs: ruscellamento superficiale).

La *LTAAR* corrisponde ai volumi di infiltrazione efficace I_e ottenuti tramite l'applicazione dell'equazione base del bilancio.

La valutazione dei termini del bilancio è stata effettuata per il trentennio 1971-2000, il trentennio 1981-2010 e decennio 2009-2018 a scala di acquifero. I valori di ricarica, intesi come infiltrazione efficace, ottenuti per i tre diversi periodi considerati, sono in generale accordo tra loro e con i volumi proposti dalla letteratura. Un certo grado di variabilità è presente ma è da attribuire a una diversa valutazione della superficie occupata dall'acquifero oppure ai diversi periodi utilizzati per la stima, che implicano variazioni negli apporti pluviometrici e nei tassi di evapotraspirazione.

La tabella 6 riporta una sintesi dei termini di bilancio per gruppi di complessi idrogeologici del PdG (trentennio 1981-2010).

volumes (Ie) obtained by applying the basic water balance equation.

The water balance terms were assessed for the periods 1971-2000, 1981-2010, and 2009-2018 at the aquifer scale. The recharge values, understood as effective infiltration, obtained for the three periods are generally consistent with each other and with values reported in the literature. Some variability is present, which can be attributed to differences in the estimated surface area of the aquifers or in the reference periods used for estimation, which affect precipitation input and evapotranspiration rates.

6.7 Sicily River Basin District

Pappalardo G.[1], Granata A.[2]
1 - University of Catania
2 - Sicily Region - Sicily River Basin District Authority

6.7.1 Geological and Hydrogeological Features

The geological features of Sicily are linked to the orogenic system defined by a collisional thrust belt, which currently overrides the flexed sectors of the foreland (Lentini and Carbone, 2014). In the northeastern sector of Sicily, within the Calabrian-Peloritan Arc, outcrops of pre-Variscan and Variscan metamorphic basement complexes are present, overlain by Meso-Cenozoic sedimentary covers (Longi-Taormina, Capo S. Andrea, S. Marco d'Alunzio, Rocca Novara Units), characterized by low to medium permeability. Above these successions lies a flysch complex of medium to low permeability (Capo d'Orlando Flysch).

In the Nebrodi Mountains area, the flysch complex is the most widespread and consists of hundreds of meters of marls, claystones, sandstones, and conglomerates with highly variable permeability

Tabella 6 - Bilancio idrico per gruppi di complessi idrogeologici caratterizzanti la Sardegna
Table 6 - Water balance for groups of hydrogeological complexes in Sardinia (1981-2010)

Gruppi di complessi idrogeologici/*Group of Hydrogeological Complexes*	**AREA (km²)**	**P** *(Mm³/yr)*	**Etr** *(Mm³/yr)*	**PE** *(Mm³/yr)*	**Ie** *(Mm³/yr)*	**Rs** *(Mm³/y)*
Alluvioni detritiche plio-quaternare/*Plio-Quaternary detrital alluvium*	3165	1719	1306	413	210	203
Vulcaniti plio-pleistoceniche/*Plio-Pleistocene volcanic rocks*	1476	1078	666	411	300	111
Detritico-carbonatici oligo-miocenici ed eocenici/ *Oligo-Miocene and Eocene detrital-carbonate*	1976	1179	837	342	142	200
Vulcaniti oligo-mioceniche/*Oligo-Miocene volcanic rocks*	2181	1442	954	488	247	241
Carbonati mesozoici/*Mesozoic carbonates*	913	676	410	266	200	66
Carbonati paleozoici/*Paleozoic carbonates*	192	139	87	52	38	15
Granitoidi/*Granitoids*	6106	4350	2723	1627	413	1214
TOTALE/*TOTAL*	16009	10583	6983	3599	1549	2051

6.7 Distretto Idrografico della Sicilia

Pappalardo G. [1], Granata A. [2]
1 - Università degli Studi di Catania
2 - Regione Siciliana - Autorità di Distretto della Sicilia

6.7.1 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

Le caratteristiche geologiche della Sicilia sono connesse alla definizione del sistema orogenico composto da un thrust-belt collisionale, che attualmente è in accavallamento sui settori flessurati dell'avampaese (Lentini e Carbone, 2014). Nel settore nord-orientale della Sicilia dell'Arco Calabro-Peloritano, affiorano i complessi del basamento metamorfico pre-varisico e varisico con le coperture sedimentarie meso-cenozoiche (Unità Longi-Taormina, Capo S. Andrea, S. Marco d'Alunzio, Rocca Novara), a media-bassa permeabilità. Al tetto di queste successioni è presente un complesso flyschoide a permeabilità medio-bassa (Flysch di Capo d'Orlando).

Nel settore dei Monti Nebrodi il complesso flyschoide è quello più diffuso, ed è formato da sequenze di centinaia di metri di marne, argilliti, arenarie, conglomerati con una permeabilità molto variabile da media a bassa (Flysch Monte Soro, Numidico, Argille Scagliose Superiori e Inferiori, Piedimonte e Reitano). I complessi Flyschoidi si estendono per tutto il settore di catena andando a costituire la copertura terrigena delle successioni pelagiche del Bacino Imerese, dei sedimenti carbonatici della piattaforma Panormide e delle successioni sedimentarie sicilidi.

Nella porzione occidentale sono presenti unità carbonatiche e carbonatico-silicoclastiche fratturate e carsificate della piattaforma Panormide e del Bacino Imerese caratterizzate da elevata permeabilità. Si riscontrano strutture sinclinaliche o strette dorsali costituite dai depositi tardorogeni in complessi arenaceo-conglomeratici (Formazione Terravecchia e depositi pliocenici) con permeabilità medio-alta per porosità prevalente e secondariamente per fratturazione che ospitano vari acquiferi multifalda separati da orizzonti impermeabili o semi-permeabili (Catalano, 2010).

Il settore centro-meridionale della Sicilia è costituito dalle coperture neogenicche-quaternarie di avanfossa con depositi sedimentari marini terrigeni, sabbiosi-calcarenitici, conglomeratici (Ciclo di Geracello, di Enna-Capodarso, Gruppo Ribera) depositi pre-evaporitici, evaporitici e Trubi. La permeabilità è molto variabile da bassa a media, per porosità e per fratturazione (Complesso Evaporitico, Carbonatico, Calcareo-marnoso).

Il settore orientale vede gli affioramenti dei complessi delle vulcaniti ad alta permeabilità per fessurazione e porosità dell'Etna, la cui attività iniziò circa 500.000 anni fa. Il vulcano Etna con un'area di circa 1200 km^2 rappresenta l'acquifero più importante del distretto, i prodotti dell'attività dei diversi centri eruttivi succedutisi nel tempo presentano una notevole variabilità litologica e strutturale che condiziona la permeabilità delle vulcaniti, determinando una circolazione idrica sotterranea notevolmente sviluppata.

ranging from medium to low (Monte Soro Flysch, Numidian Flysch, Upper and Lower Scaly Clays, Piedimonte and Reitano Flysch). Flysch complexes extend throughout the mountain range, forming the terrigenous cover of the pelagic successions of the Imerese Basin, the carbonate sediments of the Panormide Platform, and the Sicilide sedimentary successions.

In the western portion of the island, fractured and karstified carbonate and carbonate-siliciclastic units from the Panormide Platform and Imerese Basin exhibit high permeability. Synclinal structures or narrow ridges formed by late-orogenic deposits in arenaceous-conglomeratic complexes (Terravecchia Formation and Pliocene deposits) display medium to high permeability, mainly due to porosity and secondarily to fracturing. These host various multilayer aquifers separated by impermeable or semi-permeable horizons (Catalano, 2010).

The central-southern sector of Sicily consists of Neogene-Quaternary foredeep covers with marine terrigenous, sandy-calcarenitic, and conglomeratic deposits (Geracello, Enna-Capodarso cycles, Ribera Group), pre-evaporitic, evaporitic, and Trubi deposits. Permeability ranges from low to medium, depending on porosity and fracturing (Evaporitic, Carbonate, and Calcareous-marly complexes).

In the eastern sector, outcrops of volcanic complexes with high permeability due to fracturing and porosity are associated with Mount Etna, whose activity began around 500.000 years ago. With an area of approximately 1.200 km², Mount Etna represents the district's most important aquifer. The products of various eruptive centers over time display notable lithological and structural variability, which controls the permeability of the volcanic rocks, enabling extensive groundwater circulation.

Pliocene and Miocene eruptive phases are located south of the Catania Plain, at the margin of the Hyblean Plateau, and are characterized by submarine deposits comprising thick sequences of hyaloclastites, volcanoclastic breccias, and pillow lava flows. The oldest eruptive phase is from the Cretaceous and consists of submarine basic volcanics, fine-grained yellow-brown volcanoclastics, breccias, pillow lavas, and pillow basalts formed in relatively deep marine settings. These formed seamounts upon which rudist carbonate platforms later developed. Due to significant alteration, their permeability is low.

The southeastern portion of the district belongs to the foreland domain; indeed, the Hyblean Plateau represents an emerged sector of the Pelagian Block, bounded on its northwestern margin by a system of NE-SW-oriented normal faults with significant displacement. The Tertiary and Quaternary carbonate complex features a shallow marine environment, influenced by the development of volcanic products. It consists of limestones,

Le fasi eruttive plioceniche e mioceniche sono poste a sud della Piana di Catania, al margine con gli Iblei, e sono caratterizzati da prodotti sottomarini con una potente successione costituita da ialoclastiti, brecce vulcanoclastiche e colate a pillow e subaeree. La fase eruttiva più antica è quella del Cretaceo: si tratta di vulcaniti basiche submarine, vulcanoclastiti bruno-giallastre a grana fine, da brecce a pillows e lave a pillows di mare relativamente profondo che hanno determinato dei sea-mounts, sui quali si sono impostate le piattaforme carbonatiche a rudiste. La loro permeabilità è bassa, in quanto risultano essere interessate da significativa alterazione.
La porzione sudorientale del distretto ricade nel dominio di Avampaese; infatti, il Plateau Ibleo rappresenta un settore emerso del Blocco Pelagiano, delimitato dalle aree flessurate sul suo margine nord-occidentale da un sistema di faglie normali di notevole rigetto orientate NE-SO. Il complesso carbonatico di età terziaria e quaternaria è caratterizzato da una sequenza di ambiente marino poco profondo, condizionato dallo sviluppo di prodotti vulcanici. Il complesso è costituito da calcari, calcareniti e calciruditi (F.ne Carlentini, M. Carrubba, M. Climiti, Pachino, Priolo, "Panchina"), con permeabilità alta per fratturazione e porosità e localmente elevata per carsismo. Nel settore occidentale ibleo, i sedimenti carbonatici sono di mare aperto, e sono riuniti nel Complesso calcareo-marnoso con permeabilità media per porosità ed in parte per fratturazione (F.ne Palazzolo, Tellaro, Ragusa, Hybla).
Il Plateau Ibleo è ribassato verso nord da sistemi di faglie normali che originano l'attuale Avanfossa Gela-Catania. Il complesso detritico-alluvionale indifferenziato, che costituisce la Piana alluvionale di Catania, unitamente a quella di Gela e di Licata, hanno una permeabilità per porosità da media ad alta.

6.7.2 Principali acquiferi del territorio del distretto

In Sicilia si hanno acquiferi di notevole interesse, quali quello vulcanico dell'Etna, quello carbonatico dei Monti di Palermo, del Trapanese, dei Monti Sicani, degli Iblei, e quello delle piane alluvionali, tra cui quello più importante è posto nella Piana di Catania. Anche le coperture calcarenitiche e sabbiose Plio-quaternarie con buoni spessori, rappresentano gli acquiferi più importanti nella parte centro-meridionale della Sicilia e nelle pianure costiere della Sicilia centrosettentrionale (Piana di Palermo) e occidentale (Piana di Marsala-Mazzara e Piana di Castelvetrano).
La permeabilità dell'edificio vulcanico etneo è a doppia porosità, dovuta ai vacuoli della degassazione del magma, alla fessurazione dovute ai processi di raffreddamento e dalla fratturazione dovuta a stress tettonici. Numerose sono anche le cavità di varie dimensioni associate allo svuotamento del deflusso magmatico sotto una crosta lavica già consolidata che ne aumentano la potenzialità idrica. Le falde più importanti, si hanno in prossimità di antiche paleo-vallate o strutture tettoniche. Sono numerose le sorgenti tra il sedimentario e le coperture laviche sovrastanti, alcune di queste hanno portate molto elevate (Ferrara

calcarenites, and calcirudites (Carlentini Formation, Mt. Carrubba, Mt. Climiti, Pachino, Priolo, "Panchina"), with high permeability due to fracturing and porosity, and locally very high due to karstification. In the western Hyblean sector, open-marine carbonate sediments (Palazzolo, Tellaro, Ragusa, Hybla Formations) form a calcareous-marly complex with medium permeability due to porosity and partial fracturing.
The Hyblean Plateau is downfaulted to the north by normal faults, creating the current Gela-Catania Foredeep. The undifferentiated alluvial-detrital complex that constitutes the Catania alluvial plain, together with those of Gela and Licata, shows medium to high permeability due to porosity.

6.7.2 Main Aquifers of the District Area

Sicily hosts several significant aquifers, including the volcanic aquifer of Mount Etna; carbonate aquifers in the Palermo Mountains, Trapani area, Sicani Mountains, and Hyblean Plateau; and the alluvial plains, among which the Catania Plain aquifer is the most important. The Plio-Quaternary calcarenitic and sandy covers, where they have substantial thicknesses, also form key aquifers in central-southern Sicily and in the coastal plains of central-northern (Palermo Plain) and western Sicily (Marsala-Mazara and Castelvetrano Plains).
The Etnean volcanic edifice exhibits dual porosity, resulting from magma degassing vacuoles, cooling-related fracturing, and tectonic stresses. Numerous cavities of various sizes, caused by the drainage of magma beneath already solidified lava crusts, increase groundwater potential. The most important aquifers occur near ancient paleovalleys or tectonic structures. Numerous springs occur at the interface between sedimentary rocks and overlying lava flows, some with high discharge rates (Ferrara and Pappalardo, 2008). The lava rocks, which constitute most of the flows, are the main conductors of water, with transmissivity values ranging from $1{,}68x10^{3}$ - $5{,}30x10^{1}$ m^2/s (Ferrara, 1990).
Carbonate aquifers are widespread, and their properties are primarily governed by extensive fracturing and karstification. In the Trapani area, the Erice, Mt. Inici, and Mt. Sparagio hydrogeological units are noteworthy. In the Palermo Mountains, hydrogeological units are more numerous and complex, including Mt. Castellaccio, Mt. Palmeto-Cozzo di Lupo, Mt. Sagana-Mt. Gradara, Belmonte Mezzano, and Mt. Kumeta. These aquifers are mainly composed of Triassic-Liassic limestones and dolostones (thickness >1000 m), pelagic limestones in Scaglia facies, and Miocene calcarenites. In the Imerese unit, the calcareous-dolomitic interval (Scillato and Fanusi Fms.) exhibits high permeability due to fracturing. In the northern carbonate sector, near Rocca di Cefalù, high-yield springs (hundreds of L/s) are found both in the town and along the nearby coastline. The hydrostructure of the Sicani Mountains consists of Mesozoic carbonate massifs

e Pappalardo 2008). Le rocce laviche, costituenti la parte predominante delle colate, contribuiscono maggiormente alla trasmissione delle acque con valori di trasmissività, compresi tra 1,68x10^{-3} e 5,30x10^{-1} m^2/s (Ferrara, 1990).

Gli acquiferi carbonatici sono molto diffusi e le loro caratteristiche sono legate alla presenza di elevata fratturazione e presenza di processi carsici. Nel Trapanese le unità idrogeologiche di Erice, di M. Inici e di M. Sparagio, mentre nei Monti di Palermo le unità idrogeologiche sono più numerose ed articolate, quali quelle di M. Castellaccio, M. Palmeto-Cozzo, di Lupo, M. Sagana-M. Gradara, Belmonte Mezzano e M. Kumeta. L'acquifero è costituito per lo più da calcari e dolomie trassiche-liassiche, i cui spessori superano i 1000 m, da calcari pelagici in facies di Scaglia, e da calcareniti mioceniche. Nell'unità Imerese l'intervallo calcareo-dolomitico (f.ni Scillato e Fanusi) presenta permeabilità elevata per fratturazione. Nel settore carbonatico settentrionale, in corrispondenza della Rocca di Cefalù, sono presenti sorgenti di notevole portata (centinaia di L/s), localizzate sia nel centro abitato, che nell'area più prossima alla costa. L'idrostruttura dei Monti Sicani è costituita da ammassi rocciosi carbonatici mesozoici, confinati da Trubi o terreni argillosi Plio-pleistocenici. Numerose sono le sorgenti e molte delle quali utilizzate per scopi idropotabili.

Nel dominio Ibleo gli acquiferi carbonatici sono costituiti da calcari e dolomie del Triassico, su cui seguono i calcari di piattaforma del siracusano e del ragusano, fino al Miocene. La permeabilità alta per porosità e fratturazione, diviene molto elevata laddove sono presenti i fenomeni carsici. Intervallati ai complessi carbonatici possono essere presenti complessi di vulcaniti del miocene e del pliocene, che solitamente hanno una media permeabilità, per cui si possono avere porzioni confinate o acquiferi discontinui. Le vulcaniche del Cretaceo hanno un discreto grado di alterazione, che tende ad abbassare la permeabilità e costituiscono pertanto il substrato impermeabile dei calcari miocenici.

La formazione dei Monti Climiti, in particolare l'intervallo superiore (membro dei calcari di Siracusa) ha una permeabilità molto elevata per carsismo. Gran parte degli acquiferi del settore Ibleo sono condizionati dalla tettonica ad Horst e Graben, che li rende discontinui nella loro potenzialità.

D'importanza locale sono i complessi evaporitici della Sicilia centro-meridionale. Si tratta di acquiferi poco spessi e disarticolati con un chimismo spesso non idoneo all'utilizzo idropotabile a causa della elevata salinizzazione dei minerali di zolfo. Le sorgenti sono di modesta entità e quasi sempre di acque mineralizzate.

Le piane alluvionali possiedono una permeabilità per porosità, il più importante è quello della Piana di Catania, nella quale confluiscono i fiumi Simeto, Dittaino e Gornalunga. Si tratta di corpi idrici, separati o interconnessi, liberi o semi-confinati. Nel settore nord-orientale della Sicilia, le ghiaie e sabbie

bounded by Trubi marls or Plio-Pleistocene clay deposits. Numerous springs, many used for drinking water supply, are present.

In the Hyblean domain, carbonate aquifers are made up of Triassic limestones and dolostones, overlain by platform limestones from the Siracusa and Ragusa areas up to the Miocene. These have high permeability due to porosity and fracturing, which becomes very high where karst phenomena are present. Miocene and Pliocene volcanic rocks, with medium permeability, may be interbedded within the carbonate complexes, giving rise to confined or discontinuous aquifers. Cretaceous volcanic rocks, with a fair degree of alteration, act as the impermeable basement of the Miocene limestones.

The Climiti Mountains formation, particularly its upper interval (Syracuse limestone member), displays very high permeability due to karstification. Many aquifers in the Hyblean sector are structurally discontinuous due to Horst and Graben tectonics, affecting their yield.

Evaporitic complexes in central-southern Sicily have local significance. These are thin and fragmented aquifers often characterized by poor water quality due to high salinity and sulfur mineralization. Springs are generally low-yield and highly mineralized.

Alluvial plains possess porosity-driven permeability; the most important is the Catania Plain aquifer, recharged by the Simeto, Dittaino, and Gornalunga rivers. These aquifers are unconfined or semi-confined and may be either isolated or interconnected water bodies. In northeastern Sicily, the gravels and sands of the Messina area exhibit high permeability, although with limited thicknesses. Another significant alluvial area is Barcellona P.G., along with coastal zones along the Ionian and Tyrrhenian shores of the Messina province. The Partinico Plain and the area around Palermo host multilayer aquifers of sometimes considerable hydrogeological interest.

6.7.3 Notes on the District Water Balance

For an initial quantification of the available water resources, based on the delineation of groundwater bodies provided by the Sicily River Basin Authority, an approximation was made assuming that the available water volumes in the aquifers correspond to the volumes of effective infiltration (aquifer recharge). Direct contributions were assessed through annual-scale hydrological balance analysis for the period 2000-2018, over the total area of the identified groundwater bodies (12.078 km²).

Precipitation and temperature data were sourced from the thermo-pluviometric network of the Sicilian Regional Water Observatory and were used to calculate effective infiltration volumes by applying the Potential Infiltration Coefficient (PIC) as defined in the scientific literature. Effective infiltration (mean annual water resource volumes) was derived using the Hydrological Balance Equation, with

di Messina hanno una permeabilità elevata, sebbene gli spessori non siano elevati. Altra area alluvionale è quella di Barcellona P.G., che assieme alle varie fasce presenti lungo le coste ioniche e tirreniche del messinese, contiene acquiferi di un certo interesse. La Piana di Partinico e dei dintorni di Palermo è caratterizzata da acquiferi multifalda, a volte di buon interesse idrogeologico.

6.7.3 Cenni al bilancio idrogeologico di distretto

Per una prima quantificazione delle risorse idriche disponibili, note le perimetrazioni dei corpi idrici sotterranei fornite per il Territorio siciliano dal Dipartimento dell'Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia, è stata assunta l'approssimazione che i volumi d'acqua disponibili all'interno degli acquiferi coincidono con i volumi di infiltrazione efficace (ricarica degli acquiferi). Sono stati definiti gli apporti diretti attraverso l'analisi del bilancio idrologico a scala annuale per un periodo compreso tra il 2000 e il 2018 per l'area totale dei suddetti corpi (12.078 km^2).
I valori di precipitazione e temperatura derivano dalle registrazioni della rete termo-pluviografica dell'Osservatorio delle Acque della Regione Siciliana e sono stati utilizzati per la definizione dei volumi di infiltrazione efficace, applicando il Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (CIP) secondo la letteratura disponibile. L'infiltrazione efficace (volumi di risorsa idrica media annua) è stata ricavata dall'equazione del Bilancio Idrologico con il valore di evapotraspirazione calcolato per mezzo della formula del Turc calibrata per il territorio siciliano. Il risultato dell'elaborazione dei dati è riportato in Tabella 7.

evapotranspiration estimated using the Turc formula calibrated for the Sicilian territory. The results are presented in Table 7.

Tabella 7 - Voci medie del bilancio del Distretto relativo al periodo 2000-2018 dei principali acquiferi per un'area complessiva di 12.078 km^2.
Table 7 - Mean values of the water balance for the Sicily River Basin District (2000-2018) over a total area of 12.078 km²

Voce bilancio/ Balance Component	**m^3/anno - m^3/year**
Infiltrazione efficace/Effective Infiltration	1,22278 × 10^9 m^3
Evapotraspirazione/Evapotranspiration	5,42302 × 10^9 m^3
Precipitazione/Precipitation	8,82177 × 10^9 m^3
Ruscellamento/Runoff	3,47557 × 10^9 m^3

7. QUADRO DI SINTESI

7.1 Cenni sulla stima delle risorse idriche sotterranee nazionali

Anche in previsione dei futuri cambiamenti climatici che potrebbero pesare sulla disponibilità idrica del Paese, la valutazione quantitativa della risorsa idrica è fondamentale. Storicamente, tali valutazioni per l'intero territorio nazionale sono state svolte dalla Conferenza Nazionale delle Acque (1972) per il periodo 1921-1950 e dalle Nazioni Unite (United Nations 1991). In quest'ultimo studio, il periodo di riferimento non è esplicitato. Le diverse voci del bilancio a scala nazionale, come calcolate dalla Conferenza Nazionale delle Acque (1972), sono presentate in Tabella 8. Lo studio delle Nazioni Unite (United Nations 1991) ha inserito nel bilancio, come voce esplicita, anche l'uso della risorsa idrica e la sua fonte di approvvigionamento (Tabella 9). Nel dettaglio, lo studio aveva valutato in $300x10^9$ m^3/anno gli apporti meteorici, con una evapotraspirazione di $140x10^9$ m^3/anno. I deflussi erano stati stimati complessivamente in $160x10^9$ m^3/anno con la seguente distribuzione per le acque sotterranee: l'infiltrazione interessa $43x10^9$ m^3/anno, ma una parte di essa torna ai corsi d'acqua e al mare per $30x10^9$ m^3/anno. La rimanente frazione di $13x10^9$ m^3/anno costituisce mediamente l'uso della risorsa idrica sotterranea. Globalmente, le voci di bilancio restano molto simili a quelle proposte dalla Conferenza Nazionale delle Acque (1972), con un lieve aumento dell'evapotraspirazione e una diversa distribuzione del deflusso tra superficiale e sotterraneo. Istat (2019) ha calcolato per il 2015 un uso della risorsa pari a $20,7x10^9$ m^3/anno (Tabella 9). La diffe-

7. SUMMARY FRAMEWORK

7.1 Overview of the Estimation of National Groundwater Resources

In view of potential future climate changes that could significantly affect the country's water availability, the quantitative assessment of water resources is of critical importance. Historically, such assessments for the entire Italian territory have been carried out by the National Water Conference (1972) for the period 1921-1950, and by the United Nations (1991), although the reference period in the latter study is not explicitly stated. The various components of the national water balance as calculated by the National Water Conference (1972) are presented in Table 8. The United Nations (1991) study explicitly included water use and its sources in the balance (Table 9). Specifically, the study estimated atmospheric inputs at $300x10^9$ m^3/year, with evapotranspiration amounting to $140x10^9$ m^3/year. Total runoff was estimated at $160x10^9$ m^3/year, with the following groundwater breakdown: infiltration accounted for $43x10^9$ m^3/year, part of which ($30x10^9$ m^3/year) discharged back into surface water bodies and the sea. The remaining $13x10^9$ m^3/year represents the average volume of groundwater used. Overall, the water balance components are very similar to those proposed by the National Water Conference (1972), with a slight increase in evapotranspiration and a different distribution between surface and groundwater runoff. According to ISTAT (2019), water use in 2015 amounted to $20,7x10^9$ m^3/year (Table 9). The difference between the 2015 values and those proposed by the United Nations (1991)

Tabella 8 - Bilancio idrologico globale d'Italia (Conferenza Nazionale delle Acque, 1972)
Table 8 - Italy's overall water balance (National Water Conference, 1972)

Unità di misura/ ***Unit***	**Afflusso meteorico/** ***Precipitation***	**Evapotraspirazione/** ***Evapotranspiration***	**Deflusso sotterraneo scarico a mare/*Groundwater discharge to the sea***	**Deflusso superficiale/** ***Surface runoff***
mm/anno	990,0	440,0	40,0	510,0
km^3/anno	296,0	129,0	12,0	155,0
%	100	43,6	4,1	52,3

Tabella 9 - Suddivisione dell'uso delle acque da Nazioni Unite (1991) per un periodo non definito e da Istat (2019) per il 2015.
Table 9 - Water use breakdown from United Nations (1991) and Istat (2019) for 2015

Uso delle acque/*Water use*	**UNITED NATIONS (10^9 m^3/year)**	**Istat (10^9 m^3/year)**
Pubblico/*Domestic*	6,5	4,9
Industriale/*Industrial*	1,7	3,5
Agricolo/*Agricultural*	4,6	12,0
Misto/*Mixed*	0,2	0,3
Fonte di approvvigionamento/ *Water source*		
Sorgenti/*Springs*	3,5	NA
Pozzi e gallerie/*Wells and galleries*	9,5	NA

Tabella 10 - Voci del bilancio idrologico (espresse in mm) per distretto idrografico relative al periodo 1951-2023 (Braca et al., 2024)
Table 10 - Water balance components (in mm) per River Basin district for 1951-2023 (Braca et al., 2024)

DISTRETTO IDROGRAFICO/ ***HYDROGRAPHIC DISTRICT***	**Precipitazioni/** ***Precipitation***	**Afflussi (pioggia+neve)/** ***Total Input (rain + snow)***	**ET reale/** ***Actual ET***	**Ricarica/** ***Recharge***	**Deflusso/** ***Runoff***	**ΔV**
Fiume Po/*Po River*	1015,4	1014,9	510,3	211,0	294,1	-0,5
Alpi Orientali/*Eastern Alps*	1199,5	1198,9	540,5	388,6	270,0	-0,2
Appennino Settentrionale/ *Northern Apennines*	1035,3	1035,3	518,4	209,9	307,2	-0,2
Appennino Centrale/*Central Apennines*	943,6	943,6	522,5	212,2	209,4	-0,5
Appennino Meridionale/*Southern Apennines*	910,5	910,5	476,3	214,7	220,1	-0,6
Sardegna/*Sardinia*	698,2	698,2	420,5	110,2	168,1	-0,7
Sicilia/*Sicily*	666,8	666,8	414,4	110,3	143,4	-1,3
ITALIA/*ITALY*	949,5	949,3	493,2	215,7	241,0	-0,6

Tabella11 - Confronto tra le voci del bilancio idrologico (espresse in 10^9 m^3 e %) sull'intero territorio nazionale proposte dalla Conferenza Nazionale delle Acque (1972) per il periodo 1921-1950 e dall'aggiornamento al periodo 1951-2023 delle voci proposte da Braca et al. (2024).
Table 11 - Comparison of national water balance components (in 10^9 m^3 and %) for 1921-1950 (National Water Conference, 1972) and 1951-2023 (Braca et al., 2024)

Periodo/ ***Period***	**AFFLUSSI/*TOTAL INPUT***		**DEFLUSSI/*RUNOFF***					
			ETr		**Deflusso superficiale/** ***Surface Runoff***		**Deflusso sotterraneo/** ***Groundwater discharge***	
	10^9 m^3	%	10^9 m^3	%	10^9 m^3	%	10^9 m^3	%
1921-1950	296,0	100	129,0	43,6	154,9	52,3	12,1	4,1
1951-2023	286,8	100	149,0	51,9	72,8	25,3	65,2	22,8
2023-1950	-9,2		20,0	8,3	-82,1	-27,0	53,1	18,7

renza di valori tra il 2015 e i valori proposti da United Nations (1991) potrebbe essere giustificata dal fatto che per il 2015, nel computo degli usi, sono considerati anche i contributi da acque superficiali.
A circa 50 anni dalla Conferenza Nazionale delle Acque è stata recentemente effettuata una valutazione del bilancio idrologico annuo medio per distretto idrografico e riferita al periodo 1951-2019, poi aggiornata al 2023 (Braca et al., 2021; 2024). Tali dati, a livello nazionale, sono aggiornati annualmente per l'Annuario dei dati ambientali prodotto da ISPRA (https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/idrosfera-0). I risultati di questo studio sul bilancio idrico sono presentati in Tabella 10. Rispetto al complessivo afflusso di acque sul territorio nazionale, l'ultimo aggiornamento dei valori di media a lungo termine (1951-2023) ha calcolato che l'evapotraspirazione (ET reale) costituisce il 51,9%, il ruscellamento (deflusso) il 25,3% e l'infiltrazione (ricarica) il 24,2%, con una modesta aliquota di variazione del contenuto idrico del suolo (ΔV). Rispetto ai dati da rianalisi proposti in Tabella 2 (1981-2010) si nota come in Braca et al. (2024) la precipitazione tenda ad essere leggermente superiore nei distretti del Po e delle Alpi Orientali e leggermente

may be due to the inclusion, in the 2015 estimate, of contributions from surface water bodies.
Nearly 50 years after the National Water Conference, a new assessment of the mean annual water balance per hydrographic district has been conducted for the period 1951-2019, and subsequently updated to 2023 (Braca et al., 2021; 2024). These data are updated annually at the national level for inclusion in the Environmental Data Yearbook published by ISPRA (https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/idrosfera-0). The results of the updated water balance study are shown in Table 10. For the long-term average (1951-2023), real evapotranspiration accounts for 51,9% of the total water input over the national territory, runoff 25,3%, and infiltration (recharge) 24,2%, with a minor component representing changes in soil water content (ΔV). Compared to the reanalysis data presented in Table 2 (1981-2010), Braca et al. (2024) show slightly higher precipitation values in the Po and Eastern Alps Districts, and slightly lower values in the other districts. However, evapotranspiration data cannot be directly compared, as Table 2 reports potential evapotranspiration, while Table 10 provides actual

inferiore negli altri, mentre i dati di evapotraspirazione non possono essere direttamente confrontati perché potenziale in Tabella 2 e reale in Tabella 10. Le differenze possono essere attribuite in parte al diverso orizzonte temporale di riferimento, ma soprattutto alla diversa metodologia di stima.
Un confronto della valutazione dei bilanci idrici 1921-1950 (Conferenza delle Acque, 1972) e 1951-2023 (considerando una superficie dell'Italia di 302.073 km^2) è proposto in Tabella 11.
Le differenze in termini di deflusso superficiale e deflusso sotterraneo per i due periodi (Tabella 11) sono date da tre diverse concause:
i) il deflusso superficiale del 1921-1950 considera anche il ritorno di acque in superficie attraverso i processi di alimentazione dei corsi d'acqua da parte della circolazione sotterranea;
ii) le conoscenze sui processi e i metodi di monitoraggio e di stima delle variabili caratterizzanti il bilancio sono molto variati tra i due periodi;
iii) variazioni di afflussi ed evapotraspirazione possono incidere sulla partizione della risorsa tra deflusso superficiale e infiltrazione.

7.2 Considerazioni su gestione e sostenibilità

La gestione sostenibile della risorsa idrica in Italia rappresenta una sfida cruciale, soprattutto in un contesto di cambiamenti climatici, crescita della domanda e degrado ambientale. L'Italia, pur essendo un Paese ricco di risorse idriche - con una disponibilità media annua di circa 150 miliardi di metri cubi - affronta significative criticità legate alla distribuzione geografica e stagionale dell'acqua. Secondo ISPRA (2023), solo il 40% di questa risorsa viene effettivamente utilizzata, mentre il restante si disperde o non è accessibile.
Il settore agricolo è il maggiore consumatore, con circa il 50% dei prelievi idrici, seguito dall'industria (22%) e dal comparto civile (28%). Tuttavia, le perdite nelle reti idriche civili restano elevate: il rapporto Istat 2022 rileva che oltre il 42% dell'acqua immessa nelle reti urbane va perso a causa di infrastrutture obsolete. In alcune città del Sud Italia, le perdite superano il 50%.
Un ruolo fondamentale è svolto dai distretti idrografici che pianificano l'uso dell'acqua secondo principi di integrazione e partecipazione pubblica. Azioni come il riuso delle acque reflue trattate, la raccolta delle acque meteoriche e l'agricoltura di precisione stanno contribuendo a migliorare l'efficienza e la resilienza del sistema idrico italiano. A questo si aggiunge la possibilità di realizzare impianti di ricarica degli acquiferi in condizioni controllate, così come previsto dal DM Ambiente 2 maggio 2016, n. 100, che potrebbe contribuire ad aumentare la quantità di acqua infiltrata sopperendo quindi alle future carenze di apporti meteorici e di aumento di evapotraspirazione, così come rappresentato in precedenza (cfr. cap. 4).
In Tabella 12, riguardo il tema della sostenibilità in Italia dell'uso delle risorse idriche, vengono proposti i dati pubblicati dalla FAO (2025) attraverso il portale Aquastat (https://data.apps.fao.org/aquastat). I dati rappresentano valori medi di lungo periodo e sono re-

values. The observed differences can be attributed in part to the different reference time periods, but more significantly to the differing estimation methodologies. A comparison between the water balance assessments for 1921-1950 (National Water Conference, 1972) and the updates for 1951-2023 (based on Italy's surface area of 302.073 km²) is presented in Table 11. The differences in surface and subsurface runoff between the two periods (Table 11) are due to three contributing factors:
i) the 1921-1950 surface runoff includes return flows to surface water from groundwater discharge processes;
ii) knowledge of hydrological processes, as well as monitoring and estimation methods for water balance variables, has changed significantly between the two periods;
iii) variations in inflows and evapotranspiration can affect the partitioning of water resources between surface runoff and infiltration.

7.2 Reflections on Water Management and Sustainability

Sustainable water resource management in Italy represents a major challenge, especially in the context of climate change, increasing demand, and environmental degradation. Despite being relatively water-rich-with an average annual availability of about 150 billion cubic metres-Italy faces major issues due to the geographical and seasonal unevenness of water distribution. According to ISPRA (2023), only 40% of this resource is actually used, while the rest is either lost or remains inaccessible.
The agricultural sector is the largest user, accounting for around 50% of total withdrawals, followed by industry (22%) and domestic use (28%). However, losses in public water supply networks remain high: the Istat 2022 report shows that over 36% of water introduced into urban networks is lost due to outdated infrastructure. In some southern cities, losses exceed 50%.
River Basin District Authorities play a key role in water planning based on integrated and participatory principles. Actions such as the reuse of treated wastewater, rainwater harvesting, and precision agriculture are helping to improve the efficiency and resilience of the Italian water system. In addition, there is the possibility of implementing aquifer recharge systems under controlled conditions, as provided for by Decree no. 100 of May 2, 2016, which would significantly increase the volume of infiltrated water, thereby compensating for future reductions in meteoric inputs and increases in evapotranspiration, as previously discussed (see Chapter 4).
Table 12 shows FAO (2025) data from the Aquastat portal (https://data.apps.fao.org/aquastat), summarizing the sustainability status of water use in Italy. The values refer to long-term means, typically for the period 1961-1990 unless otherwise indicated in the metadata; per capita values reflect annual population updates.

Tabella 12 - Valori delle variabili che descrivono lo stato delle risorse idriche in Italia estratte dal database Aquastat (FAO, 2025)
Table 12 - Key water resource variables for Italy from Aquastat (FAO, 2025)

Variabile/*Variable*	**Valore/ *Value***	**Unità/*Unit***
Precipitazione media annuale di lungo periodo/ *Long-term average annual precipitation in depth*	832	mm/anno *mm/year*
Capacità totale delle dighe/*Total dam capacity*	10,0	10^9 m^3
Acque sotterranee in ingresso al paese (totale)/ *Groundwater: entering the country (total)*	0	10^9 m^3/anno
Acque sotterranee in uscita verso altre nazioni (totale)/ *Groundwater: leaving the country to other countries (total)*	0	10^9 m^3/anno
Acque superficiali in ingresso al paese (totale)/ *Surface water: entering the country (total)*	8,8	10^9 m^3/anno
Acque superficiali in uscita verso altre nazioni (totale)/ *Surface water: leaving the country to other countries (total)*	0	10^9 m^3/anno
Acque superficiali esterne rinnovabili/ *Surface water: total external renewable*	8,8	10^9 m^3/anno
Risorse idriche esterne rinnovabili totali/ *Water resources: total external renewable*	8,8	10^9 m^3/anno
Acque sotterranee prodotte internamente/ *Groundwater produced internally*	43	10^9 m^3/anno
Sovrapposizione acque sotterranee e acque superficiali/ *Overlap between surface water and groundwater*	31	10^9 m^3/anno
Acque superficiali prodotte internamente/ *Surface water: total external renewable*	170,5	10^9 m^3/anno
Risorse idriche interne rinnovabili (IRWR)/ *Total internal renewable water resources (IRWR)*	182,5	10^9 m^3/anno
Risorse idriche interne rinnovabile pro capite/ *Total internal renewable water resources per capita*	3080,7	m^3/ab/anno
Acque sotterranee totali rinnovabili/ *Total renewable groundwater*	43	10^9 m^3/anno
Acque superficiali totali rinnovabili/*Total renewable surface water*	179,3	10^9 m^3/anno
Risorse idriche totali rinnovabili/*Total renewable water resources*	191,3	10^9 m^3/anno
Risorse idriche totali rinnovabili pro capite/ *Total renewable water resources per capita*	3229,2	m^3/ab/anno
Acque superficiali irregolari rinnovabili e sfruttabili/ *Exploitable: irregular renewable surface water*	92	10^9 m^3/anno
Acque superficiali regolari rinnovabili e sfruttabili/ *Exploitable: regular renewable surface water*	18	10^9 m^3/anno
Acque superficiali rinnovabili e sfruttabili/ *Exploitable: total renewable surface water*	110	10^9 m^3/anno
Acque sotterranee regolari rinnovabili e sfruttabili/ *Exploitable: regular renewable groundwater*	13	10^9 m^3/anno
Risorse idriche sfruttabili totali/ *Total exploitable water resources*	123	10^9 m^3/anno

lativi, se non diversamente specificato nei metadati, al periodo 1961-1990, ad eccezione dei dati pro-capite che tengono conto dell'aggiornamento della popolazione di anno in anno.

8. CONSULTAZIONE PUBBLICA

Uno degli aspetti innovativi della metodologia che ha portato alla redazione della nuova Carta Idrogeologica d'Italia alla scala 1:500.000 è stato l'avvio di un processo di partecipazione attiva, su scala nazionale, attraverso il coinvolgimento sia dei portatori di interesse sia di numerosi esperti della comunità tecnica e scientifica nel campo dell'idrogeologia, ai fini dell'ottimizzazione, della condivisione e della verifica della carta stessa. Il processo di consultazione pubblica è avvenuto in tre step distinti:

i) Apertura di una piattaforma WebGIS, con accesso riservato e possibilità di fornire interattivamente indicazioni di modifica sulla base cartografica, ai due principali gruppi di lavoro a carattere nazionale: Tavolo Tematico "O - Idrogeologia" nell'ambito della Rete Italiana dei Servizi Geologici (RISG) e Rete Tematica SNPA n. 13 "Geologia", Linea di Attività n. 4 "Cartografia e monitoraggio idrogeologico";

ii) Partecipazione, illustrazione e consultazione nell'ambito di Rem Tech Expo (Ferrara 18-20 settembre 2024). Durante l'evento è stata fornita la possibilità, attraverso dispositivo mobile, di rispondere ad una serie di quesiti e promuovere delle proposte tecniche in merito alla cartografia preliminare ed ai dati idrogeologici in generale elaborati fino a quel momento. È stata, inoltre, data notizia dell'apertura del WebGIS per la consultazione pubblica, dandone poi notifica a tutti gli uffici geologici regionali, al Consiglio Nazionale dei Geologi e agli Ordini regionali così come attraverso il sito del Gruppo Italiano dell'Associazione Internazionale Idrogeologi (IAH). Tale consultazione pubblica è rimasta aperta fino al 31/10/2024;

iii) Sono stati organizzati incontri specifici con le sette Autorità di Bacino Distrettuali del territorio italiano, al fine di acquisire i necessari approfondimenti nonché revisioni ed integrazioni sulle specifiche aree di competenza. In totale sono state ricevute oltre 60 segnalazioni. I commenti sono stati raccolti e valutati e le relative indicazioni di modifica o integrazione, laddove considerate valide per la scala di rappresentazione, sono state apportate alla carta. Avendo contribuito ad un importante miglioramento della rappresentatività della carta idrogeologica, permettendo di integrare a scala nazionale le conoscenze locali, tale approccio partecipativo verrà mantenuto anche per le prossime integrazioni e miglioramenti delle conoscenze idrogeologiche di questo prodotto cartografico.

Il rapporto delle segnalazioni ricevute è disponibile sulla pagina web di ISPRA http://idrogeologia.isprambiente.it/ .

8. PUBLIC CONSULTATION

One of the innovative aspects of the methodology that led to the creation of the new Hydrogeological Map of Italy at a scale of 1:500.000 was the initiation of a national-level participatory process. This process involved both stakeholders and numerous experts from the technical and scientific community in the field of hydrogeology, aimed at optimizing, sharing, and verifying the map itself. The public consultation process occurred in three distinct steps: i) the launch of a WebGIS platform with restricted access and the ability to make interactive changes to the cartographic base. This was open to the two main national working groups: the "O - Hydrogeology" Thematic Table within the Italian Geological Services Network (RISG) and the SNPA Thematic Network No. 13 "Geology," Activity Line No. 4 "Hydrogeological Mapping and Monitoring"; ii) participation, presentation of the, and consultation during the Rem Tech Expo (Ferrara, September 18-20, 2024). During the event, participants were given the opportunity to answer a series of questions via mobile device and propose technical suggestions regarding the preliminary cartography and hydrogeological data developed up to that point. Furthermore, information about the opening of the WebGIS for public consultation was shared, with notifications sent to all regional geological offices, the National Council of Geologists, and regional professional orders as well as to the members of the Italian Chapter of IAH. This public consultation remained open until October 31, 2024; iii) specific meetings were organized with the seven River Basin Authorities of Italy to acquire necessary insights, as well as revisions and additions for their specific areas of expertise. In total, over 60 comments were received. The feedback was collected, assessed, and any suggested modifications or additions deemed valid for the scale of representation were incorporated into the map. Having contributed to a significant improvement in the map's representativeness by integrating local knowledge at the national level, this participatory approach will be maintained for future updates and improvements in the hydrogeological knowledge underlying this cartographic product.

The report on the received comments is available on the ISPRA website at http://idrogeologia.isprambiente.it/

9. FUTURI SVILUPPI DELLA CONOSCENZA DELLE ACQUE SOTTERRANEE IN ITALIA

La carta idrogeologica d'Italia (1:500.000) prodotta in questo studio ha seguito le linee guida dell'Unesco (1970, 1983), della IHME1500 (Duscher et al., 2015) nonché le Linee Guida per la Cartografia Idrogeologica del Progetto CARG (ISPRA, 2018), sebbene queste ultime siano riferite ad una scala di rappresentazione 1:50.000,elaborando e aggiornando i numerosi dati litologici ed idrogeologici prodotti attraverso svariati decenni a scala nazionale e sintetizzandoli in complessi idrogeologici e relativa produttività. La carta rappresenta quindi un nuovo punto iniziale riguardo la conoscenza delle risorse idriche sotterranee, la cui importanza risiede in due caratteristiche specifiche:

- a scala nazionale hanno vari utilizzi (domestico, irriguo, industriale, geotermico), tra cui l'uso potabile riveste un'importanza strategica e vitale;
- rispondono meno velocemente delle acque superficiali alle condizioni idrometeorologiche, consentendo di superare anche periodi critici di siccità in cui l'approvvigionamento idrico diventa problematico.

La cartografia prodotta ha quindi l'obiettivo di armonizzare le conoscenze a scala nazionale, caratterizzare, per quanto possibile alla scala adottata, la circolazione delle acque sotterranee e stimarne la loro entità. La carta si propone anche come punto di partenza per il potenziamento della cartografia idrogeologica relativa al progetto CARG (scala 1:50.000), al fine di sviluppare basi tematiche di riferimento per lo sviluppo di studi idrogeologici di dettaglio. Le conoscenze riassunte dalla Carta Idrogeologica d'Italia sono presentate in 2D-2,5D. La carta riporta le caratteristiche dei complessi idrogeologici individuati rispetto alla permeabilità dei litotipi affioranti, che condiziona l'infiltrazione delle acque meteoriche e delle acque superficiali per la loro ricarica. Il layer relativo alla produttività aggiunge informazioni riguardo le caratteristiche del sottosuolo, essendo stata stimata in base non solo al litotipo affiorante ma al sistema acquifero che caratterizza una certa zona. Tuttavia, non dettagliando esplicitamente il sottosuolo, la carta può essere considerata 2,5D.

Tale approccio 2D è diffusamente adottato dagli idrogeologi e permette una valutazione dell'infiltrazione potenziale (attraverso il coefficiente di infiltrazione potenziale, CIP - Celico, 1988; Civita, 2005), che fornisce un ordine di grandezza della possibilità di ricarica a breve o lungo periodo di una determinata area. Tuttavia, tale impostazione non considera altri importanti fattori quali ad esempio lo spessore del serbatoio che caratterizza il complesso idrogeologico, la morfologia dell'area che può favorire o meno il deflusso superficiale rispetto a quello sotterraneo, il rapporto tra i corsi d'acqua e le falde, la velocità di risposta ai fattori meteorologici. Considerare in modo esplicito questi fattori garantirebbe anche una migliore stima della produttività dei complessi, connessa all'uso delle acque. Infatti, altrettanto importante risulta il contributo dell'uso delle acque, in quanto i prelievi (pozzi e sorgenti) sono in grado di modificare l'entità locale

9. FUTURE DEVELOPMENTS IN GROUNDWATER KNOWLEDGE IN ITALY

The hydrogeogeological map of Italy (1:500.000), produced in this study, followed guidelines on the subject from UNESCO (1970, 1983), IHME1500 (Duscher et al., 2015) but also the guidelines for Hydrogeological Maps of the CARG Project (ISPRA, 2018). The map processed and updated the numerous lithological and hydrogeological data produced over several decades at the national scale and synthesized them into hydrogeological complexes and their productivity. The map thus represents a new starting point regarding the knowledge of groundwater resources. Such resources are fundamental because they have two specific characteristics:

- on a national scale, they have various uses (domestic, irrigation, industrial, geothermal), among which potable use is of strategic and vital importance;

- they respond less quickly than surface waters to hydrometeorological conditions, allowing to overcome even critical periods of drought when the water supply becomes problematic.

The map produced thus aims to armonize knowledge at the national scale, characterize, as far as possible at the scale adopted, groundwater circulation and estimate its extent. The map is also as a starting point for the expansion of the hydrogeological mapping activities related to the CARG project (1:50.000 scale) to develop thematic baselines for detailed hydrogeological studies. The knowledge summarized by the Hydrogeological Map of Italy is presented in 2D-2.5D. The map shows the characteristics of the hydrogeological complexes, identified with respect to the permeability of the outcropping lithotypes, which influences the infiltration of meteoric water and surface water for their recharge. The productivity layer adds information regarding subsurface characteristics, having been estimated based not only on the outcropping lithotype but on the aquifer system that characterizes a certain area. However, not explicitly detailing the subsurface, the map can be considered 2.5D.

This 2D approach is widely adopted by hydrogeologists and allows an assessment of potential infiltration (through the potential infiltration coefficient, CIP - Celico, 1988; Civita, 2005), which provides an order of magnitude of the possibility for short- or long-term recharge of a given area. However, this approach does not consider other important factors, such as the thickness of the reservoir that characterizes the hydrogeological complex, the morphology of the area that may or may not favor surface runoff over subsurface runoff, the relationship between streams and aquifers, and the speed of response to meteorological factors. Also, considering these factors explicitly would ensure an improved estimate of the productivity of the CIs, which is related to water use. In fact, equally important is the contribution of water use, since withdrawals (wells and springs) can change the local magnitude of the resource by

della risorsa, trasferendola quantitativamente e geograficamente (ad esempio mediante captazioni storiche come quelle della civiltà romana e relativamente più recenti come quelle dell'Acquedotto pugliese). L'esperienza conseguita dallo sviluppo della carta suggerisce un necessario proseguimento dello studio attraverso diversi approfondimenti, da poter affrontare in due fasi e di cui almeno la prima è considerata cruciale.

Fase A

1-Bilancio idrico

L'attuale conoscenza quantitativa sulle risorse idriche a livello nazionale è principalmente costituita dal BIG-BANG (Braca et al., 2021) ed è fondata su dati sperimentali osservati per la sola variabile di precipitazione, mentre sono risultati di elaborazioni sui dati osservati l'evapotraspirazione (stimata da dati di temperatura e mediante un bilancio del suolo secondo lo schema di Thornthwaite & Mather, 1955) e l'infiltrazione (stimata da precipitazione efficace e CIP), con il deflusso superficiale che è derivato per differenza. Queste importanti conoscenze possono essere implementate da un confronto con le Autorità di bacino distrettuali, nell'ambito della definizione del bilancio idrico di dettaglio dei propri territori, consentendo, attraverso la definizione su scala locale del deflusso superficiale, una ancora più accurata definizione del bilancio stesso. Inoltre la base informativa della nuova carta idrogeologica potrà costituire un nuovo riferimento omogeneo sul territorio nazionale per la valutazione dell'infiltrazione potenziale.

2-Costruzione di una cartografia idrogeologica 3D

Questa operazione si rende necessaria, come precedentemente riportato, per ricostruire la geometria dei serbatoi idrici sotterranei, in modo tale da valutare l'entità della risorsa idrica sotterranea anche in rapporto all'infiltrazione di cui al punto 1. La realizzazione di un prodotto cartografico 3D dovrebbe partire dalle attuali conoscenze geologiche (carte, sezioni geologiche, carte isobate, etc.) e idrogeologiche. Un esempio di ricostruzione 3D a scopi idrogeologici è costituito dallo studio di Masetti et al. (2021).

3-Uso delle acque sotterranee

Per dettagliare l'uso delle acque sotterranee è necessario completare le informazioni già disponibili, raccolte da Istat, con l'acquisizione dei dati a livello regionale e presso i gestori delle acque, relativi all'entità del prelievo da pozzi e al deflusso totale delle acque sorgive, superando l'attuale informazione disponibile della sola aliquota captata. Tale quantificazione può essere fatta a partire dai dati di concessione all'utilizzo o dall'effettivo prelievo dove conosciuto. Altrove sarà necessario utilizzare tecniche indirette di valutazione dei prelievi da falda acquifera come le idroesigenze delle colture o delle tipologie di impianto industriale presenti sul territorio.

transferring it quantitatively and geographically (e.g., through historical captures such as those of the Roman civilization and relatively more recent ones such as those of the Apulian Aqueduct). The experience gained from the development of the map suggests a necessary continuation of the study through several in-depth studies, which can be addressed in two phases and of which at least the first is considered crucial.

Phase A

1-Water balance

The current quantitative knowledge on water resources at national level is mainly extracted from BIG-BANG (Braca et al., 2021) and it is based on observed experimental data for the precipitation only, while evapotranspiration (estimated from temperature data and by means of a soil balance according to the scheme of Thornthwaite & Mather, 1955) and infiltration (estimated from effective precipitation and CIP) are results of processing of observed data, with surface runoff being derived by difference.

These critical insights can be integrated through collaboration with the District Basin Authorities, within the framework of the detailed water balance assessment for their respective territories. This approach enables a more precise definition of the water balance by incorporating locally-scaled surface runoff estimations. Furthermore, the information base of the new hydrogeological map can serve as a standardized national reference for the assessment of potential infiltration.

2-Construction of 3D hydrogeological maps

This is necessary, as previously reported, to reconstruct the geometry of groundwater reservoirs, so that the extent of the groundwater resource can be assessed in relation to the infiltration referred to in Step A-1. The creation of a 3D mapping product should start with current geological (maps, geological sections, isobath maps, etc.) and hydrogeological knowledge. An example of 3D reconstruction for hydrogeological purposes is the study by Masetti et al. (2021).

3 -Groundwater use

To provide a more detailed assessment of groundwater use, it is necessary to supplement the existing data collected by Istat with additional information at the regional level and from water utilities, specifically regarding the volume of water abstracted from wells and the total discharge from springs. This approach moves beyond the currently available data, which is limited to the captured share only. Such quantification can be based on water use permits or, where available, on actual withdrawal data. In other areas, it will be necessary to employ indirect methods for estimating groundwater abstraction, such as evaluating crop water requirements or the typical water demand of industrial facilities in the area.

4-Impostazione di una cartografia 4D

Per investigare e definire l'evoluzione della risorsa idrica nel tempo risulta cruciale e strategica una omogeneizzazione dei sistemi di monitoraggio quantitativo a scala nazionale, come originariamente era stato proposto nell'ambito del Sistema Informativo Nazionale Ambientale (SINA), istituito nel 1988. Questo non solo come già avviene per le informazioni derivanti dalle misure relative ai punti di monitoraggio della Direttiva Acque (WFD), ma anche eventualmente per dati derivanti dagli Ambiti Territoriali Ottimali (ATO) e da consorzi vari, così come per i punti d'acqua (pozzi e sorgenti) utilizzati per gli approvvigionamenti e disponibili per i controlli ambientali. La significatività idrogeologica di questi punti dovrebbe essere verificata in accordo con le Autorità di bacino distrettuali e gli altri Enti pubblici competenti in materia, per poi costituire un sistema di monitoraggio quantitativo mirato ad indagare la quantità di risorsa in ambiti e per finalità differenti, come per complessi idrogeologici, per le aree di ricarica delle sorgenti, per l'urbanizzazione, e per valutare il rapporto con corsi acqua e le aree irrigue.

Inoltre, dovrebbe essere definita una minima cadenza temporale dei controlli quantitativi (prelievi e portate) per realizzare una misura contemporanea sull'intero territorio nazionale della risorsa idrica (es., semestrale, in periodo di magra e di piena) da relazionare al regime delle precipitazioni (afflussi) e ai deflussi delle acque superficiali.

Fase B

In una seconda fase, per l'eventuale modello 3D su scala nazionale, potrebbe essere testato un approccio basato sull'intelligenza artificiale (IA), nel quale si utilizzerebbe come "allenamento" quanto prodotto nella prima fase. Un possibile utilizzo dell'IA potrebbe anche essere rivolto alla stima generale degli effettivi usi e consumi idrici, descritti nella precedente fase A-3, anche in relazione agli sviluppi futuri delle condizioni al contorno (siccità e cambio di regime delle precipitazioni - cfr. Cap. 4). L'utilizzo di questi algoritmi metterebbe a disposizione, dopo attività di calibrazione e verifica, uno strumento efficiente ed efficace per il miglioramento della conoscenza sulle acque e della loro quantificazione a scala nazionale.

4 - Development of a 4D Mapping System

To analyze and define the temporal evolution of water resources, a nationally harmonized system for quantitative monitoring is both crucial and strategic. This need aligns with the original proposal of the National Environmental Information System (SINA), established in 1988. The objective is to integrate not only data from Water Framework Directive (WFD) monitoring points, as is currently done, but also potentially from Optimal Territorial Areas (ATO), various consortia, and water points (wells and springs) used for supply and environmental monitoring. The hydrogeological relevance of these points should be verified in coordination with the District Basin Authorities and other competent public bodies. These validated points would then form the basis of a quantitative monitoring network aimed at assessing water availability across different hydrogeological contexts and for various purposes, such as aquifer systems, spring recharge areas, urbanization impacts, and interactions with surface water bodies and irrigated areas. In addition, a minimum temporal frequency of quantitative monitoring (withdrawals and flow rates) should be defined to implement a simultaneous measurement on the entire national territory of the water resource (e.g., twice per year during low- and high-flow periods, respectively) to be related to the precipitation regime (inflows) and surface water outflows.

Phase B

In a subsequent phase, for the potential development of a national-scale 3D model, an approach based on artificial intelligence (AI) could be tested, using the outputs generated in the first phase as training data. AI could also be applied to estimate actual water use and consumption, as described in the previous Phase A-3, particularly in relation to future developments in boundary conditions (e.g., drought and changes in precipitation regimes - see Chapter 4). After proper calibration and validation activities, the use of such algorithms would provide an efficient and effective tool for improving knowledge and quantification of water resources at the national scale.

Bibliografia/*References*

Adinolfi, M., Raffa, M., Reder, A. et al. (2023). Investigation on potential and limitations of ERA5 Reanalysis downscaled on Italy by a convection-permitting model. Clim Dyn 61, 4319-4342 (2023). https://doi.org/10.1007/s00382-023-06803-w

Amorosi, A., & Pignone, R. (2009). La pianura: geologia, suoli e ambienti in Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna, Pendragon.

Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (2010). Descrizione generale delle caratteristiche del distretto idrografico, a norma dell'articolo 5 dell'Allegato II (Report art. r). Piano di Gestione Acque 2010.

Autorità di Distretto Appennino Settentrionale: bilanci idrogeologici https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=6420

Baldoni, T., Ramberti, S., Tersigni, S. (2024). La gestione delle risorse idriche in BLUE Book 2024. Servizio idrico integrato e filiera estesa dell'acqua. Roma, Italia: Fondazione Utilitatis.

Benz, S.A., Irvine, D.J., Rau, G.C. et al. (2024). Global groundwater warming due to climate change. Nat. Geosci. 17, 545-551 . https://doi-org.pros2.lib.unimi.it/10.1038/

Beretta, G.P. (1986). Contributo per la carta idrogeologica della Lombardia - scala 1:500.000. Acque sotterranee, 4.

BGR, EGS, UNESCO (2008). International Hydrogeological Map of Europe scala 1:5 000 000. Hannover.

BGS British Geological Survey materials © UKRI [2020] https://www.bgs.ac.uk/datasets/hydrogeology-625k/

Bianchi, M., MacDonald, A. M., Macdonald, D. M. J., & Asare, E. B. (2020). Investigating the productivity and sustainability of weathered basement aquifers in tropical Africa using numerical simulation and global sensitivity analysis. Water Resources Research, 56, e2020WR027746. https://doi.org/10.1029/2020WR027746 .

Boni C.F., Bono P., Capelli G. (1986) - Schema idrogeologico dell'Italia centrale. Mem. Soc. Geol. It., 35, 991-1012.

Boni C., Cascone D., Mastrorillo L., Tarragoni C. (2005) - Carta idrogeologica delle dorsali interne umbro-marchigiane. Foglio 1 e 2. Scala 1:50.000 con note illustrative. Pubblicazione N° 2865 CNR - Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche. ROMA: CNR-GNDCI (ITALY).

Braca, G., Bussettini, M., Lastoria, B., Mariani, S., & Piva, F. (2021). Il Bilancio Idrologico Gis BAsed a scala Nazionale su Griglia regolare - BIGBANG: metodologia e stime. Rapporto sulla disponibilità naturale della risorsa idrica. Rapporti n. 339/21, ISPRA, Roma.

Braca, G., Mariani, S., Lastoria, B., Tropeano, R., Casaioli, M., Piva, F., Marchetti, G., e Bussettini, M., (2024): Bilancio idrologico nazionale: stime BIGBANG e indicatori sulla risorsa idrica. Aggiornamento al 2023. Rapporti n. 401/2024, ISPRA, Roma.

BRGM (2015) https://www.brgm.fr/fr/actualite/communique-presse/carte-hydrogeologique-france-nouvelle-edition

Budetta P., Celico P., Corniello A., De Riso R., Ducci D., Nicotera P. (1994) - Carta idrogeologica della Campania alla scala 1:200.000. Memoria illustrativa, 4° Convegno Internazionale Geoingegneria, Torino, 565-586

Caboi, R., Cidu, R., Pala, A., & Pecorini, G. (1982). Le acque fredde della Sardegna. Lineamenti idrogeologici e idro geochimici. In «Ricerche geotermiche in Sardegna con particolare riferimento al Graben del Campidano»,. Report Finale, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Progetto Finalizzato Energia, Pisa.

Capelli G., Mazza R., Gazzetti C. (2005) - Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio. Pitagora Editrice, Bologna.

Capelli, G., & Mazza, R. (2009). Italian hydrogeological maps. Italian journal of engineering geology and environment, (1), 53-68.

Capelli, G., Mastrorillo, L., Mazza, R., Petitta, M., Baldoni, T., Cascone, D., Di Salvo C., La Vigna F., Taviani S., Teoli, P. (2012). Carta Idrogeologica del Territorio della Regione Lazio scala 1: 100.000 (4 fogli), Regione Lazio, S. EL. CA. Firenze.

Carmignani, L., Oggiano, G., Funedda, A., Conti, P., & Pasci, S. (2016). The geological map of Sardinia (Italy) at 1:250.000 scale. Journal of Maps, 12(5), 826-835. https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1084544

Carmignani, L., Oggiano, G., Funedda, A., Conti, P., & Pasci, S. (2016). The geological map of Sardinia (Italy) at 1:250.000 scale. Journal of Maps, 12(5), 826-835. https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1084544.

Carta idrogeologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 521 - Lauria - ISPRA - Servizio Geologico d'Italia (in corso di stampa).

Catalano, R., Avellone, G., Basilone, L., & Sulli, A. (2010). Note Illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, F. 607 Corleone, Servizio Geologico d'Italia - ISPRA. http://doi.org/10.15161/oar.it/143287

Celico P. (1983) - Carta idrogeologica dell'Italia centro-meridionale - scala 1:400.000. Cassa per il Mezzogiorno, Progetto Speciale n. 29, Schemi idrici dell'Appennino centro-meridionale, Roma

Celico, P. (1988) Prospezioni idrogeologiche - volume secondo. Liguori editore, Napoli.

Celico P., De Vita P., Monacelli G. Scalise A.R., Tranfaglia G. (2005) - Hydrogeological map of southern Italy. 3 tavole alla scala 1:250.000, APAT, Università di Napoli "Federico II", Programma INTERREG IIC - Territory regulation and contrast to the drougth, Sottoprogetto "Hydrological cycle analysis".

Civita M., (1973) Proposte operative per la legneda delle carte idrogeologiche. Boll. Soc. Naturalisti in Napoli.

Civita, M. (2005) Idrogeologia applicata ed ambientale (Applied and Environmental Hydrogeology). Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

Civita, M., Lo Russo, S., & Vigna, B. (2005). Carta Idrogeologica Schematica del Piemonte (NW Italia) 1:250.000, Regione Piemonte, CNR- G.N.D.C.I., Politecnico di Torino - Dipartimento Georisorse e Territorio, DB MAP, Firenze

Chiocci F.L., Guerrieri L., Monegato G., Pieruccini P. (2023). METIQ Modello Evolutivo del Territorio Italiana nel Quaternario - Quaternary map of Italy, INQUA 2023.

Compagnoni B. & Galluzzo F. (coord.), Bonomo R., Capotorti F., D'Ambrogi C., Di Stefano R., Graziano R., Martarelli L., Pampaloni M.L., Pantaloni M., Ricci V., Tacchia D., Masella G., Pannuti V., Ventura R., Vitale V. (2011) - Carta Geologica d'Italia 1:1.000.000 con Note illustrative . Servizio Geologico d'Italia/Dipartimento Difesa del Suolo-ISPRA. SELCA, Firenze, Italia

Conferenza Nazionale delle Acque (1972). I problemi delle acque in Italia: relazioni e documenti. Tipografia del Senato, Roma.

Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E. et al. A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. Clim Dyn 55, 3-34 (2020). https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8

Cotecchia V., D'Ecclesiis G., Polemio M. (1990). Studio geologico e idrogeologico dei Monti di Maratea. Geol. Appl.

Idrogeol., 25, (pp. 139 179).

Cotecchia V., D'Ecclesiis G., Fiorillo F., Polemio M., Tulipano L. (1993). Applicazioni di tecniche di telerilevamento con sistema termovisivo all'infrarosso per l'individuazione di efflussi costieri e di aree di drenaggio di corpi franosi, in Atti 5° Workshp Progetto Strategico, Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno (pp. 529-545).

Cremaschi, M., (1978). Unità litostratigrafiche e pedostratifiche nei terreni quaternari pedeappeninici; loeass e paleosuoli tra il fiume Taro e il torrente Sillaro. Geogr. Fis. Dinam. Quat. 1, 4-22.

Cremaschi, M., (1979). Alcune osservazioni sul paleosuolo delle conoidi "Würmiane", poste al piede dell'Appenino Emiliano.Geogr. Fis. Dinam. Quat. 2, 187-195.

Cremaschi, M., (1987). Paleosols and vetusols in the Central Po Plain (Northern Italy. A study in quaternary geology and soil development. Thesis, University of Amsterdam, ed. UNICOPLI, Milano.

De Waele, J., & Nieddu, A. (2005). Strategie tradizionali per l'approviggionamento idrico in un'area carsica mediterranea: Il caso del Supramonte costiero (Sardegna). Grotte e Dintorni, 10, 9-28.

Desiderio, G., Folchi Vici D'arcevia, C., Nanni, T., Petitta, M., Ruggieri, G., Rusi, S., Tallini M. & Vivalda, P. A. O. L. A. (2011). Schema Idrogeologico Dell'italia Centro Adriatica (Scala 1: 250.000). Cnr/Gndci-Linea 4-Unità Operativa N° 10 N (Respon. Scientifico-Torquato Nanni).

De Vita, P., Allocca, V., Celico, F., Fabbrocino, S., Mattia, C., Monacelli, G., Musilli, I., Piscopo, V., Scalise, A.R., Summa, G., Tranfaglia, G., Celico P. (2018). Hydrogeology of continental southern Italy. Journal of Maps 14, 230-241, https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1454352

Duscher, K., Günther, A., Richts, A. et al. The GIS layers of the "International Hydrogeological Map of Europe 1:1.500.000" in a vector format. Hydrogeol J 23, 1867-1875 (2015). https://doi.org/10.1007/s10040-015-1296-4

FAO. (2025). AQUASTAT Core Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Database accessed on [2025/03/28]

Fried J.J., Mouton J., Mangano F. (1982) "Studio sulle risorse in acque sotterranee dell'Italia" - Commissione delle Comunità Europee vol. 6 dell'Atlante delle risorse idriche sotterranee della Comunità Europea - "Tema 1 - Acquiferi".

Ferrara V. (1990) - Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna alla scala 1:50.000. C.N.R. - GNDCI. S.EL.CA.. Firenze.

Ferrara V, Pappalardo G. (2008). The Hydrogeological Map Of The Etna Volcanic Massif As Useful Tool For Groundwater Resources Management. Italian Journal Of Engineering Geology And Environment, vol. 1, ISSN: 1825-6635, doi: DOI: 10.4408/IJEGE.2008-01.S-06.

Fioravanti G., Fraschetti P., Lena F., Perconti W., Piervitali E. (2022). I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia. Rapporto ISPRA / Stato dell'Ambiente, 99/2022

Giuliano, G., Mari, G. M., Cavallin, A., & De Amicis, M. (1998). Ricerca sulla vulnerabilità naturale e sul rischio di inquinamento delle acque sotterranee nella pianura padana e veneto friulana. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

Ghiglieri, G., & Da Pelo, S. (2019). Inquadramento idrogeologico della Sardegna e relative problematiche (Andrea Corsale, Giovanni Sistu). Franco Angeli s.r.l.,.

Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M. et al. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature 577, 364-369. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2023). Rapporto sullo stato delle risorse idriche in Italia. https://www.isprambiente.gov.it

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Portale del Servizio Geologico d'Italia (2025) https://portalesgi.isprambiente.it/

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Servizio Geologico d'Italia (2018) Carta Idrogeologica d'Italia - 1:50.000. Nuove linee guida al rilevamento e alla rappresentazione della Carta Idrogeologica d'Italia. "Hydrogeological Map of Italy - 1:50.000 scale. New guidelines to survey and mapping for the Hydrogeological Map of Italy". Quaderni ISPRA-Servizio Geologico d'Italia, serie III, vol.14, Rome, Italy.

Istat - Istituto Nazionale di Statistica. (2019). Utilizzo e qualità della risorsa idrica in Italia. Utilizzo e qualità della risorsa idrica in Italia. Produzione editoriale. Roma, Italia: Istat.

Istat - Istituto Nazionale di Statistica. (2022). Dati ambientali nelle città - Edizione 2022. https://www.istat.it/it/ambiente-e-territorio.

Istat - Istituto Nazionale di Statistica. (2025). Le statistiche sull'acqua - Anni 2020-2024. Statistica report. Roma, Italia: Istat.

Istat - Istituto Nazionale di Statistica. (2024). Le statistiche dell'Istat sull'acqua, anni 2020-2023.

Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S. et al. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. Reg Environ Change 20, 51 (2020). https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9

La Vigna, F., & Mazza, R. (Eds.)(2015). Carta Idrogeologica di Roma-Scala 1: 50.000 "Hydrogeological Map of Rome-Scale 1: 50.000". Roma Capitale. Edizioni PO. LI. GRAF. Pomezia.

Lentini, F. and Carbone, S. (2014) Geology of Sicily. Descriptive Memories of the Geological Map of Italy. Volume XCV, Ed. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia. Codice ISBN 978-88-9311-005-1 S.EL.CA.

Manfredi, M. (1934). Sardegna: Vol. IV (Istituto Poligrafico dello Stato). Ministero LLPP - Servizio Idrografico.

Mari G.M., Tacchia D., Ventura R., Roma M. (2007) Censimento di studi e carte idrogeologiche realizzate nel territorio nazionale. Uno strumento per migliorare le conoscenze sulle risorse idriche sotterranee. Giornale di Geologia Applicata 6 135-140, doi: 10.1474/GGA.2007-06.0-10.0170

Masetti, M., Bersezio, R., Beretta, G.P., Camera, C.A.S., Lucchelli, A., Stevenazzi, S. & Zuffetti, C. (2021). Caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei compresi nelle porzioni collinari e montane ai fini della tutela e gestione delle risorse idriche sotterranee. Università degli Studi di Milano, Regione Lombardia, Milano.

Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia (2014). Le acque sotterranee e l'intrusione marina in Puglia: dalla ricerca all'emergenza nella salvaguardia della risorsa, Vol. 92/2014.

Ministero dell'Ambiente (1997). Relazione sullo stato dell'ambiente, a cura del Servizio valutazione impatto ambientale, informazione ai cittadini e per la relazione sullo stato dell'ambiente. - Roma : Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, - XXIII, 446 p. : ill. ; 30 cm + 3 c. geogr.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2023). Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC). Roma: MASE. https://pnacc.minambiente.it/

Montrasio, A., Bigioggero, B., Brigo, L., Casati, P., Crema-

schi, M., Ferrario, A., Gaetani, M., Gelati, R., Gregnanin, A., Jadoul, F., Orombelli, G., Rossi, P.M., Zuffardi, P., (1990). Carta Geologica della Lombardia scala 1:250.000. Servizio Geologico Nazionale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.

Murgia, F. (2013). Monte Albo—Ricerche speleologiche e studi idrogeologici nel rifugio del Dragone (Vol. 27).

Pala, A. (1999). Le acque fredde della Sardegna. Lineamenti idrogeologici. Fourth European Seminar on Geography of Water, 21.

Petrucci, F., Bortolami G.C., Dal Piaz, G.V., (1970). Ricerche sull'anfitatro morenico di Rivoli-Avigliana (Provincia di Torino) e sul suo substrato cristallino (con carta a colori 1:40.000 e con 4 tavole a colori e due in b.n.) Memorie Soc. It. Sc. Nat. e Museo Civ. St. Nat. Milano 18, 95-169.

Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S. et al. The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. Clim Dyn 56, 3581-3602 (2021).

Raffa, M.; Reder, A.; Marras, G.F.; Mancini, M.; Scipione, G.; Santini, M.; Mercogliano, P. VHR-REA_IT Dataset: Very High Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM. Data 2021, 6, 88. https://doi.org/10.3390/data6080088

Raffa, M., Adinolfi, M., Reder, A. et al. Very High Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. Sci Data 10, 238 (2023). https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9

RAS (2021). Riesame e aggiornamento del Piano di Gestione del Distretto Idrografico della Sardegna-Terzo ciclo di pianificazione 2021-2027. Allegato 2.3 Caratterizzazione, obiettivi e monitoraggio dei corpi idrici sotterranei. https://pianogestionedistrettoidrografico.regione.sardegna.it/index.php?xsl=509&s=76&v=9&c=93824&tb=6695&st=7

RAS (2025) Sardegna Geoportale https://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=mappetematiche

Roma M. & Vitale V. (2008). Strumenti e metodologie informatiche per l'idrogeologia: dai dati alla rappresentazione cartografica- Memorie Descrittive della Carta Geologica D'Italia Vol. LXXXI, pag. 47-58.

Sanna, F., Sanna, L., De Waele, J., & Vigna, B. (2019). Sustainable karst groundwater management in a semiarid region: The case of Su Gologone spring (Sardinia, Italy). Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana, 47, 102-107. https://doi.org/10.3301/ROL.2019.19

Stevenazzi, S., Zuffetti, C., Camera, C.A.S., Lucchelli, A., Beretta, G.P., Bersezio, R. & Masetti, M. (2023). Hydrogeological characteristics and water availability in the mountainous aquifer systems of Italyn Central Alps: a regional scale approach, Journal of Environmental Management, 340, 117958

Taylor, R., Scanlon, B., Döll, P. et al. (2013) Ground water and climate change. Nature Clim Change 3, 322-329.

Thornthwaite, C.W., & Mather, J.R. (1955). The water balance. Laboratory of Climatology, 8, Centerton NJ.

UNESCO (1970). International legend for hydrogeological maps. Hannover/Paris

UNESCO (1983). International legend for hydrogeological maps. Paris, 51 pp.

United Nations (1991) - Ground Water in Western and Central Europe. Department of Technical Co-operation for Development, Natural Resources Water Series No. 27, 187-205, New York

Vitale S. & Ciarcia S. (2018). Carta geologica della Campania.Geologia tecnica & ambientale. - ISSN 1722-0025. - 2/20:(2020), pp. 15-18.

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: typology, mapping, and global significance. Wat. Resour. Res. 43, 1-13.

WISE WFD groundwater body horizons reported under Water Framework Directive 2022 - PUBLIC VERSION - version 1.1, Jul. 2024. (2024). [Data set]. http://data.europa.eu/88u/dataset/24ab186c-41b4-4c1d-9e9f-09a16930a203.

Finito di stampare a Firenze nel mese di giugno 2025
Printed in Florence - June 2025

Carta presentata in occasione del convegno:
Presented at the conference:

flowpath TORINO 2025
11th-13th June | National Meeting on Hydrogeology

Con il patrocinio di:
Under the patronage of:

iah aih
Italian Chapter
Associazione Internazionale Idrogeologi - Gruppo Italiano
International Association of Hydrogeologists - Italian Chapter

***Con la partecipazione di** - With the involvement of:*

ADBPO
Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po

REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali

AUBAC
Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale

Autorità di bacino
REGIONE SICILIANA

AUTORITA' DI BACINO DISTRETTUALE
DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale

Sullo sfondo - *On the background*: EMODnet Bathymetry World Base Layer (EBWBL)

ISBN 978-88-9311-122-5

http://idrogeologia.isprambiente.it
Carta digitale e tabelle fuori testo
Digital map and annex tables