



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

**Valledora: individuazione delle potenziali aree
di ricarica mediante l'uso di immagini
satellitari e tecniche GIS**

Relatore

Prof.ssa Marina De Maio

Candidato

Giorgio Sforzi

N° matricola: 231035

A.A. 2017-2018

SOMMARIO

SOMMARIO	2
Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	6
ABSTRACT	7
CAPITOLO 1	8
La protezione delle acque sotterranee	8
1.1 Concetto di inquinamento delle acque sotterranee	8
1.2 Protezione e prevenzione dell'inquinamento	9
1.3 Obiettivi della Water Framework Directive	10
Relazione di attuazione 2015 - Valutazione del programma di misure	12
1.4 Recepimento della WFD in Italia	13
1.5 Aree di salvaguardia e aree di protezione	18
1.6 Area di ricarica	19
1.7 Destinazione d'uso del suolo	23
Espansione urbanistica	23
Altre destinazioni d'uso del suolo	24
1.8 Criteri per delineare le aree di salvaguardia e di protezione	25
1.9 Stima della ricarica	25
Modellazione numerica	26
Utilizzo di traccianti	27
1.10 La tutela delle acque nella Regione Piemonte	27
L'attuale normativa piemontese	30
CAPITOLO 2	33
Il recepimento della WFD in Europa	33
2.1 Inghilterra	34
2.2 Irlanda	36
2.3 Germania	38
2.4 Slovenia	39
2.5 Svizzera	40
Sorgenti a bassa vulnerabilità	44
Sorgenti vulnerabili in acquifero leggermente eterogeneo	44
Sorgenti vulnerabili in acquifero fortemente eterogeneo	44

CAPITOLO 3	46
Programmi di protezione delle acque nel resto del mondo	46
3.1 Stato di Washington	47
3.2 Sudafrica	48
3.3 Giordania	51
CAPITOLO 4	53
Il problema della Valledora	53
4.1 Studio preliminare	55
Individuazione dell'immagine idonea	56
Preparazione dell'immagine	60
Creazione del DTM	60
Pendenza (Slope)	62
Tipo di suolo (Soil)	64
Geomorfologia (Geomorphology)	67
Uso del suolo/Copertura del suolo (Land use/Land cover)	68
Densità di drenaggio (Drainage density)	71
Densità dei lineamenti (Lineament density)	72
Overlay Analysis	75
CAPITOLO 5	78
Confronto tra le aree di ricarica	78
ALLEGATI	84
Allegato 1: Censimento dei Centri Di Pericolo (CDP) presenti sul territorio	84
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	87
Bibliografia	87
Risorse Web	91
RINGRAZIAMENTI	94

Indice delle figure

Figura 1: Diagramma di flusso dei metodi e delle tecniche per la difesa territoriale delle risorse idriche sotterranee (da Civita M., 2005 - Modificato)	10
Figura 2: Carta idrogeologica dell'Italia (da Civita M., 2005 - Modificata)	14
Figura 3: Mappa dei Distretti Idrografici italiani (da Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare).....	15
Figura 4: Organigramma delle autorità che si occupano dei piani di gestione dei bacini idrografici italiani (da Catalano M., 2015).....	16
Figura 5: Schema delle aree di salvaguardia e le aree di protezione.....	18
Figura 6: Schema dell'area di ricarica di un acquifero	20
Figura 7: Impatto dell'urbanizzazione sul deflusso superficiale in seguito a un evento meteorico (da Mishra N., 2014).....	24
Figura 8: Aree di ricarica degli acquiferi profondi approvate con determinazione n. 268 del 21 luglio 2016: cartografia in scala 1:250.000(da Consiglio regionale del Piemonte, 2016).....	29
Figura 9: Modello idrogeologico, non in scala, in cui vengono rappresentati i circuiti di flusso superficiali, intermedi e profondi. Le aree in cui prevalgono le componenti verticali di flusso dei circuiti intermedi e profondi corrispondono alle aree di ricarica degli acquiferi profondi (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016)	31
Figura 10: Schema idrogeologico semplificato, non in scala, della fascia tampone (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016)	32
Figura 11: Schema generale delle zone di protezione in Europa (da Doveri M., 2015)	34
Figura 12: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica dell'Inghilterra (da WHYMAP Viewer).....	34
Figura 13: Schema di delimitazione delle aree di ricarica in Inghilterra (da Carey M, 2009)	35
Figura 14: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica dell'Irlanda (da WHYMAP Viewer).....	36
Figura 15: Delimitazione delle zone di protezione attorno a una sorgente (da US EPA, 1987 - Modificato).....	37
Figura 16: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Germania (da WHYMAP Viewer)	38
Figura 17: Schema di delimitazione delle aree di ricarica in Germania (da García García A., 2003 - Modificata)	39
Figura 18: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Svizzera (da WHYMAP Viewer) ..	39
Figura 19: Zone di protezione di un acquifero poroso (da Prestor J,, 2008)	40
Figura 20: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Svizzera (da WHYMAP Viewer) ..	41
Figura 21: Schema di delimitazione delle aree di ricarica in Svizzera (da OFEFP, 2003 - Modificata)	42
Figura 22: Zone e aree di protezione delle acque sotterranee (da Ufficio federale dell'ambiente UFAM, 2015).....	43
Figura 23: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica dello Stato di Washington (da WHYMAP Viewer).....	48
Figura 24: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica del Sudafrica (da WHYMAP Viewer) ..	49
Figura 25: Differenti configurazioni di aree di protezione delineate in funzione della tipologia di captazione: (a) foro in campo di flusso uniforme; (b) pozzo trivellato vicino a un percorso di flusso preferenziale; (c) sorgente(d) zone umide o altri ecosistemi (da Nel J. et al, 2009).....	50

Figura 26: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Giordania (da WHYMAP Viewer)	51
Figura 27: Inquadramento dei comuni aderenti. Graficamente sono visibili i confini amministrativi comunali (azzurro), i confini amministrativi regionali (rosso), le aree di ricarica (riempimento giallo), le potenziali aree di ricarica (riempimento in rosso) e le fasce tampone delle aree di ricarica (riempimento in viola). La mappa è stata ottenuta implementando i dati GIS su Google Earth.....	54
Figura 28: Immagine a colori reali presa dal satellite Landsat 7 (da USGS).....	57
Figura 29: Immagine a colori reali presa dal satellite Landsat 8 (da USGS).....	58
Figura 30: Confronto tra immagine a falsi colori ① e la mappa di uso suolo ②.....	58
Figura 31: Immagine a colori reali presa dal satellite Sentinel 2: nella parte superiore sono riportate le due immagini prese singolarmente, nella parte inferiore si riporta l'immagine in seguito alla creazione di un "mosaic" che ha portato all'unione delle due (da USGS).....	59
Figura 32: Falsi colori dell'immagine presa dal satellite Sentinel 2 (da USGS)	60
Figura 33: A sinistra il DTM dell'area d'interesse ottenuto considerando le due regioni adiacenti (in blu è indicata la Valle d'Aosta e in rosso il Piemonte), a destra la rispettiva immagine satellitare dell'area.....	61
Figura 34: DTM dell'area d'interesse utilizzabile per la realizzazione delle mappe successive....	61
Figura 35: Immagine satellitare dell'area d'interesse	62
Figura 36: Mappa tematica della pendenza.....	62
Figura 37: Mappa tematica della pendenza con i punteggi.....	63
Figura 38: Mappa dei complessi idrogeologici.....	64
Figura 39: Mappa geomorfologica con i punteggi	66
Figura 40: Curve di livello	67
Figura 41: Mappa tematica della geomorfologia.....	68
Figura 42: Mappa tematica di uso del suolo	69
Figura 43: Mappa tematica di uso del suolo con i punteggi	70
Figura 44: Mappa dei corsi d'acqua della zona	71
Figura 45: Mappa tematica della densità di drenaggio.....	71
Figura 46: Mappa tematica della densità di drenaggio con i punteggi.....	72
Figura 47: Distribuzione dei lineamenti	73
Figura 48: Mappa tematica della densità dei lineamenti	74
Figura 49: Mappa tematica della densità dei lineamenti con i punteggi.....	74
Figura 50: Mappa tematica ottenuta dalla sovrapposizione delle diverse mappe tematiche	76
Figura 51: Mappa tematica del contributo alla ricarica	77
Figura 52: Riassunto delle mappe realizzate per definire le potenziali aree di ricarica	78
Figura 53: Mappa tematica del contributo alla ricarica con i confini comunali	79
Figura 54: Aree di ricarica individuate dalla Regione nel D.D. n. 268 del 21 luglio 2016	79
Figura 55: Zoom sulle aree di maggior contributo in prossimità dei comuni aderenti	80
Figura 56: Confronto tra le aree di ricarica	81
Figura 57: Confronto di dettaglio tra le mappe	82

Indice delle tabelle

Tabella 1: Identificazione delle principali lacune nei primi Piani di Gestione del Bacino (da European Commission, 2015 - Modificata).....	13
Tabella 2: Schema riassuntivo della classificazione dei corpi idrici sotterranei (CIS) per quanto riguarda lo stato chimico.....	18
Tabella 3: Panoramica dei metodi suggeriti da ciascuna Regione (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016 - Modificata)	22
Tabella 4: Sensibilità della ricarica delle acque sotterranee al cambio di uso del suolo nel bacino idrografico di Nete. La sensibilità, dato in parentesi come percentuale, viene calcolato assumendo una conversione completa del bacino a un uso del suolo per un dato stato climatico (da Leterme B., 2011 – Modificata)	25
Tabella 5: Schema riassuntivo dei gradi di vulnerabilità delle differenti aree (da Department of the Environment and Local Government Environmental Protection Agency Geological Survey of Ireland, 1999 - Modificato)	37
Tabella 6: Definizione delle zone di protezione in funzione del fattore di sicurezza "F" (da Pochon A., 2008)	45
Tabella 7: Classificazione della pendenza	63
Tabella 8: Classificazione del suolo dal punto di vista geologico	66
Tabella 9: Classificazione della geomorfologia	68
Tabella 10: Classificazione dell'uso del suolo/copertura del suolo	70
Tabella 11: Classificazione della densità di drenaggio	72
Tabella 12: Classificazione della densità dei lineamenti	73
Tabella 13: Riassunto delle informazioni delle differenti mappe tematiche e rispettivi pesi	75

ABSTRACT

Le acque sotterranee sono una risorsa fondamentale per le acque ad uso domestico, in particolare per l'uso potabile. La necessità di proteggere queste acque è molto elevata poiché, a causa della loro posizione, una volta contaminate risulta complesso ed oneroso ristabilire un buon grado qualitativo delle stesse.

Tra le aree maggiormente sensibili presenti sul territorio piemontese vi è sicuramente la Valledora. Quest'area è particolarmente sensibile a causa dell'elevata attività estrattiva che si svolge al suo interno. Questa attività è legata soprattutto all'abbondante presenza di ghiaie e sabbie, utili a diversi scopi lavorativi, alla quale viene associata una forte richiesta di materiale anche dalle aree limitrofe. Le acque reflue provenienti dalle varie fasi estrattive e lavorative, vengono spesso rilasciate in ambiente senza idonei processi di trattamento finalizzati a un miglioramento della qualità. Questi reflui, penetrando nell'acquifero sottostante, vanno a contaminare le acque che saranno poi utilizzate per soddisfare le necessità idriche dei vari comuni. Al termine dell'attività estrattiva segue una conversione di queste aree in discariche a cielo aperto. Eventuali errori commessi in fase di progettazione sfociano spesso in una fuoriuscita di percolato che contribuisce alla contaminazione delle acque.

Da qui è nata la necessità di individuare le potenziali aree di ricarica con un grado di dettaglio migliore rispetto a quello usato per la definizione delle aree di ricarica da parte della Regione. La finalità è quella di avanzare, in seguito anche a mirate indagini in sito, delle adeguate proposte al fine di migliorare sia le leggi atte alla tutela delle acque sotterranee, specie quelle destinate ad uso potabile, sia l'estensione delle aree di ricarica.

Con questo elaborato si vuole procedere dunque a una prima individuazione delle potenziali aree di ricarica mediante l'utilizzo d'immagini satellitari e di tecniche GIS. Queste aree sono da intendersi come zone che, grazie alle loro caratteristiche di pendenza, geomorfologia, uso suolo, tipo di suolo, densità di drenaggio e densità dei lineamenti, danno un buon contributo alla ricarica degli acquiferi profondi.

Al fine di comprendere meglio come poter affrontare il problema delle aree di ricarica, si è fatta una ricerca su come alcuni Stati, europei ed extra-europei, affrontano il problema della protezione delle acque dal punto di vista operativo. Queste soluzioni possono essere eventualmente prese come punto di riferimento per una eventuale modifica delle adozioni fatte sul territorio italiano.

Keywords: Aree di ricarica, GIS, Immagini satellitari, Valledora, Acque sotterranee

CAPITOLO 1

La protezione delle acque sotterranee

Le acque contenute nel sottosuolo, definite sotterranee, sono una pregiata risorsa per l'uomo che le sfrutta in maniera massiccia con diverse finalità: uso potabile, industriale e agricolo. Risulta quindi necessaria l'adozione di apposite normative che consentano un corretto sfruttamento di questa risorsa e ne garantiscano, al tempo stesso, il mantenimento in termini qualitativi e quantitativi.

A partire dalla fine degli anni '90, l'utilizzo delle risorse idriche ha subito un forte sviluppo in termini di legiferazione. In particolare, per quanto riguarda le acque sotterranee, viene introdotto un approccio comunitario, a livello europeo, grazie all'introduzione nel 2000 della Water Framework Directive 2000/60/CE (WFD), "Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque".

Lo scopo della WFD è di specificare i punti chiave che ciascuno Stato, appartenente all'Unione Europea (EU), deve adottare per impedire il deterioramento dei corpi idrici e consentire quindi il raggiungimento del "buono stato" dei fiumi, dei laghi e delle acque sotterranee entro il 2015.

Questi punti fondamentali prevedono di proteggere tutte le forme di acqua (superficiali e sotterranee), di ripristinare sia gli ecosistemi interni ai corpi idrici sia quelli esterni agli stessi e ridurre l'inquinamento garantendone un uso sostenibile delle acque da parte degli individui e delle imprese.

A integrazione della direttiva Acque, il Parlamento e il Consiglio europeo hanno introdotto la direttiva 2007/60/CE, denominata "Direttiva Alluvioni", con la quale viene imposto a ciascuno degli Stati membri di individuare, valutare e mappare i rischi e i pericoli di alluvione. Con riferimento a questa fase di studio e mappatura, ciascuno Stato deve poi definire e adottare un piano di gestione del rischio.

Gli Stati aderenti all'UE sono infine tenuti a redigere il Programma di Misure, all'interno del quale vengono sintetizzate le misure adottate per il raggiungimento degli obiettivi prefissati nei Piani di Gestione dei bacini idrografici.

1.1 Concetto di inquinamento delle acque sotterranee

Un concetto fondamentale che sta alla base della protezione delle acque, così come del suolo e dell'aria, è quello di inquinamento.

L'inquinamento, come la stessa Direttiva 2000/60/CE introduce all'Art. 2, viene definito come "l'introduzione diretta o indiretta, a seguito di attività umana, di sostanze o di calore nell'aria, nell'acqua o nel terreno, che possono nuocere alla salute umana o alla qualità degli ecosistemi acquatici o degli ecosistemi terrestri che dipendono direttamente da ecosistemi acquatici, perturbando, deturpando o deteriorando i valori ricreativi o altri legittimi usi dell'ambiente".

L'inquinamento antropico può essere originato da fonti puntuali e fonti diffuse. Le prime, più correttamente individuate con il termine tecnico di centri di pericolo (CDP), sono legate alle

attività antropiche più varie, situate all'interno degli insediamenti urbani e industriali. Le fonti diffuse (FDP) sono quelle connesse all'attività agricola e zootecnica.

Esistono tuttavia fonti d'inquinamento naturali dovute alla presenza di sostanze naturali all'interno della formazione. Tali elementi d'inquinamento, definiti puntuali, sono ad esempio i sali e i minerali presenti nell'idrostruttura. Ci sono poi fonti d'inquinamento non puntuali, o diffuse, tra le quali si evidenzia per esempio l'infiltrazione di acqua marina appartenente agli acquiferi marini all'interno degli acquiferi costieri. L'inquinamento naturale, seppur di assodata presenza in molti acquiferi, è un fenomeno che difficilmente può essere arginato.

1.2 Protezione e prevenzione dell'inquinamento

La vulnerabilità di un acquifero è la facilità con cui questo può essere danneggiato da un inquinante proveniente dalla superficie del suolo. A un maggiore grado di vulnerabilità corrisponde una maggiore facilità di propagazione, a cui corrisponde a sua volta una rapida degradazione della qualità delle acque. La protezione e la prevenzione delle acque sotterranee da possibili elementi inquinanti sono garantite grazie all'applicazione di sistemi di difesa di punto e a tutto campo (Figura 1).

I sistemi di difesa di punto sono costituiti da tutte quegli interventi che la legge impone al fine di proteggere ciascuna fonte di approvvigionamento e ciascun pozzo presente nell'area. Questi sistemi prevedono l'individuazione di un'area di salvaguardia e una di protezione, che vengono descritte in maniera approfondita nel paragrafo successivo.

I sistemi di difesa a tutto campo si basano prevalentemente sulla conoscenza dettagliata della sensibilità dell'acquifero nei confronti delle attività, e all'inquinamento a esse collegato, presenti sul territorio interessato. L'elevato grado di dettaglio consente, a sua volta, di realizzare delle carte di vulnerabilità che permettono di avere una panoramica completa della "susceptibilità specifica dei sistemi acquiferi ad ingerire e diffondere, sia pure mitigandone gli effetti, un inquinante idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità delle acque nello spazio e nel tempo"¹. Uno dei principali problemi legato alla realizzazione e all'utilizzo di queste carte, è la variabilità stagionale dei livelli della falda. Questo comporta la necessità di realizzare differenti carte che rappresentino i differenti scenari. In letteratura sono presenti diversi metodi per la realizzazione delle mappe, a ciascuno dei quali corrispondono differenti dati di input. A titolo di esempio si cita il metodo SINTACS, il metodo base GNDCI-CNR e il metodo DRASTIC.

Per un maggiore grado di dettaglio delle caratteristiche e delle applicazioni di questi e di altri metodi, si rimanda alle "Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento"².

¹ Civita M. (1987). "La previsione e la prevenzione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità". Atti Conv.: "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione, Mantova".

² Civita M., De Maio M., Farina M., Zavatti A. (2001). "Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento".

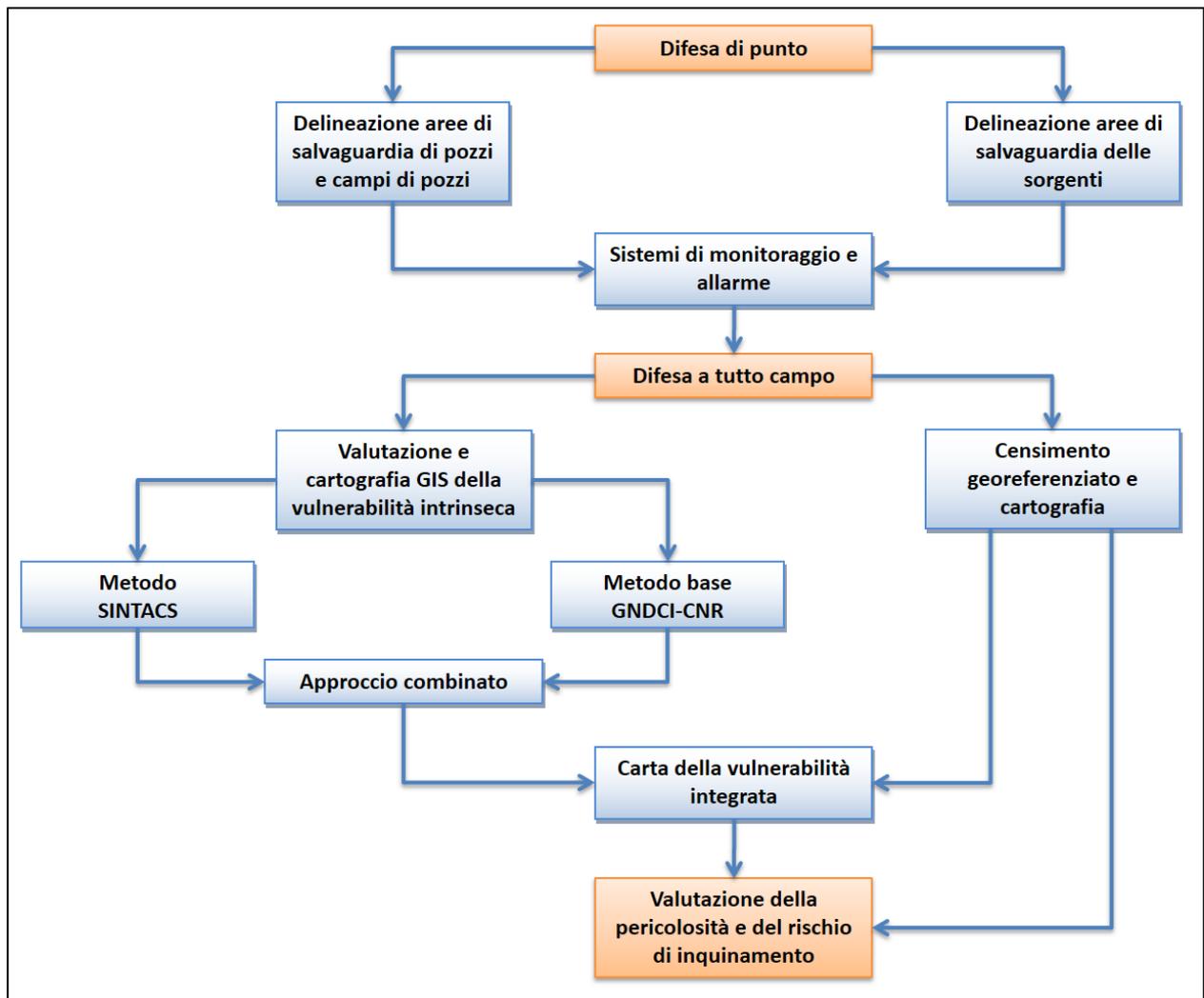


Figura 1: Diagramma di flusso dei metodi e delle tecniche per la difesa territoriale delle risorse idriche sotterranee (da Civita M., 2005 - Modificato)

1.3 Obiettivi della Water Framework Directive

L'obiettivo principale della Direttiva europea sulle acque (Art. 4) consiste nel migliorare, o al massimo mantenere, le caratteristiche qualitative degli ambienti acquatici. Per fare ciò essa si fa forza sul principio del "chi inquina paga", secondo cui si impongono forti sanzioni, a livello sia economico che penale, nei confronti di chi è responsabile di causare danno ambientale. Tale principio non solo impone l'obbligo di risarcimento dei danni ambientali a carico del (o dei) responsabile dell'inquinamento, ma giustifica anche l'applicazione di sanzioni e di eco-tasse ai produttori, al fine di sollecitarli a ridurre l'inquinamento.

Gli aspetti di maggiore interesse riguardano l'identificazione sul territorio di ciascuno Stato membro dei bacini idrografici³ e la loro assegnazione ai distretti idrografici⁴ di competenza. Nel caso di bacini di piccole dimensioni, questi possono essere accorpati e assoggettati a un unico

³ Direttiva 2000/60/CE, Art. 2: "Il territorio nel quale scorrono tutte le acque superficiali attraverso una serie di torrenti, fiumi ed eventualmente laghi per sfociare al mare in un'unica foce, a estuario o delta."

⁴ Direttiva 2000/60/CE, Art. 2: "Area di terra e di mare, costituita da uno o più bacini idrografici limitrofi e dalle rispettive acque sotterranee e costiere che, è definito la principale unità per la gestione dei bacini idrografici."

distretto. Spetta poi a ogni singolo Stato il compito di adottare le adeguate disposizioni per la gestione dei singoli bacini e di garantirne il rispetto all'interno degli stessi. Per ciascun distretto idrografico, ogni Stato deve predisporre un apposito Piano di Gestione (PdG) del Bacino Idrografico finalizzato al raggiungimento degli obiettivi ambientali prefissati: ciascun Piano di Gestione contiene i programmi da attuare al fine di raggiungere uno stato delle acque⁵(e dell'ambiente) "buono".

I punti che ciascun Piano deve andare a considerare sono quelli riportati dell'Allegato VII della WFD, che possono schematicamente essere riassunti nel seguente modo (elenco riportato direttamente dalla direttiva):

- La descrizione generale delle caratteristiche del distretto;
- La sintesi delle pressioni e degli impatti delle attività umane sui corpi idrici superficiali e sotterranei;
- L'elenco e la rappresentazione delle aree protette;
- La mappa delle reti di monitoraggio;
- L'elenco degli obiettivi ambientali per tutti i corpi idrici;
- La sintesi dell'analisi economica;
- La sintesi dei programmi di misure (compresi quelli più dettagliati per sottobacino, settori o per problematiche specifiche, nonché le misure adottate);
- L'elenco delle autorità competenti e le procedure per ottenere la documentazione e le informazioni di base.

Per ogni distretto idrografico, come riporta l'articolo 11, gli Stati devono predisporre di programmi di monitoraggio dello stato delle acque, finalizzati a valutarne lo stato chimico-fisico ed ecologico, sia di quelle superficiali che di quelle sotterranee. Questi programmi contengono le misure obbligatorie di base, le misure adottate da ciascuno Stato prima dell'introduzione della direttiva Europea e delle direttive da essa derivanti, eventuali misure integrative supplementari necessarie a raggiungere gli obiettivi ambientali. Per raggiungere tali obiettivi, è tuttavia necessaria l'attuazione di diversi altri regolamenti e direttive. La tutela delle acque è, infatti, un ambito interdisciplinare che va a interagire con molti altri ambiti, le cui direttive ricoprono un ruolo importante nella lotta contro l'inquinamento. Tali direttive devono quindi essere prese in considerazione nei Piani di Gestione dei bacini idrografici e nei Piani di Misure: ne sono un esempio le direttive relative al trattamento delle acque reflue urbane, all'uso sostenibile dei pesticidi e alle emissioni industriali.

Un aspetto che viene preso in considerazione all'interno della WFD è l'estrazione dal sottosuolo di acqua in quantità superiore alla capacità naturale di rinnovamento della falda, fenomeno responsabile di impatti negativi sulle acque superficiali e sotterranee. Secondo una relazione di sintesi redatta dalla Commissione europea nel 2012, l'estrazione eccessiva colpisce il 10% dei corpi idrici superficiali e il 20% dei corpi idrici sotterranei. Per limitare questo eccessivo sfruttamento, la direttiva impone "di adottare misure atte a ripristinare la sostenibilità sul

⁵ Direttiva 2000/60/CE, Art. 2: "Espressione complessiva dello stato di un corpo idrico sotterraneo (o superficiale), determinato dal valore più basso del suo stato quantitativo e chimico (ecologico e chimico)."

lungo termine dell'estrazione, come la revisione delle licenze o il rafforzamento della capacità di far rispettare le norme".

Ultimo punto da considerare è quello riguardante le sostanze classificate come "fortemente inquinanti e pericolose": la direttiva prevede, a tal proposito, che vengano adottate apposite misure finalizzate a combattere l'inquinamento idrico. È la stessa Direttiva 2000/60/CE a riportare, nell'Allegato VIII, l'elenco delle sostanze definite tali. Si citano, a titolo esemplificativo, i composti organo-alogenati e le sostanze che possano dare origine a tali composti nell'ambiente acquatico, i metalli e l'arsenico e i relativi cianuri, gli idrocarburi persistenti, le sostanze organiche tossiche persistenti e i bioaccumulabili.

Relazione di attuazione 2015 - Valutazione del programma di misure

Conformemente a quanto riportato nella WFD, nel 2015 la Commissione ha pubblicato una relazione in cui viene fatto il punto della situazione sull'attuazione della direttiva alla scadenza del primo Piano di Gestione. All'interno di questa relazione sono stati indicati i progressi raggiunti da ciascuno Stato in merito ai programmi di misure e nel rispetto dei Piani di Gestione dei Bacini Idrografici. I risultati ottenuti si basano sull'analisi dei progressi compiuti da ciascuno Stato e riporta suggerimenti in merito a migliorie da apportare nei futuri programmi di misure.

La precedente relazione, datata 2012, ha evidenziato molte inadeguatezze e lacune all'interno dei Programmi di Misure. Nella Tabella 1 vengono messe in evidenza le principali carenze, per ciascuno Stato, con riferimento all'analisi delle pressioni e ai relativi impatti, ai metodi di valutazione dello stato delle reti di monitoraggio e con riferimento alla qualità del monitoraggio.

Al fine di programmare in maniera adeguata il secondo Piano di Gestione, è necessario procedere al sopperimento di queste mancanze molte delle quali, come si può notare, risultano comuni ai diversi Stati. In primis si evidenzia la necessità di migliorare la valutazione delle pressioni idromorfologiche: in alcuni Stati si è, infatti, evidenziato un grado di dettaglio non idoneo al raggiungimento degli obiettivi prefissati, dovuto in alcuni casi alla difficoltà nella definizione di tutti gli scenari possibili. Questa carenza, essendo l'analisi delle pressioni alla base degli steps successivi, può comportare gravi errori di valutazione e di programmazione della pianificazione.

Un altro gap significativo, direttamente collegato al precedente, riguarda i metodi con cui si esegue la valutazione delle pressioni: se non risultano sufficientemente sensibili alle pressioni idromorfologiche, i metodi adottati non consentono di rilevare lo stato di degrado ecologico. Ne consegue l'impossibilità nell'adottare soluzioni adeguate di intervento.

La necessità di un elevato grado di miglioramento, è stata evidenziata per quanto riguarda il monitoraggio dello stato chimico delle acque superficiale e sotterranee che ha causato forti carenze all'interno dei vari piani statali. La mancanza di informazioni sufficienti e adeguate relative allo stato delle acque superficiali, ha portato all'adozione di inadeguati metodi di valutazione dello stato chimico e quantitativo delle acque sotterranee. Questa mancanza è legata soprattutto al non considerare il forte grado di interconnessione tra le due tipologie di acqua.

Tabella 1: Identificazione delle principali lacune nei primi Piani di Gestione del Bacino (da European Commission, 2015 - Modificata)

Stato membro	Analisi delle pressioni e dei relativi impatti	Metodi di valutazione dello stato	Reti di monitoraggio
Austria (AT)	✓✓	✓✓	✓✓
Belgio (BE)	✓	✓	✓✓
Bulgaria (BG)	✓	✓	✓
Cipro (CY)	✓	✓	✓
Rep. Ceca (CZ)	✗	✓✓	✓✓
Germania (DE)	✓✓	✓	✓
Danimarca (DK)	Non valutato	Non valutato	Non valutato
Estonia (EE)	✓	✓	✓
Grecia (EL)	✓	✗	✗
Spagna (ES)	✓	✓	✓
Finlandia (FI)	✓✓	✓✓	✓✓
Francia (FR)	✓✓	✓	✓
Croazia (HR)	✓	✗	✗
Ungheria (HU)	✓	✓	✓
Irlanda (IE)	✓	✓	✓
Italia (IT)	✓	✗	✗
Lituania (LT)	✓	✓	✓
Lussemburgo (LU)	✓	✓	✓
Lettonia (LV)	✓	✓	✓
Malta (MT)	✓	✗	✗
Paesi Bassi (NL)	✓✓	✓✓	✓✓
Polonia (PL)	✓	✗	✗
Portogallo (PT)	✓	✓	✓
Romania (RO)	✓	✓	✓
Svezia (SE)	✓	✓	✓
Slovenia (SI)	✗	✓	✓
Slovacchia (SK)	✓✓	✓	✓
Regno Unito (UK)	✓✓	✓	✓
Legenda			
✓✓	Adeguate adozioni nel primo Piano di Gestione del Bacino		
✓	Mancanze significative nel primo Piano di Gestione del Bacino		
✗	Gravi mancanze significative nel primo Piano di Gestione del Bacino		

1.4 Recepimento della WFD in Italia

Il territorio italiano è piuttosto ricco di risorse idriche sotterranee. Come è possibile osservare dalla Figura 2, l'Italia è caratterizzata da una vasta rete di acque sotterranee e punti sorgivi. Tuttavia, a causa dell'esponentiale sviluppo tecnologico e industriale, è risultato necessario adottare appositi provvedimenti: la crescita dell'industrializzazione, l'introduzione di prodotti chimici nei fertilizzanti e altri prodotti agricoli hanno portato a una sempre più evidente necessità di adottare normative e regolamenti attui a preservare il grado di qualità delle acque.

Anche l'eccessiva estrazione di acqua dal sottosuolo, specie se in condizioni di siccità e/o di forte presenza di inquinanti, costituisce un impatto non trascurabile sulle acque, avente spesso conseguenze disastrose. Tra le principali si possono mettere in evidenza l'incremento e l'estensione dei processi di inquinamento nelle zone ad uso intensivo del territorio e l'incremento dell'intrusione marina nelle zone costiere. Una soluzione a questo tipo di problema è l'applicazione di criteri di sfruttamento in base la destinazione d'uso: un esempio è l'andare a limitare l'uso delle acque sotterranee destinate all'irrigazione.

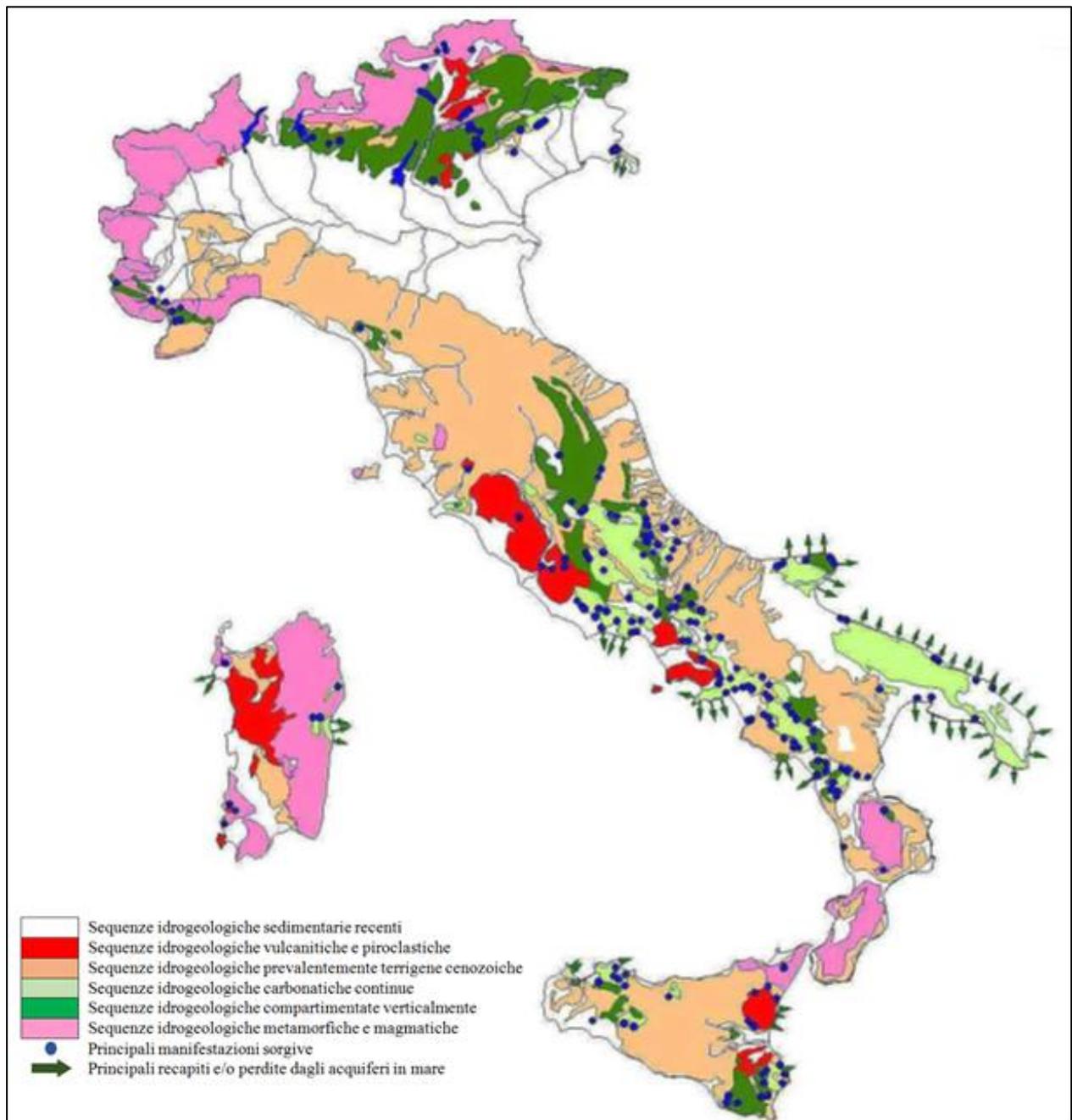


Figura 2: Carta idrogeologica dell'Italia (da Civita M., 2005 - Modificata)

Altri pesanti impatti, assimilabili al fenomeno del sovrasfruttamento per i quali però non esiste alcuna possibilità di reversibilità, sono prodotti dalla realizzazione di scavi in sottosuolo, con riferimento non solo alle opere viarie ma anche a quelle minerarie di elevata importanza.

Queste, di fatto, creano delle modificazioni irreversibili alla struttura dell'acquifero, andando a ridurre di conseguenza la capacità di immagazzinamento dello stesso.

Si può dunque affermare che "l'Italia nel suo insieme sarebbe piuttosto ricca di risorse idriche sotterranee, certamente le più pregiate, se non fossero minacciate da processi di deterioramento che influenzano pesantemente i piani regionali d'utilizzo e protezione delle risorse stesse all'interno della pianificazione territoriale"⁶. Da qui la necessità di adottare linee generali in grado di tutelare queste risorse pregiate.

La Water Framework Directive è stata recepita in Italia attraverso il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale". Tale decreto prevede la suddivisione del territorio nazionale in 8 distretti idrografici (Figura 3) e, per ciascuno di essi, prevede che venga redatto il sopra citato Piano di Gestione e ne attribuisce la gestione alle Autorità di distretto idrografico.



Figura 3: Mappa dei Distretti Idrografici italiani (da Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare)

⁶ Civita M. (Febbraio, 2008). "L'assetto idrogeologico del territorio italiano: risorse e problematiche".

Mentre le Regioni sono responsabili di garantire l'attuazione delle direttive contenute nella direttiva quadro delle acque in Italia, il Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare è l'organo nazionale incaricato di garantirne il rispetto.

Ciascun distretto idrografico ha al suo interno un'autorità responsabile di redigere il proprio Piano di Gestione che, una volta approvato dal Presidente del Consiglio dei Ministri, "ha efficacia vincolante per le amministrazioni e gli enti pubblici"⁷.

Molti di questi PdG hanno un certo grado di interazione con i piani settoriali (si citano ad esempio quelli relativi allo sviluppo rurale e quelli relativi allo sfruttamento e allo sviluppo delle energie rinnovabili) delle varie Regioni o, in alcuni casi, provinciali.

Nella Figura 4 viene riportato l'organigramma di tutte le autorità che sono coinvolte nella definizione e della gestione dei Piani di Gestione dei bacini.

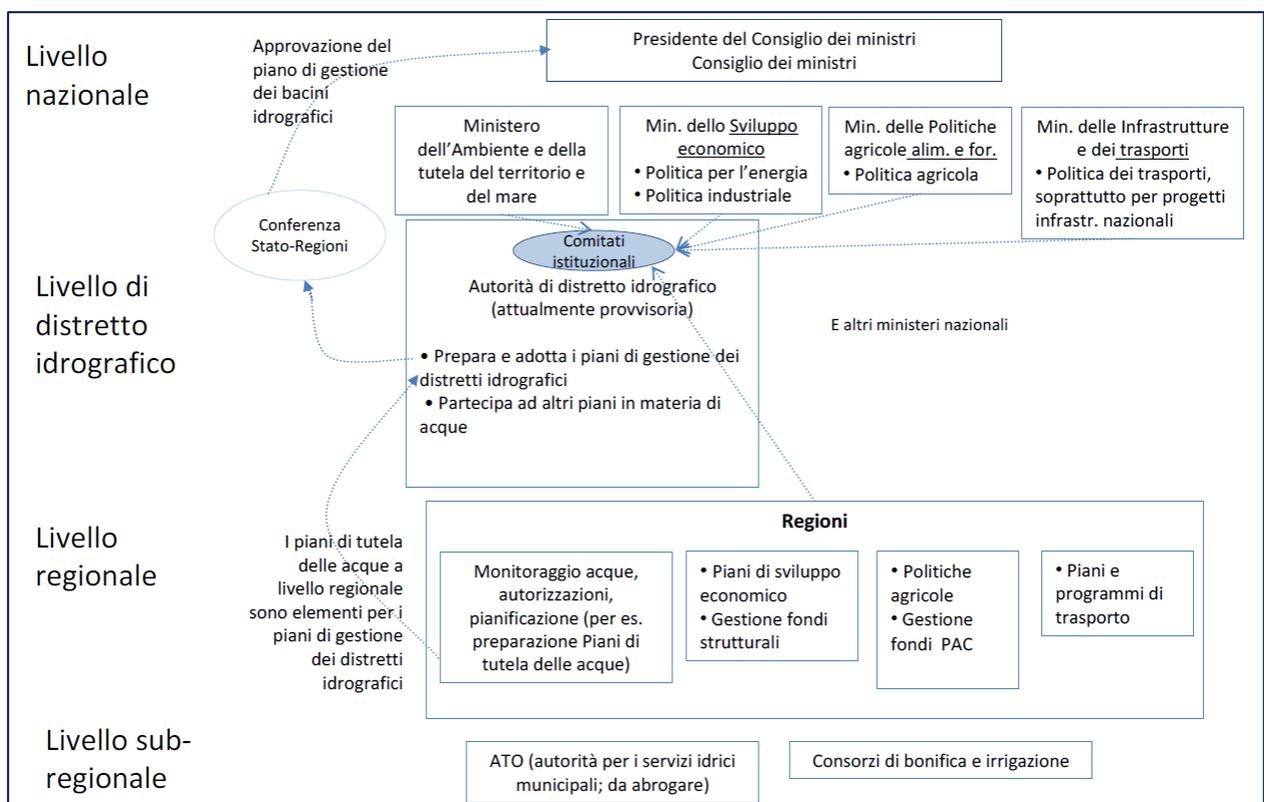


Figura 4: Organigramma delle autorità che si occupano dei piani di gestione dei bacini idrografici italiani (da Catalano M., 2015)

Un aspetto importante da non sottovalutare all'interno dei PdG è quello che riguarda le modalità e i criteri di monitoraggio delle acque. A tal proposito, nel 2014, il Consiglio Federale delle Agenzie Ambientali, decreta, con riferimento anche al D. Lgs. 30/09, le "Linee guida per la progettazione di reti e programmi di monitoraggio delle acque". La finalità di questo documento è quella di definire le modalità con cui progettare le reti di monitoraggio e definire, in funzione della tipologia di monitoraggio e della categoria di acqua, quali siano i programmi di attività da attuare in maniera da rispettare i requisiti minimi, necessari a garantire la coerenza con la normativa nazionale e rendere i risultati confrontabili su tutto il territorio.

⁷ Decreto Legislativo 152/2006, Art. 65, Paragrafo 4.

Per quanto concerne le acque sotterranee, la WFD prevede la definizione dello stato quantitativo e chimico di ciascun corpo idrico sotterraneo. È quindi necessario provvedere alla realizzazione di due distinte reti di monitoraggio (una per ciascun parametro), aventi struttura idonea alla tipologia, all'estensione areale, alle pressioni antropiche presenti e alla velocità di rinnovamento delle acque di ciascun corpo idrico. In alcuni casi al fine di ottimizzare i monitoraggi, sia dal punto di vista economico sia da quello dell'efficacia, è possibile raggruppare i corpi idrici in funzione dell'analisi di rischio effettuata sui corpi stessi.

Definite le caratteristiche delle reti, è necessario procedere con la definizione del programma di monitoraggio. Per quanto riguarda la rete quantitativa il programma di monitoraggio risulta relativamente semplificato in quanto è sufficiente definire le frequenze con cui eseguire le misure. Solo nel caso di corpi idrici ubicati in prossimità del mare è necessario eseguire anche una misurazione della conducibilità elettrica al fine di determinare l'influenza che l'oscillazione del cuneo salino⁸ ha sulla qualità della risorsa idrica. La frequenza del monitoraggio deve essere definita in funzione della variabilità del livello/portata dell'acqua sotterranea nell'arco dell'anno in modo da ottenerne i valori minimi e massimi. Nelle zone di ricarica degli acquiferi di pianura occorre aumentare in numero di stazioni di monitoraggio e la frequenza di misura. All'interno di un corpo idrico si avrà quindi una zona periferica in cui si avrà un numero di stazioni di misurazione ridotto che acquisiscono dati in maniera meno frequente rispetto alla zona centrale (o comunque di maggior rilievo), caratterizzata da una maggior densità di strumenti di misura. Altro accorgimento è l'uso di sistemi di monitoraggio automatici, per la misurazione dei massimi e minimi di ricarica, in corrispondenza di quelle zone fortemente influenzate dalla pressione antropica. Altrove la variazione del flusso di ricarica è sufficiente un sistema manuale.

A differenza di quanto appena detto sulla rete quantitativa, quella per la misurazione delle proprietà chimiche deve essere costituita esclusivamente da sistemi di tipo manuale da cui si preleva l'acqua e la si sottopone a diverse prove di laboratorio. In questo caso nel programma di monitoraggio, oltre alla definizione della frequenza di campionamento, viene definito il protocollo da seguire per la conservazione dei campioni e le analisi di laboratorio degli stessi.

Al termine dei campionamenti e delle successive analisi, estremamente importante è la corretta interpretazione dei risultati. Lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei può essere classificato come buono o scarso. A causa della complessità dell'argomento, è la stessa WFD (e conseguentemente la normativa italiana) a non esprimere in maniera chiara la metodologia specifica per l'attribuzione delle acque a una delle due classi. Si specifica tuttavia che per la definizione della classe più idonea, si ritiene opportuno effettuare approfondimenti e valutazioni in funzione delle tipologie di acquifero e dei complessi idrogeologici.

Anche la definizione dello stato chimico prevede la distinzione delle acque in due categorie: buono e scarso. A differenza dello stato quantitativo, per la definizione dello stato chimico delle acque sotterranee vengono adottati gli standard di qualità ambientale ed i valori soglia individuati a livello nazionale, riportati nell'Allegato 3 del D. Lgs. 30/09⁹. Aspetto da non sottovalutare è la definizione dei valori naturali di fondo dei principali contaminanti: può

⁸ Fenomeno secondo cui il flusso di acqua salata che penetra all'interno di un acquifero crea una superficie di separazione tra l'acqua dolce dell'acquifero e l'acqua salata.

⁹ Si faccia in particolare riferimento alle tabelle 2 e 3 della Parte A dell'Allegato 3 del D. Lgs. 30/09.

accadere infatti che durante la fase di monitoraggio si registrino alti valori di un dato contaminante all'interno delle acque, tuttavia queste anomalie non sono legati alla presenza antropica nella zona ma semplicemente alla presenza di sostanze naturalmente disciolte in acqua. La definizione dei valori di fondo è la base dell'applicazione dei valori soglia per la definizione dello stato chimico.

L'Art. 4 del D. Lgs. 30/09, definisce come attribuire lo stato chimico buono per i corpi idrici sotterranei: "lo standard di qualità delle acque sotterranee o il valore soglia è superato in uno o più siti di monitoraggio, che comunque rappresentino non oltre il 20 per cento dell'area totale o del volume del corpo idrico, per una o più sostanze". Definita la qualità delle acque di ciascun campione prelevato, si procede con la classificazione dell'intero corpo idrico sotterraneo (Tabella 2):

Tabella 2: Schema riassuntivo della classificazione dei corpi idrici sotterranei (CIS) per quanto riguarda lo stato chimico

	CIS scarso	CIS buono
Se area/volume complessiva in stato buono	< 80%	> 80%
Se area/volume complessiva in stato scarso	> 20%	< 20%

Come precedentemente accennato, nei primi piani di gestione il monitoraggio operativo non risultava idoneo a classificare lo stato delle acque sotterranee. È stato previsto lo sviluppo di una nuova rete di monitoraggio in grado di evidenziare i collegamenti tra il monitoraggio e pressioni.

1.5 Aree di salvaguardia e aree di protezione

Al fine di mantenere lo stato delle acque all'interno della classe definita come buona, l'articolo 94 del D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, impone a ciascuna Regione l'obbligo di definire delle aree di salvaguardia e le aree di protezione (Figura 5).

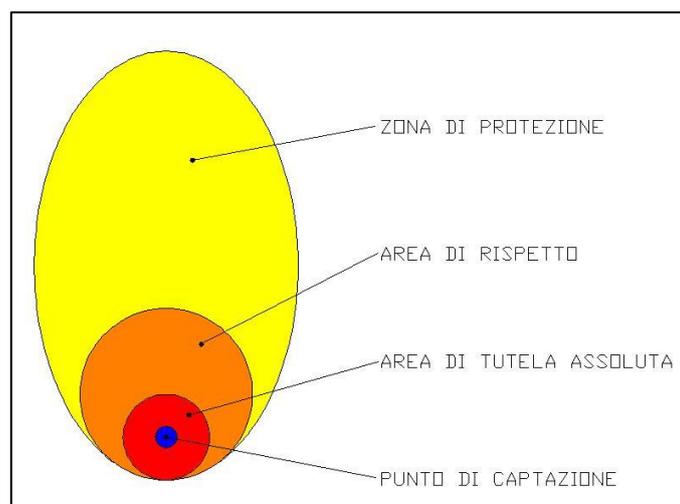


Figura 5: Schema delle aree di salvaguardia e le aree di protezione

L'area di salvaguardia si divide a sua volta in area di tutela assoluta e area di rispetto. L'area di tutela assoluta ha una estensione di 10 metri attorno alla fonte di approvvigionamento che si vuole proteggere. È l'area caratterizzata da un grado di vincolo molto elevato: al suo interno

infatti è possibile provvedere alla realizzazione dell'opera di captazione e le strutture accessorie ad essa necessarie. È vietata qualsiasi altra tipologia di uso del suolo.

L'area di rispetto, invece, coinvolge quella porzione di terreno, attorno alla fascia di tutela assoluta, da sottoporre a vincoli di utilizzo tali da garantire il mantenimento delle buone qualità della risorsa idrica. L'area ha una estensione definita dalle singole Regioni in funzione delle necessità e delle caratteristiche in sito. Qualora non vi fossero particolari vincoli l'estensione la si assume di almeno 200 metri di raggio rispetto al punto di captazione. È la Direttiva stessa a definire quali sono attività che devono essere impedito all'interno di questa fascia. Tra le principali è possibile citare (elenco citato direttamente dalla normativa):

- La dispersione di fanghi e acque reflue, anche se depurati;
- La dispersione nel sottosuolo di acque meteoriche proveniente da piazzali e strade;
- L'apertura di pozzi, ad eccezione di quelli che estraggono acque destinate al consumo umano;
- Realizzazione di pozzi perdenti;
- Fognature.

Le zone di protezione vengono regolamentate dall'articolo 94, commi 7 e 8, in cui si stabilisce che "le zone di protezione devono essere delimitate secondo le indicazioni delle Regioni o delle province autonome per assicurare la protezione del patrimonio idrico. In esse si possono adottare misure relative alla destinazione del territorio interessato, limitazioni e prescrizioni per gli insediamenti civili, produttivi, turistici, agro-forestali e zootecnici da inserirsi negli strumenti urbanistici comunali, provinciali, regionali, sia generali sia di settore". Con lo scopo di proteggere le acque sotterranee, all'interno delle zone di protezione vengono individuate le aree di ricarica e le zone di riserva.

1.6 Area di ricarica

L'area di ricarica di un acquifero viene comunemente definita come "la superficie dalla quale proviene l'alimentazione al corpo idrico sotterraneo considerato; essa è costituita dall'area nella quale avviene l'infiltrazione diretta alle acque sotterranee delle acque meteoriche o dall'area di contatto con i corpi idrici superficiali (laghi, corsi d'acqua naturali o artificiali) dai quali le acque sotterranee traggono alimentazione"¹⁰.

Le aree di ricarica, e la loro estensione, varia in funzione del tipo di acquifero (Figura 6). L'acquifero superficiale è caratterizzato da un'ampia area di ricarica che generalmente corrisponde con l'intera area sotto cui si estende. La ricarica dell'acquifero profondo, che spesso si trova confinato tra due strati con bassissima permeabilità (materiale fine come ad esempio argilla) e quindi in pressione, avviene attraverso una fascia stretta delimitata dai due strati.

¹⁰ Definizione tratta da: "Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato e le Regioni e le Province Autonome-Accordo 12 dicembre 2002 (Linee guida per la tutela della qualità delle acque destinate al consumo umano e criteri generali per l'individuazione delle aree di salvaguardia delle risorse idriche di cui all'art. 21 del Decreto Legislativo 11 maggio 1999, n. 152)".

In letteratura sono presenti diverse definizioni che esprimono il concetto di ricarica degli acquiferi: Meinzer e Heath nel 1990, ad esempio, la definirono come “l’acqua che si trasferisce dalla superficie del suolo o dalla zona non satura verso la zona satura”. Qualche anno più tardi, nel 1997, Lerner definì ricarica “il flusso d’acqua che raggiunge la zona satura, proveniente da qualsiasi direzione (da sotto, da lato, dall’alto)”¹¹. La ricarica di un acquifero si può quindi definire come la quantità di acqua che, provenendo da tutte le direzioni, passa dalla zona non satura dell’acquifero (o comunque dalla superficie del suolo) alla zona satura dello stesso attraverso un moto di infiltrazione.

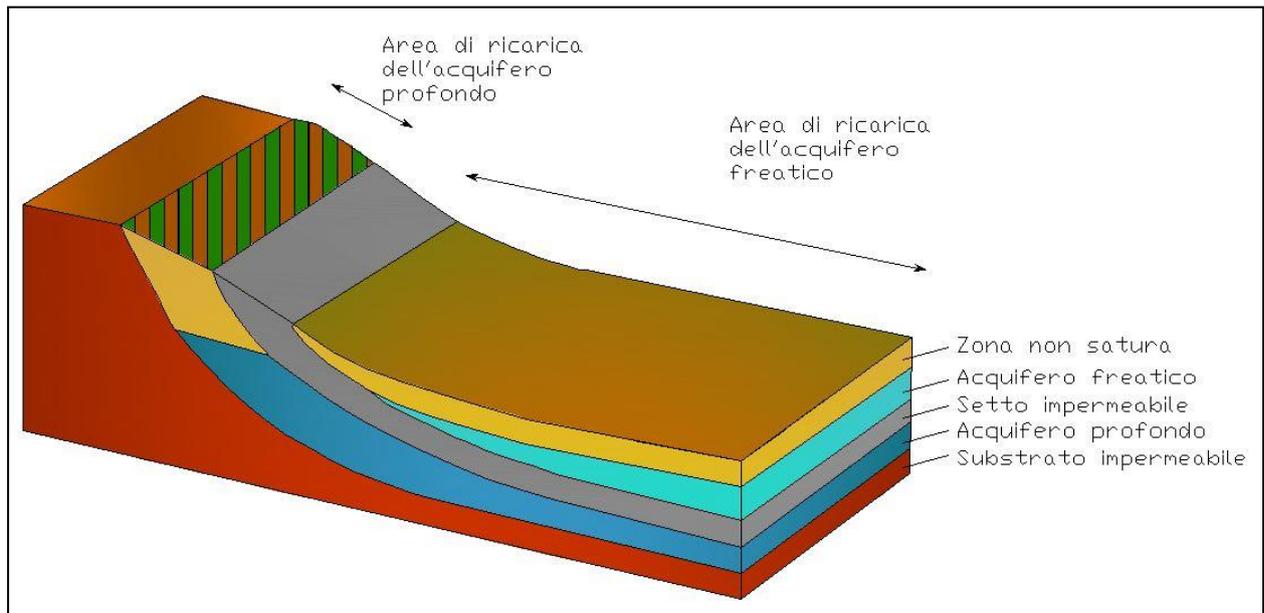


Figura 6: Schema dell'area di ricarica di un acquifero

Le acque che concorrono a questo fenomeno sono le acque naturali o di precipitazione che si infiltrano nel terreno sfruttando la porosità dei materiali che lo costituiscono. Lerner definì tre tipologie di ricarica superficiale: ricarica diretta o ricarica diffusa in cui l’acqua raggiunge la zona satura per percolazione diretta; ricarica indiretta in cui vi è percolazione attraverso il letto dei corsi d’acqua superficiale e ricarica localizzata caratterizzata dalla concentrazione di acqua in depressioni, rivoli e fratture presenti in superficie.

Altri apporti che contribuiscono alla ricarica dell’acquifero e di cui non si può trascurare la presenza sono quelli provenienti dalle attività antropiche quali ad esempio l’irrigazione e gli scarichi industriali. Queste acque, a seguito del loro rilascio nell’ambiente, possono causare un forte impatto negativo sulla qualità dell’acquifero in cui si infiltrano. Ciò è dovuto soprattutto alla presenza in soluzione di sostanze chimiche e/o nocive. Una delle principali fonti di inquinamento sono le attività agricole, che prevedono l’utilizzo di pesticidi e fertilizzanti. Queste sostanze, in seguito alle precipitazioni, penetrano nel terreno e si diffondono attraverso il sistema idrico sotterraneo locale.

Altrettanto seri sono i contaminanti provenienti dalle discariche di rifiuti solidi. L’acqua piovana percola attraverso i rifiuti domestici, raccoglie dozzine di composti organici e inorganici e li

¹¹ Lerner D. (1997). "Groundwater recharge. In d. C. Saether O.M., Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments".

trascina all'interno del sistema idrico. Questo fenomeno di percolazione può protrarsi per lunghi periodi: di recente sono state individuate infiltrazioni di liquami provenienti da discariche dell'epoca dei romani, risalenti cioè a quasi 2000 anni fa.

Tra le più gravi fonti di inquinamento si trovano indubbiamente il petrolio e tutti i prodotti da esso derivanti. Spesso questi prodotti, a causa dell'elevato costo di smaltimento, vengono scaricati abusivamente all'interno del terreno. L'eventuale danneggiamento dei contenitori in cui vengono stoccati, innesca un processo di fuoriuscita di materiale che, in seguito a eventi piovosi, vengono trascinati in profondità fino a raggiungere l'acquifero profondo. Altrettanto pericolosa è la questione dei rifiuti radioattivi.

È tuttavia necessario sottolineare che non tutta l'acqua che raggiunge il terreno è destinata a contribuire alla ricarica confluendo in falda. Ci sono, infatti, diversi fattori naturali come ad esempio il clima, l'idrologia, la geologia e l'idrogeologia che contribuiscono a differenziarne il destino. Esistono però anche fattori antropici, come ad esempio l'impermeabilizzazione del suolo, la pavimentazione o lo sviluppo stesso dell'insediamento, che influenzano il quantitativo di acqua che si infila nel terreno. Il regime di precipitazione e la topografia dell'area definiscono la quantità d'acqua che, rifiutata dal sottosuolo, ruscella superficialmente e può raggiungere corsi d'acqua superficiali o depressioni.

Dal punto di vista topografico, le aree di ricarica spesso si trovano in zone elevate in cui la tavola dell'acqua si trova ad una certa profondità. La sua estensione può svilupparsi per migliaia di chilometri quadrati oppure occupare solo una piccola area, in dipendenza delle caratteristiche geologiche, dal grado di piovosità e dalle caratteristiche della topografia del territorio sopra l'acquifero.

Il grado di ricarica di un acquifero è fortemente influenzato dalle precipitazioni locali, dalla capacità dei depositi superficiali di consentire la filtrazione dell'acqua e la velocità con cui essa si infila nel terreno: a parità di superficie areale considerata, un terreno con un grado di porosità elevato consente una velocità di ricarica maggiore rispetto a un terreno con un basso grado di porosità. La velocità di moto dell'acqua all'interno della falda può variare da qualche centimetro al giorno a diversi chilometri in un giorno. È utile sottolineare che l'acqua superficiale potrà infiltrarsi nell'acquifero sottostante soltanto dopo che l'acqua al suo interno si allontana della zona di ricarica.

Uno studio svolto in Australia da Allison¹² ha evidenziato come la tipologia di vegetazione che ricopre l'area di interesse, influenzi il fenomeno della ricarica: è stato possibile registrare che la sostituzione della vegetazione arborea naturale con colture a radicazione superficiale, influenzi positivamente la ricarica, portando un aumento da 0,1 a circa 5-30 mm/anno.

Dallo studio approfondito delle caratteristiche idrogeologiche dell'area di interesse, è possibile realizzare delle apposite cartografie riportanti le estensioni delle varie aree. Tuttavia, a livello nazionale, le aree di ricarica degli acquiferi profondi sono state appositamente cartografate

¹² Allison G., Stone W., Hughes, M. (1990). "Land clearance and river salinization in the western Murray Basin, Australia".

nelle sole Regioni Lombardia ed Emilia Romagna, grazie ad una collaborazione tra ENI-AGIP S.p.A. e le rispettive autorità regionali^{13/14}.

Tabella 3: Panoramica dei metodi suggeriti da ciascuna Regione (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016 - Modificata)

Regione	Metodo suggerito
Abruzzo	Metodo idrogeologico basato sullo studio della topografia, sullo studio dell'utilizzo del suolo e sulla caratterizzazione dell'acquifero. Indicata come utile la modellizzazione mediante FEFLOW e MODFLOW
Basilicata	Applicato il criterio idrogeologico utilizzando dati geologico-strutturali. Si tiene conto del flusso significativo (senza il quale gli ecosistemi sarebbero danneggiati) e della quantità significativa (ossia la possibilità di estrarre almeno 10 m ³ /gg)
Calabria	Utilizzo di studi pregressi sulla dinamica degli acquiferi profondi della Regione Calabria, misure piezometriche degli acquiferi, dati chimici e l'utilizzo delle cartografie tematiche ufficiali. Le aree di ricarica sono state cartografate.
Friuli Venezia Giulia	Proposto un metodo di ricostruzione del sottosuolo sul modello della Regione Emilia Romagna e della Regione Lombardia. Il progetto deve ancora essere pubblicato.
Lazio	Metodi chimici e isotopici
Liguria	Utilizzo di dati idrogeologici, idrochimici, idrologici, microbiologici e pedologici.
Molise	Utilizzo di dati pluviometrici, portate sorgive, analisi chimiche e isotopiche delle acque per identificare le modalità di ricarica. Le aree sono state identificate applicando il criterio idrogeologico e utilizzando dati geologico-strutturali. Si tiene conto del flusso significativo (senza il quale gli ecosistemi sarebbero danneggiati) e della quantità significativa (ossia la possibilità di estrarre almeno 10 m ³ /gg)
Puglia	Utilizzo di dati chimici e isotopici per l'identificazione della quota di infiltrazione delle acque. Indicata la possibilità di identificare le aree di ricarica tramite profili multiparametrici che tengano conto di parametri come temperatura e conducibilità elettrolitica delle acque.
Sicilia	Le aree di ricarica vengono identificate con le aree di affioramento delle litologie ospitanti l'acquifero profondo. Viene indicata la necessità di integrare lo studio con dati idrogeologici.
Toscana	Metodi chimici e isotopici
Trentino Alto Adige	Misura della temperatura e studio del contenuto isotopico al fine di individuare la quota di infiltrazione; valutazione della concentrazione delle differenti specie chimiche al fine di definire le litologie con cui le acque sotterranee sono entrate in contatto. Ricostruzione del modello idrogeologico della pianura (a scala di bacino) mediante l'utilizzo di dati preesistenti riguardanti le caratteristiche idrogeologiche delle formazioni.
Umbria	Individuazione delle idrostrutture, sulla base delle caratteristiche litologiche e geologico-strutturale dell'area, e correlazione tra le idrostrutture individuate, i tassi di infiltrazione e le portate delle emergenze. Le idrostrutture condizionano il flusso, le portate delle emergenze corrispondono all'infiltrazione media nelle aree di ricarica. Metodo applicato ad acquiferi carbonatici.
Veneto	Metodi chimici (misura delle concentrazioni degli anioni e dei cationi) e isotopici (misura del contenuto isotopico, con riguardo per gli isotopi radiogenici) connesse a misure dei parametri fisici (temperatura, pH e conducibilità) al fine di datare le acque e in funzione dell'età e delle caratteristiche chimico-fisiche ricondurle alle potenziali aree di ricarica. Viene inoltre specificata la necessità che le aree di ricarica si trovino a monte della linea dei fontanili al fine di individuare le condizioni idrogeologiche favorevoli alla ricarica degli acquiferi.

Queste mappe sono state ottenute dai risultati provenienti da indagini geologiche, realizzate mediante metodi sismici, dallo studio delle cartografie dei pozzi di estrazione ubicati sul territorio regionale, dai carotaggi in continuo e dalle rispettive analisi di laboratorio. In tutte le altre Regioni viene riportata nei piani di tutela un'area definita come plausibile area di ricarica,

¹³ Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP (1998). "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna".

¹⁴ Regione Lombardia, ENI-AGIP (2002). "Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia".

senza l'accompagnamento di apposite mappature. Ciò nonostante, la maggior parte delle Regioni suggerisce alcuni metodi da applicare finalizzati all'individuazione e alla mappatura delle potenziali aree di ricarica degli acquiferi profondi destinati all'estrazione delle acque per il consumo umano. Nella precedente Tabella 3 si riporta una panoramica dei metodi suggeriti dalle Regioni per le quali non è stata redatta un'apposita mappatura.

1.7 Destinazione d'uso del suolo

Una caratteristica molto importante da prendere in considerazione durante la fase di valutazione della ricarica di un acquifero è la destinazione d'uso del suolo. I cambiamenti d'uso e di copertura del suolo sono una delle principali attività, da parte dell'uomo, che possono influenzare (negativamente ma in alcuni casi anche positivamente) il sistema idrico sotterraneo. Alcune modellazioni, hanno infatti evidenziato come la modificazione nel tempo della destinazione d'uso porti a una variazione della quantità e della qualità delle acque che giungono nel sottosuolo.

Uno studio condotto nel bacino del fiume Guishui, in Cina, ha evidenziato come solo una bassa percentuale delle acque contribuisce alla ricarica dell'acquifero. I risultati, ottenuti da una modellazione del bilancio idrico e dall'utilizzo dei software WetSpa¹⁵ e GIS, indicano che la ricarica delle acque sotterranee rappresenta solo il 21,16% sul totale delle precipitazioni, mentre il 72,54% si perde sotto forma di evapotraspirazione. Il tasso di ricarica dell'acquifero diminuisce nell'ordine dei terreni coltivati, prati, aree urbane e foreste.

Espansione urbanistica

È importante capire come cambia la ricarica delle acque sotterranee nelle Regioni che sono soggette a una forte crescita urbanistica. L'impatto dell'urbanizzazione sulle acque sotterranee ha infatti destato grandi preoccupazioni negli ultimi decenni. Questo problema è stato trattato in differenti studi, tra i quali si cita quello condotto nell'area di Delhi, in India. Questo studio hanno infatti avuto come finalità quello di prevedere, quali conseguenze può portare una cattiva gestione dell'impermeabilizzazione del suolo, a seguito all'espansione urbanistica, sulla ricarica degli acquiferi.

La Figura 7 mostra come, ipotizzando un contributo dell'evapotraspirazione invariato nel tempo, il deflusso superficiale e l'infiltrazione varino sensibilmente a causa di una impermeabilizzazione del suolo a seguito dello sviluppo urbanistico.

Sapendo che l'area sottesa a ciascuna curva rappresenta il volume di deflusso, dal grafico si può osservare come l'urbanizzazione influenzi fortemente quest'ultimo parametro, portando al verificarsi di maggiori scariche di picco. La presenza di bacini di detenzione consente di ridurre le portate massime e conseguentemente le inondazioni locali, tuttavia non consentono di ridurre il volume totale del deflusso.

¹⁵ Il WetSpa è il modello più largamente utilizzato per la stima dei valori medi, proiettati sul lungo termine, della ripartizione delle acque piovane in: ricarica sotterranea, deflusso superficiale ed evapotraspirazione. Il programma si basa sull'utilizzo di relazioni fisiche ed empiriche. I modelli regionali di acque sotterranee utilizzate per analizzare le relazioni di ricarica-scarico sono spesso quasi stazionari e richiedono un input di ricarica media a lungo termine che tenga conto della variabilità spaziale della ricarica

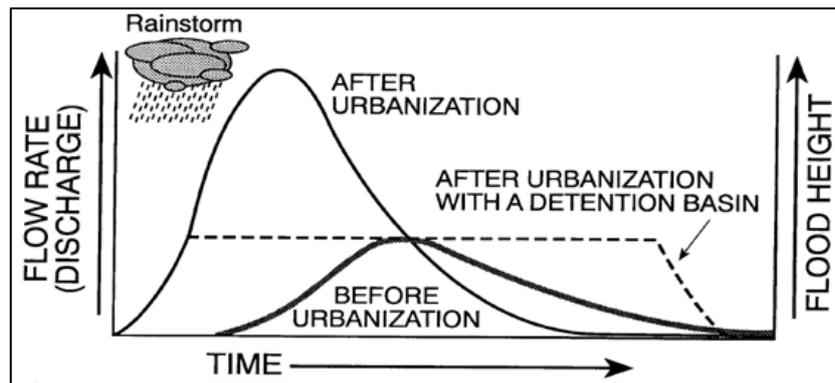


Figura 7: Impatto dell'urbanizzazione sul deflusso superficiale in seguito a un evento meteorico (da Mishra N., 2014)

La scarsità delle leggi indiane in materia di smaltimento e gestione dei rifiuti, ha portato a una cattiva gestione dei rifiuti e degli impianti di trattamento, con particolare riferimento alla realizzazione di discariche. Questo aspetto comporta un aggravarsi delle caratteristiche di ricarica dell'acquifero evidenziando come l'impermeabilizzazione può portare, oltre a ridurre i volumi di ricarica della falda, a un ulteriore deterioramento della qualità della stessa. Accanto a questo problema, si affiancano i problemi relativi all'aumento della popolazione e al clima caratterizzato da periodi di intense precipitazioni alternati con periodi di forte siccità. La combinazione di questi due parametri porta a uno sfruttamento eccessivo delle acque sotterranee con conseguente riduzione dei livelli dell'acqua dei fiumi, invasione di acqua salata ed essiccamento delle falde.

Dai vari scenari considerati, sono state infine individuate delle soglie di variazione di ricarica in funzione del grado di impermeabilizzazione: la conversione di un terreno da bosco a bassa densità in un terreno a uso residenziale comporta una riduzione del fattore di ricarica del 11-30%, la conversione della stessa tipologia di bosco in un suolo ad uso residenziale ad alta densità implica una riduzione della ricarica del 52-100% e una conversione in un terreno a uso commerciale comporta il quasi totale annullamento della ricarica con una riduzione del 94-100%.

Altre destinazioni d'uso del suolo

Per meglio capire come anche gli altri usi del suolo influenzino la ricarica sotterranea, si fa riferimento a un altro studio condotto nel bacino di Nete, nel Nord-Est del Belgio, nelle vicinanze del sito di Dessel.

Lo studio, il cui obiettivo era quello di fare stime future sulla ricarica al variare delle condizioni climatiche e di copertura, ha preso in considerazione i quattro differenti usi dominanti del terreno: le coltivazioni (che ricoprono il 37% dell'area), le praterie (22%), le foreste di conifere (12%) e decidue (9%). La coltivazione dominante nell'area è il Mais, per tale motivo è stata usata questa tipologia di coltivazione come copertura rappresentativa per i terreni coltivati. Le variazioni climatiche sono state integrate nella simulazione andando a prendere come riferimento differenti aree geografiche: Dessel in Belgio (clima marittimo-temperato - DO), Gijonin in Spagna (clima subtropicale con estati secche e assenza di stagionalità - Cs/Cr) e Sisimiut in Groenlandia (clima freddo con assenza/presenza di permafrost - EO/FT). Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti (Tabella 4).

Tabella 4: Sensibilità della ricarica delle acque sotterranee al cambio di uso del suolo nel bacino idrografico di Nete. La sensibilità, dato in parentesi come percentuale, viene calcolato assumendo una conversione completa del bacino a un uso del suolo per un dato stato climatico (da Leterme B., 2011 – Modificata)

	Tipo di clima	Precipitazione (mm/anno)	Media annuale di ricarica delle acque sotterranee a Nete (mm)				
			Uso attuale del suolo	Coltura (Mais)	Prateria	Foreste di conifere	Foreste decidue
Dessel	DO	899	391	495 (+26%)	307 (-21%)	239 (-39%)	375 (-4%)
Gijon	Cs/Cr	947	361	473 (+31%)	276 (-24%)	211 (-42%)	315 (-13%)
Sisimiut	EO/FT	306	108	128 (+18%)	96 (-11%)	73 (-33%)	104 (-4%)

Analizzando questi ultimi, è stato possibile notare come, assumendo la stessa tipologia di copertura, la variazione di condizioni climatiche influenzi la percentuale di acqua che contribuisce alla ricarica. Analogamente, per ciascuna condizione climatica, è possibile notare come la variazione di uso del suolo modifichi in positivo o in negativa la ricarica. In particolare, la conversione dell'intero bacino ad una coltivazione di mais, comporterebbe un sensibile aumento del fattore di ricarica. Diversamente, la conversione dell'intera area a una foresta di conifere comporterebbe una sostanziale riduzione della ricarica con valori che si aggirano attorno al 40%.

1.8 Criteri per delimitare le aree di salvaguardia e di protezione

Per delimitare le tre aree (tutela assoluta, rispetto e protezione) si possono usare diversi criteri, in funzione delle caratteristiche idriche, geologiche e chimiche delle sorgenti e in funzione alla presenza di punti di presa o pozzi. È necessario quindi eseguire apposite indagini al fine di definire in maniera sufficientemente dettagliata le caratteristiche prima descritte, ed eseguire un'analisi dei dati storici relativi alle caratteristiche qualitative e quantitative della risorsa interessata.

I criteri maggiormente utilizzati sono quello geometrico, temporale e idrogeologico. Il criterio geometrico si basa sul tracciamento di semplici aree concentriche, corrispondenti alle varie fasce, attorno a un punto sorgente o a un pozzo di captazione. Questo metodo è quello meno preciso poiché non tiene conto delle reali caratteristiche della zona.

Il criterio temporale, che risulta essere quello più efficace, si basa sul tempo di sicurezza. Questo è identificato come il tempo necessario all'attuazione di opportune misure di difesa della captazione. Risulta particolarmente adeguato per la definizione della zona di rispetto di sorgenti e pozzi. In letteratura sono presenti diversi modelli numerici che consentono la definizione delle isocrone a diversi intervalli temporali.

Infine, il criterio idrogeologico, si basa sugli elementi idrogeologici specifici dell'acquifero e viene utilizzato nelle zone di protezione in cui la presenza di particolari condizioni idrogeologiche, rende difficoltoso, se non impossibile, l'impiego del criterio temporale.

1.9 Stima della ricarica

La stima della ricarica è un processo complicato poiché richiede la presa in considerazione di svariati fattori spesso di difficile identificazione, dipendenti in particolar modo dalle tipologie di pressioni antropiche presenti nell'area. In ambito urbano, per esempio, è complesso andare a individuare e quantificare le perdite legate a una rete di distribuzione, che sia essa di tipo

fognario o per la distribuzione di acqua potabile. In ambito industriale, l'entità dei regimi di flusso che interessano molte reti è un fattore fortemente variabile, che dipende dal tipo di processo lavorativo e dal quantitativo di lavoro svolto. Un contributo importante è dato dalla conoscenza della posizione e dello sviluppo delle varie reti sotterranee, contributo che spesso risulta non utilizzabile a causa della mancanza di conoscenze relative alla distribuzione delle reti, specie per quanto riguarda quelle industriali.

Esistono diverse metodologie che consentono di eseguire una stima quantitativa della ricarica, che possono essere applicate sia per le acque superficiali che per le acque sotterranee. La scelta di una tecnica a discapito di altre dipende dai mezzi a disposizione, dallo scopo del lavoro e dalle caratteristiche specifiche dell'area in esame. Tra le principali metodologie si citano quelle di tipo fisico che prevedono l'utilizzo di strumenti più o meno invasivi, la modellazione numerica e quelle che prevedono l'ausilio di tracciante.

Indipendentemente dal metodo, decisivo è il tipo di informazioni utilizzate: se si utilizzano informazioni legate alla condizione idrogeologica superficiale, generalmente è possibile ottenere una valutazione della ricarica potenziale, ossia "quella che, essendo penetrata nel sottosuolo, è potenzialmente in grado di raggiungere la zona satura, ma che può però ritornare in superficie per evapotraspirazione o per scorrimento su orizzonti a bassa permeabilità"¹⁶. L'utilizzo invece di informazioni ricavate dalle acque sotterranee, derivanti generalmente dal bilancio ingressi-uscite, può invece consentire di stimare la ricarica effettiva, cioè quella che ha raggiunto la zona satura.

Diversi studi, tra i principali si cita quello di Scanlon¹⁷, hanno poi evidenziato come il fattore clima sia influente in termini di modalità di ricarica, con particolare distinzione tra aree umide e zone aride. Nelle aree umide solitamente la falda ha bassa soggiacenza (posizione in profondità della falda rispetto al piano campagna), l'evapotraspirazione è consistente e la ricarica è di tipo diffuso. I tassi di ricarica dipendono dalla capacità di immagazzinamento degli acquiferi, evidenziando quindi una forte influenza dai fattori idrogeologici. Nelle aree aride, invece, solitamente la falda ha soggiacenza elevata grazie anche ai corsi d'acqua superficiali che contribuiscono all'alimentazione. A causa dell'elevato grado di evapotraspirazione, la ricarica, che risulta essere di tipo localizzata poiché l'acqua raggiunge la falda passando per percorsi preferenziali come fratture e canali di origine carsica, si registra solamente in corrispondenza di eventi di pioggia concentrati ed intensi.

Modellazione numerica

La stima della ricarica viene spesso definita mediante ricostruzione grafica dei bacini idrografici, basata sull'equazione di bilancio idrico. Esistono differenti tipologie di modelli riassumibili in due grandi macrofamiglie: modelli a parametri concentrati, che forniscono come risultato finale un unico valore, e modelli a parametri distribuiti, che consentono di avere la risposta in funzione del tempo e dello spazio per ogni unità in cui è stato scomposto il bacino. L'utilizzo di

¹⁶ Giovanni F. (Revisione Novembre 26, 2013). "Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia"

¹⁷ Scanlon B., Cook P., Healy R. (2002). "Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge".

strumenti di simulazione numerica del trasporto, rende stimabile l'infiltrazione in falda mediante metodi di inversione.

Utilizzo di traccianti

L'applicazione più diffusa di questo metodo, prevede la misurazione della concentrazione di alcuni composti, nelle acque superficiali e in acqua di falda. Solitamente vengono utilizzati isotopi stabili dell'ossigeno o dell'idrogeno (come il trizio), bromuro o traccianti visibili. Il costo delle analisi chimiche è molto elevato, pertanto in generale si esegue un numero ridotto di misurazioni. Accanto a questi metodi chimici esistono quelli basati sulla misurazione delle temperature dell'acqua, che risultano più economici ma meno affidabili.

1.10 La tutela delle acque nella Regione Piemonte

Negli anni, la normativa sulla tutela delle acque sotterranee ha avuto forti mutamenti¹⁸.

Fin dai primi anni 90, con la Legge regionale n. 13 del 26 marzo 1990, si andava a imporre il divieto di sversare i reflui provenienti dal sistema fognario all'interno del sottosuolo, consentendone lo scarico all'interno dei soli corpi idrici superficiali. Era tuttavia fatta eccezione per gli scarichi derivanti da insediamenti civili e appartenenti alla prima categoria definiti, all'articolo 4 della stessa, come "le pubbliche fognature caratterizzate da uno scarico finale di volume non superiore a centocinquanta metri cubi al giorno, i cui effluenti siano originati da insediamenti civili o da insediamenti civili e produttivi". Per questa categoria era consentito lo scarico sul sottosuolo, a patto che fosse accertata l'impossibilità di scaricare i reflui all'interno dei corpi idrici superficiali. Indirettamente, questa Legge consente di preservare la qualità delle acque sotterranee andando a limitare gli scarichi nel terreno e limitando così la possibile propagazione di inquinanti nel sottosuolo e quindi negli acquiferi in esso ospitati.

Nel 1996, viene emanata la Legge regionale n. 22 del 30 aprile 1996, con cui si entra più nello specifico per quanto concerne la protezione delle acque sotterranee. Le finalità sono quelle di tutelare in maniera preventiva il sistema idrico sotterraneo. Vengono pertanto individuate le procedure per la ricerca, l'estrazione e l'utilizzazione delle acque sotterranee provenienti da falde freatiche e in pressione, in dipendenza del tipo di utilizzo: fini potabili, domestici o non domestici. Si introducono poi due fondamentali elenchi: quello relativo alle acque pubbliche e quello relativo a pozzi, sorgenti e piezometri. All'interno del primo vengono inserite le acque sotterranee che, dalla Giunta regionale, vengono classificate come "di carattere pubblico e di generale interesse". Il catasto pozzi, sorgenti e piezometri è stato realizzato per consentire una conoscenza sempre aggiornata dello stato delle acque sotterranee, dal punto di vista qualitativo, quantitativo e della tipologia di utilizzo. Altre informazioni contenute nel catasto sono quelle relative alle opere di prelievo e alle modalità di gestione.

Un ulteriore passo avanti verso l'attuale Legislazione in termini di tutela delle acque, viene fatta con la Legge regionale n. 13 del 20 gennaio 1997. Con questa legge si vanno innanzitutto a individuare gli ambiti territoriali ottimali come definito dalla Normativa Statale. In particolare, il territorio piemontese viene suddiviso in 6 differenti ambiti e per ciascuno di essi se ne

¹⁸ Per la ricostruzione cronologica delle normative si è fatto riferimento alla sezione "Normativa > Acqua" del sito della Regione Piemonte.

individuano i confini e i rispettivi Enti di controllo. All'interno del Capo III della stessa legge regionale, si vanno a definire le modalità e le forme per una corretta e ottimale cooperazione tra i vari Enti (di particolare importanza si cita l'Autorità d'ambito, di cui viene definita la struttura interna e le competenze) appartenenti allo stesso ambito ma anche tra quelli appartenenti ad ambiti differenti.

Nel 1999 (11 Maggio) venne emanato il Decreto Legislativo n. 152 con il quale si introduce, a livello nazionale, la definizione delle aree di salvaguardia per "mantenere e migliorare le caratteristiche qualitative delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano". È il decreto stesso ad affidare alle singole Regioni il compito di definire queste aree attorno a ciascun punto di captazione o sorgente, suddividendole al loro interno nelle attuali zone di tutela assoluta, di rispetto e di protezione (si faccia riferimento alla precedente Figura 5).

Questo decreto è stato recepito in Piemonte mediante la Legge regionale n. 61 del 29 dicembre 2000. Al suo interno sono infatti contenute le "disposizioni per la prima attuazione del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152 in materia di tutela delle acque". In particolare, l'articolo 3 disciplina le aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano (si fa riferimento all'articolo 21 del D. Lgs. 152/1999).

Sempre a partire dal Decreto precedentemente citato, si è dunque provveduto alla modifica del precedente Legge regionale n. 22 del 30 aprile 1996, andando a introdurre la Legge regionale n. 6 del 7 aprile 2003. Quest'ultima provvede alla modifica di alcuni articoli andando ad adattare i punti fondamentali per la ricerca, l'uso e la tutela delle acque sotterranee con quanto previsto dalla nuova normativa italiana: si vanno quindi a introdurre alcune nuovi concetti come quello falda profonda¹⁹ (che sostituisce la precedente definizione di falde in pressione) e a modificare la destinazione d'uso delle varie tipologie di acqua. In particolare si vanno a sostituire tutte le informazioni riferite alle falde in pressione con quelle riferite alle falde profonde.

Il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale" consente il recepimento della Water Framework Directive in Italia.

L'ultimo passo per arrivare all'attuale legislazione piemontese, è il Decreto Direttoriale 21 Luglio 2016, n. 268. Il principale obiettivo è quello di realizzare una adeguata cartografia in cui vengono definite le aree di ricarica degli acquiferi profondi dell'intera Regione (Figura 8), accompagnata da una adeguata relazione tecnica in cui, oltre alla descrizione delle fasi che hanno portato alla realizzazione della cartografia, contiene anche indicazioni sulle modalità di aggiornamento della perimetrazione. Tra i vari passaggi è importante sottolineare quello relativo alla ricerca di informazioni e di dati provenienti da cartografie pregresse e l'analisi dei possibili criteri utilizzabili per l'individuazione degli acquiferi profondi, di cui si parlerà nel seguito.

¹⁹ Legge regionale 7 aprile 2003, n. 6, art. 5: "Per falde profonde si intendono quelle poste al di sotto della falda freatica ove presente e cioè le falde confinate, le falde semiconfinate e le falde ospitate nelle porzioni inferiori dell'acquifero indifferenziato, caratterizzate da una bassa velocità di deflusso, da elevati tempi di ricambio e da una differente qualità idrochimica rispetto a quelle ospitate nelle porzioni più superficiali del medesimo".

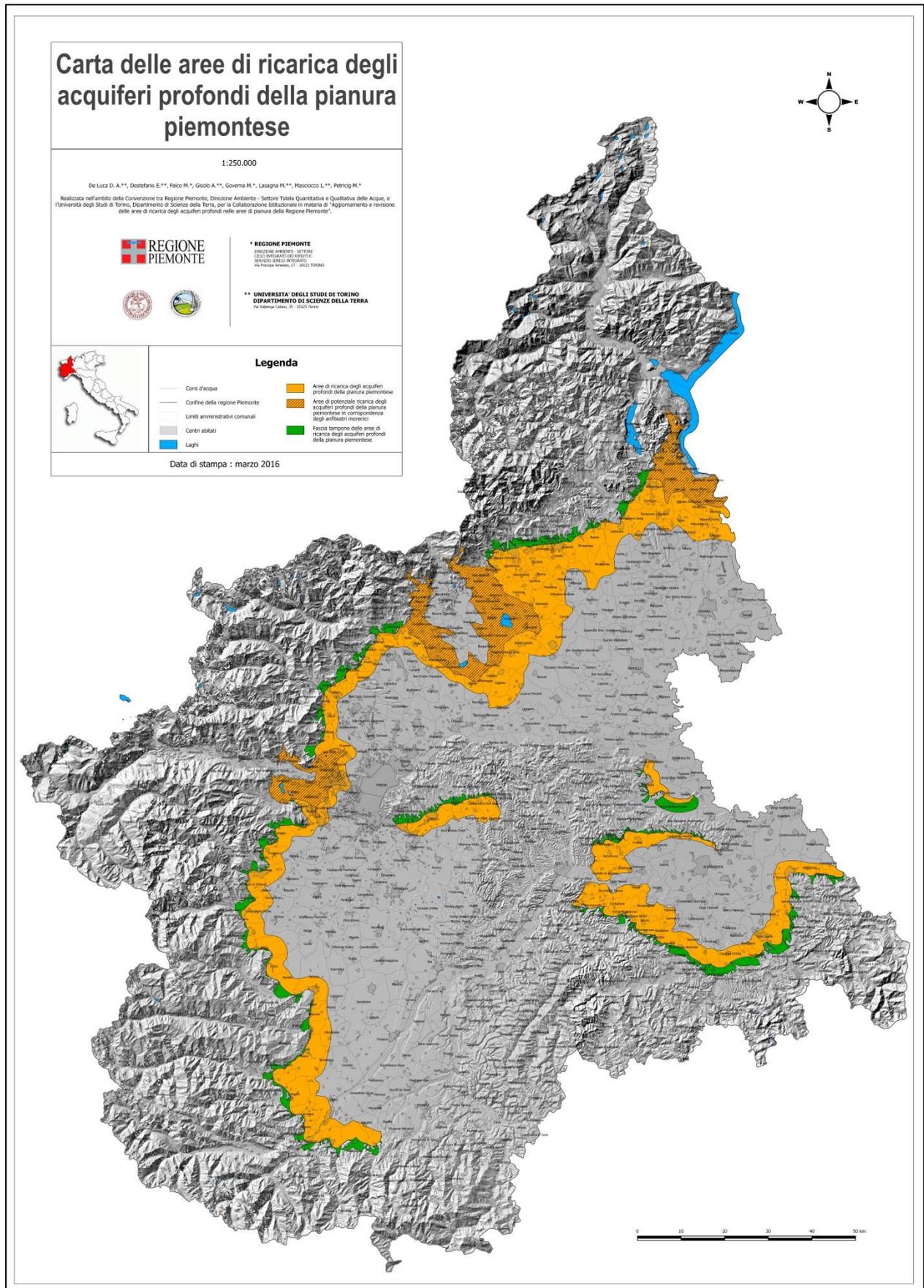


Figura 8: Aree di ricarica degli acquiferi profondi approvate con determinazione n. 268 del 21 luglio 2016: cartografia in scala 1:250.000 (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016)

L'attuale normativa piemontese

Come precedentemente accennato, il D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 affida alle singole Regioni (e alle Province Autonome) il compito di definire le zone di protezione e i vincoli e le limitazioni che devono essere rispettati al loro interno.

Nella Regione Piemonte, l'attuazione del Decreto, avviene mediante la Deliberazione della Giunta Regionale 2 febbraio 2018, n. 12-6441: "Aree di ricarica degli acquiferi profondi - Disciplina regionale ai sensi dell'articolo 24, comma 6 delle Norme di piano del Piano di Tutela delle Acque approvato con D.C.R. n. 117-10731 del 13 marzo 2017".

Il primo passo messo in evidenza dallo stesso Piano di Tutela delle Acque (PTA) è quello di individuare i vincoli e le misure, in funzione delle destinazioni d'uso, da adottare nelle zone di protezione definite al comma 4²⁰ dell'articolo 24 sopracitato. Al fine di garantire il miglioramento, o comunque il mantenimento, della qualità delle acque, è necessario eseguire una valutazione delle pressioni presenti nell'ambiente circostante. In particolare, di maggior dettaglio, devono essere quelle relative alle pressioni presenti sull'acquifero superficiale che sovrasta l'area di interesse, alla presenza di pozzi miscelanti e alle caratteristiche della superficie di separazione tra acquifero superficiale e quello profondo.

Al termine di questa fase di valutazione, i vari enti (quali la Regione, le Province, la Città Metropolitana, i Comuni e gli Enti di Governo dell'Ambito idrico) sono tenuti, preso atto degli esiti di queste valutazioni, a definire le azioni necessarie per garantire la tutela degli acquiferi profondi. Questi programmi di intervento vengono poi riportate all'interno della valutazione ambientale.

All'interno della stella D.G.R. sono presenti le disposizioni per le aree di ricarica con riferimento alle seguenti tipologie di attività, per ciascuna delle quali vengono descritti i principali impatti che possono causare e le misure sia da adottare che quelle da evitare al fine di ridurre l'impatto:

- Attività agricole con particolare riferimento ai prodotti fitosanitari
- Attività estrattive e recuperi ambientali
- Discariche di rifiuti
- Attività considerate significative perché detengono o impiegano sostanze a ricaduta ambientale
- Limitazioni e prescrizioni per gli insediamenti produttivi
- Aspetti realizzativi di particolari opere interraste

Per la realizzazione della Figura 8 si è fatto riferimento ai criteri definiti all'interno dell'Allegato 1 del precedente Decreto Dirigenziale del 21 Luglio 2016, n. 268: il criterio generale, il criterio della porzione del circuito di flusso e i criteri includenti ed escludenti.

Il criterio generale è il criterio più semplice e si basa sull'individuazione delle aree all'interno delle quali (o in prossimità delle quali) potrebbe ricadere la ricarica degli acquiferi profondi.

²⁰ Il comma 4 definisce quali sono i criteri e le modalità con cui delineare la cartografia a scala 1:250.000 delle aree di ricarica propriamente dette, fasce tampone e anfiteatri morenici.

Il criterio della porzione del circuito di flusso consente in prima approssimazione di delimitare la fascia. Il principio su cui si basa è quello utilizzato da Toth nel 1963²¹, in cui si dice che “le aree di ricarica degli acquiferi profondi occupano una porzione del circuito di flusso variabile in funzione delle caratteristiche idrogeologiche dell’area. Si può quindi stabilire l’estensione di una potenziale fascia di ricarica degli acquiferi profondi definendo tali aree come una porzione limitata del circuito di flusso”. Il circuito di flusso è suddiviso in 3 zone (Figura 9): l’area di ricarica caratterizzata da un flusso verticale verso il basso, l’area di drenaggio in cui si ha una componente di flusso verticale ma rivolta verso l’alto e un’area di transizione in cui si ha sostanzialmente un flusso orizzontale ed è possibile trascurarne la componente verticale.

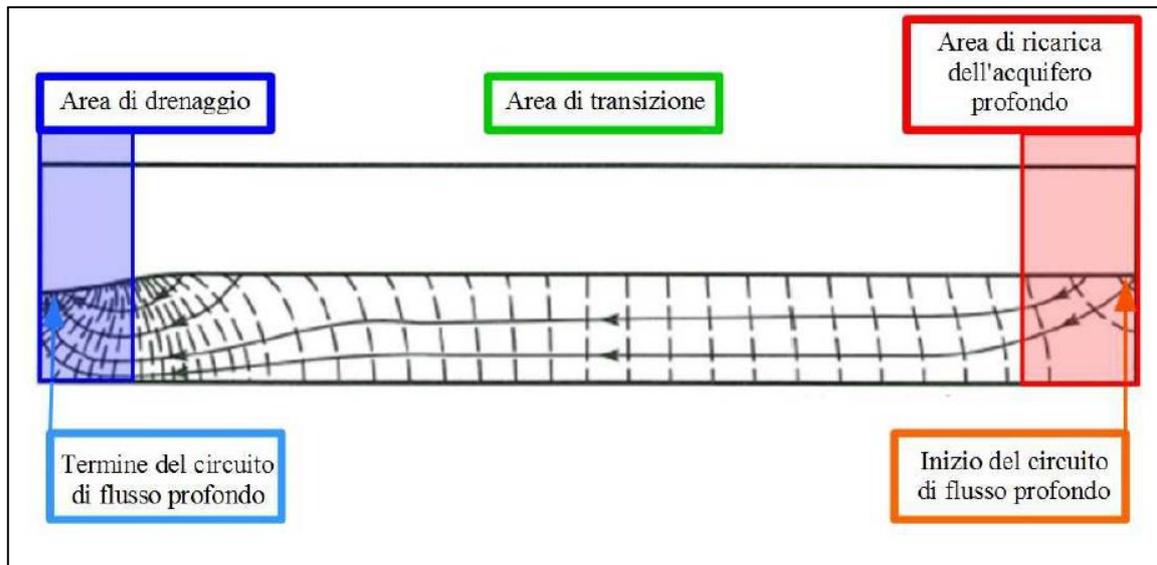


Figura 9: Modello idrogeologico, non in scala, in cui vengono rappresentati i circuiti di flusso superficiali, intermedi e profondi. Le aree in cui prevalgono le componenti verticali di flusso dei circuiti intermedi e profondi corrispondono alle aree di ricarica degli acquiferi profondi (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016)

Per un acquifero profondo, questi circuiti di flusso, hanno scala regionale e gli apporti di acqua locali quindi sono spesso considerati come scarsamente influenti. Diversamente, per gli acquiferi superficiali il circuito di flusso è a scala locale e risente dunque delle influenze degli apporti idrici locali. Dallo studio della cartografia esistente è stato possibile individuare, in prima approssimazione, le aree di ricarica in prossimità del limite tra il substrato permeabile e i depositi di pianura. Per quanto concerne le aree di drenaggio, queste sono state indicativamente individuate tra le zone di risalita artesiane e i corsi d’acqua che hanno influenza su scala regionale.

Gli ultimi criteri utilizzati sono quelli includenti ed escludenti che consentono di definire con un maggior grado di dettaglio l’estensione delle aree di ricarica: mentre i criteri includenti consentono di ampliare la fascia delle aree di ricarica, quelli escludenti consentono di ridurre l’estensione. Questi criteri si basano sull’utilizzo dei dati a disposizione relativi a geologia e idrogeologia dell’area.

²¹ Toth J.A. (1963). “A theoretical analysis of ground-water flow in small drainage basins”.

Viene poi considerata, come contribuyente alla ricarica la zona compresa tra il substrato impermeabile e i depositi permeabili di pianura e da ricostruzioni, definita come fascia tampone. Com'è possibile vedere in Figura 10, le acque che si infiltrano a monte della linea raffigurante l'inizio dell'acquifero profondo, si propagano nel sottosuolo e possono contribuire alla ricarica dello stesso. La presenza quindi di eventuali fonti di contaminante, possono portare a un degradamento della qualità delle acque profonde. In via cautelativa si considera questa fascia come estensione dell'area di ricarica definita dal criterio della porzione del circuito di flusso.

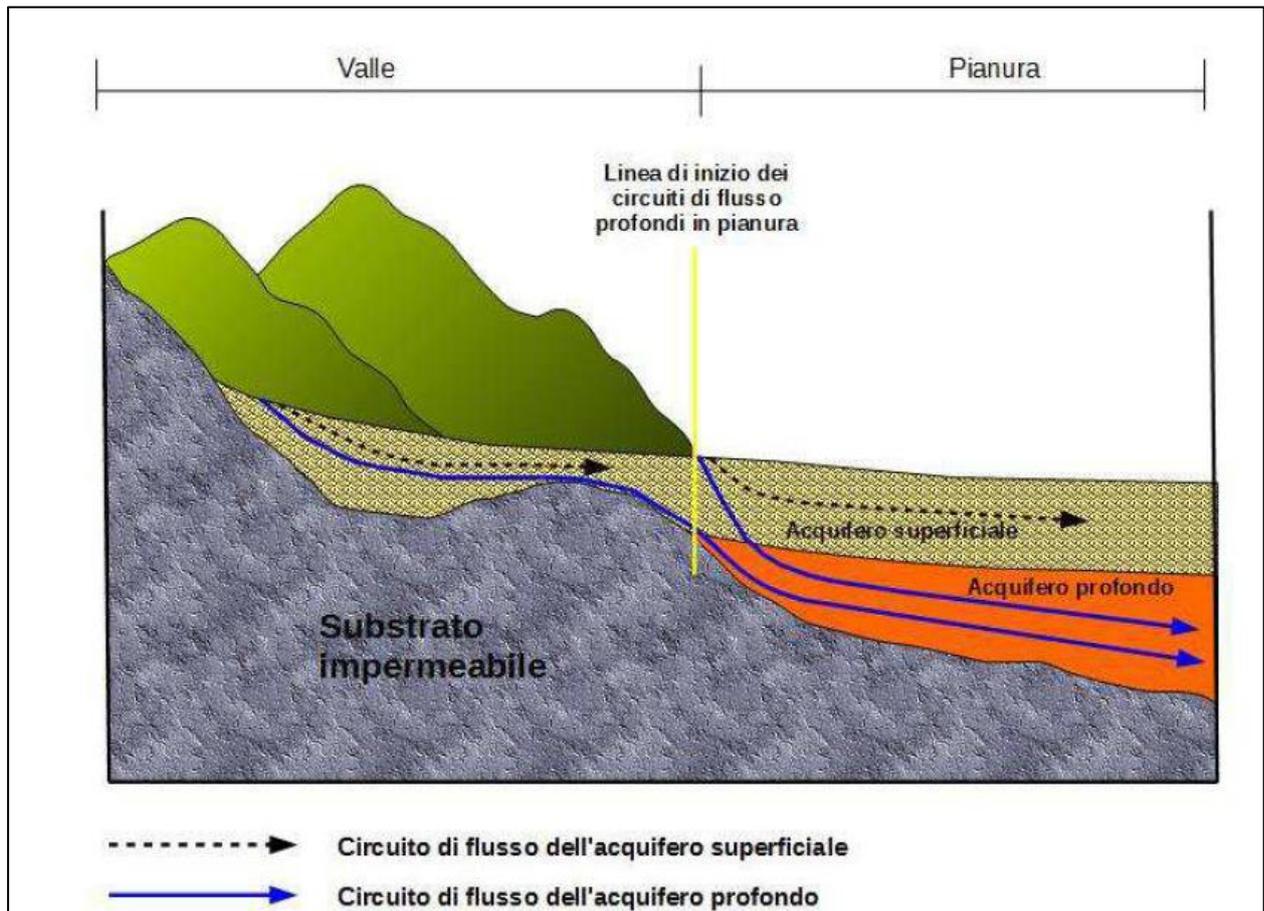


Figura 10: Schema idrogeologico semplificato, non in scala, della fascia tampone (da Consiglio regionale del Piemonte, 2016)

Vengono infine considerati anche i depositi glaciali degli anfiteatri morenici. Seppur non esista una concreta certezza della partecipazione da parte delle acque meteoriche che si infiltrano in corrispondenza degli anfiteatri morenici con il fenomeno di ricarica dell'acquifero profondo, in via cautelativa si è deciso di far rientrare anche queste zone nell'area di ricarica.

CAPITOLO 2

Il recepimento della WFD in Europa

Gli Stati membri, mediante la direttiva 2000/60/CE, sono invitati a valutare in maniera affidabile lo stato delle acque e ad elaborare dei programmi di misure sulla base di solide valutazioni delle pressioni, con gli annessi effetti sull'ambiente. Quest'ultima valutazione ha un'importanza rilevante in quanto, se non corretta, l'intero piano di gestione dei bacini idrografici potrebbe risultare privo di fondamento. In questo modo gli Stati membri rischierebbero di pianificare degli interventi superflui e di non intervenire là dove risulti effettivamente necessario, oppure di intervenire laddove sia effettivamente necessario ma in maniera non idonea sia dal punto di vista dell'approccio sia dal punto di vista economico.

Come la direttiva stessa, per meglio garantire il mantenimento dello stato dell'acqua, tutti gli stati devono provvedere all'identificazione dei criteri per l'individuazione e la delimitazione delle zone di ricarica delle acque sotterranee. Salvo restando alcune differenze tecniche, in ciascuno Stato vengono individuate tre zone principali attorno alla sorgente o alla captazione che si vuole proteggere. Queste tre zone possono essere schematicamente riassunte come segue:

- Zone Z1: corrisponde all'area più interna adiacente al punto da proteggere e viene generalmente definita mediante criterio geometrico. L'accesso a questa zona è generalmente interdetto salvo personale specializzato.
- Zone Z2: corrisponde all'area intermedia e la sua estensione si basa sulla definizione di isocrone che possono variare in funzione dello Stato ed eventualmente, per uno stesso Stato, in funzione delle condizioni idrogeologiche locali.
- Zone Z3: è l'area più esterna e corrisponde all'intera area le cui acque, presumibilmente, alimentano la sorgente.

È tuttavia discrezione di ciascuno Stato l'affiancamento a queste tre zone di una zona di interesse speciale (Zone Z4) per le sue caratteristiche idrogeologiche o di vulnerabilità (ad esempio il caso dell'Inghilterra), o la riduzione a due sole zone di protezione (a titolo di esempio si cita in questo caso l'Irlanda). Esistono poi Stati, come l'Inghilterra, in cui ciascuna delle tre principali zone, presenta al suo interno delle sotto-aree che, ospitando particolari tipi di attività o particolari caratteristiche del sottosuolo, necessitano di ulteriori controlli e/o limitazioni (nella Figura 1 sono quelle colorate in grigio).

In Figura 11 si riporta uno schema generico valido per gli Stati aderenti alla WFD. È possibile notare come la struttura delle tre zone in Italia (Figura 5 del Capitolo 1), rispecchi quella Europea. Nel seguito si riportano alcuni esempi delle soluzioni adottate in alcuni Stati per la protezione delle acque sotterranee.

Si premette che, seppur il concetto che sta alla base di ciascuna zona sia il medesimo, ciascuno Stato ha provveduto alla rinomina delle varie zone secondo una nomenclatura propria. Nel seguito si farà dunque riferimento a quest'ultima.

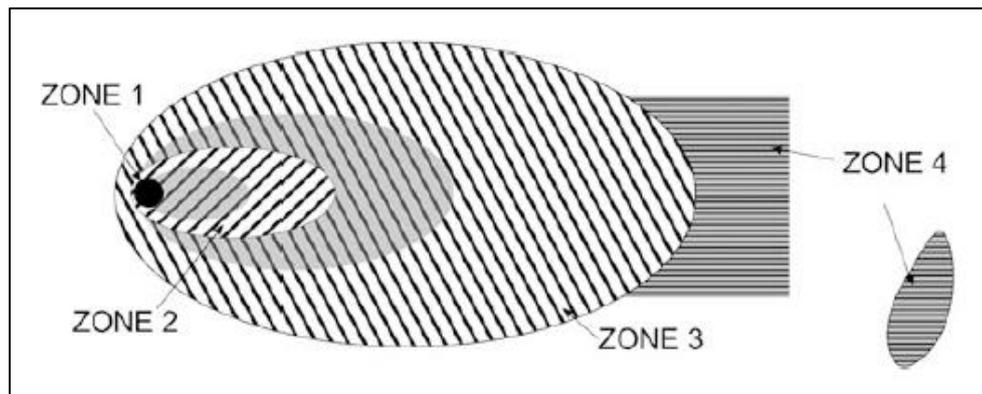


Figura 11: Schema generale delle zone di protezione in Europa (da Doveri M., 2015)

2.1 Inghilterra

Come in molti altri Stati, anche in Inghilterra l'acqua sotterranea (Figura 12) contribuisce in maniera non trascurabile al fabbisogno di acqua potabile. Per prevenire l'inquinamento e proteggere questo patrimonio idrico, sono state definite quattro zone di protezione ordinarie e tre zone aggiuntive che non sono altro che delle estensioni delle prime tre zone ordinarie:

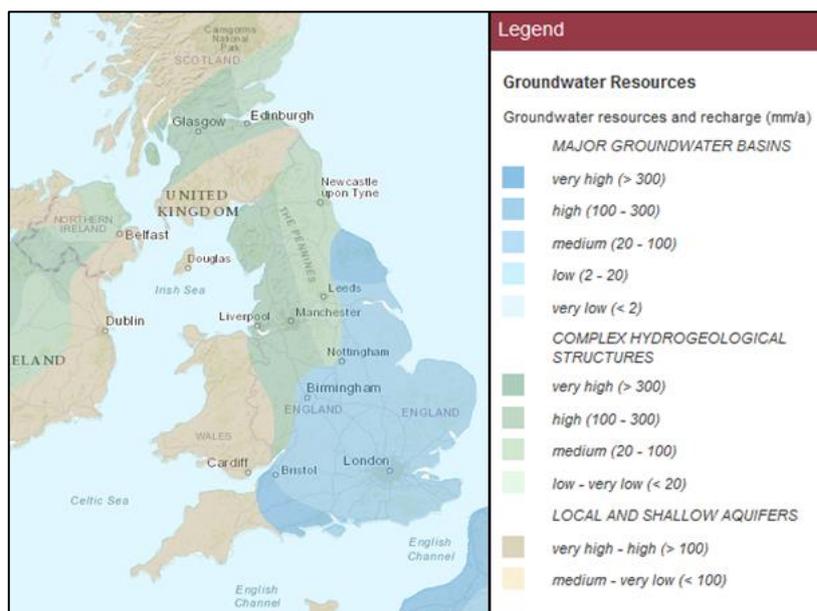


Figura 12: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica dell'Inghilterra (da WHYMAP Viewer)

- Inner zone (Zona 1): viene delineata con una isocrona a 50 giorni, mediante il criterio temporale. In ogni caso, l'estensione areale attorno alla sorgente deve avere un raggio minimo di 50 m. Esiste poi una estensione di quest'area, definita come Zona 1c, all'interno della quale sono presenti attività di perforazione profonda che potrebbero influenzare l'acquifero confinato.
- Outer zone (Zona 2): viene definita sempre secondo il criterio temporale, con una isocrona a 400 giorni. Con il criterio geometrico, l'estensione minima deve essere di 250-500 m di raggio attorno al punto di captazione. L'estensione di questa zona viene anche definita come il 25% dell'intera area che presumibilmente contribuisce alla ricarica della sorgente. Come per la zona precedente, esiste una estensione per le attività sotterranee (Zona 2c).

- Total catchment (Zona 3): rientra in questa zona l'intera area in cui l'acqua di ricarica contribuisce all'alimentazione della sorgente in esame. Per le falde acquifere altamente sfruttate, è possibile definire questa zona anche in base al rapporto tra estensione delle acque sotterranee e la ricarica media della falda. Questo rapporto deve essere maggiore o uguale al 75%. In analogia alle zone precedenti, come esiste una estensione definita Zona 3c, dove sono contenute le eventuali attività sotterranee presenti nell'area.
- Special interest (Zona 4): rappresenta l'intero bacino superficiale, le cui acque confluiscono nella falda contribuendo all'alimentazione della risorsa sotterranea. L'eventuale presenza di inquinante in questa area pregiudica la qualità dell'intera risorsa sotterranea. Non è molto utilizzata e in futuro è destinata ad essere assorbita all'interno delle tre zone precedenti.

I fattori che influenzano la geometria e l'estensione di queste aree sono diversi come le modalità di estrazione dell'acqua, dalle condizioni del terreno e da altri fattori ambientali spesso non dipendenti dalla presenza antropica nell'area. In Figura 13 si riporta uno schema riassuntivo delle caratteristiche delle tre zone.

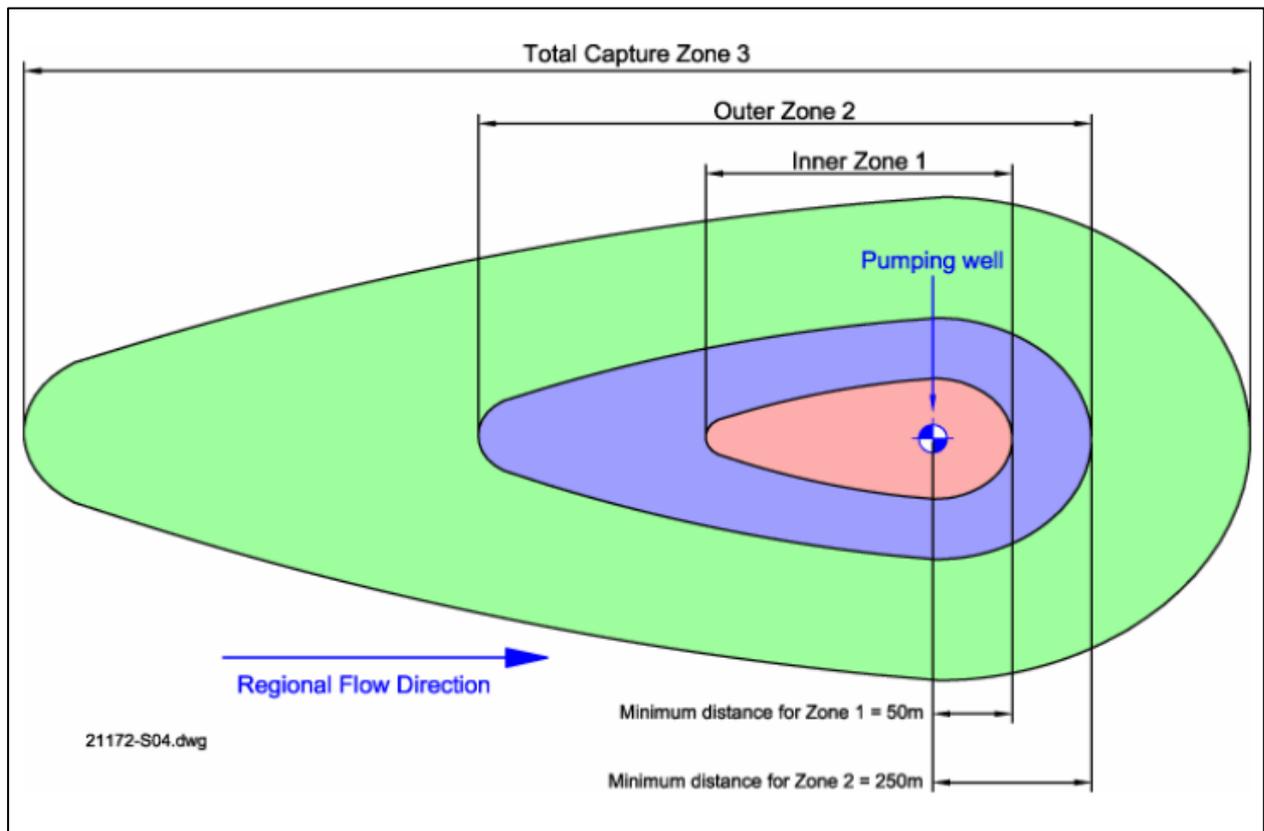


Figura 13: Schema di delimitazione delle aree di ricarica in Inghilterra (da Carey M, 2009)

2.2 Irlanda

In Irlanda, gli elementi che consentono di definire correttamente la zona di protezione delle acque sotterranee (Figura 14) sono: la definizione delle aree attorno alla sorgente o al punto di captazione e il grado di vulnerabilità delle acque sotterranee esposte a potenziale contaminazione.

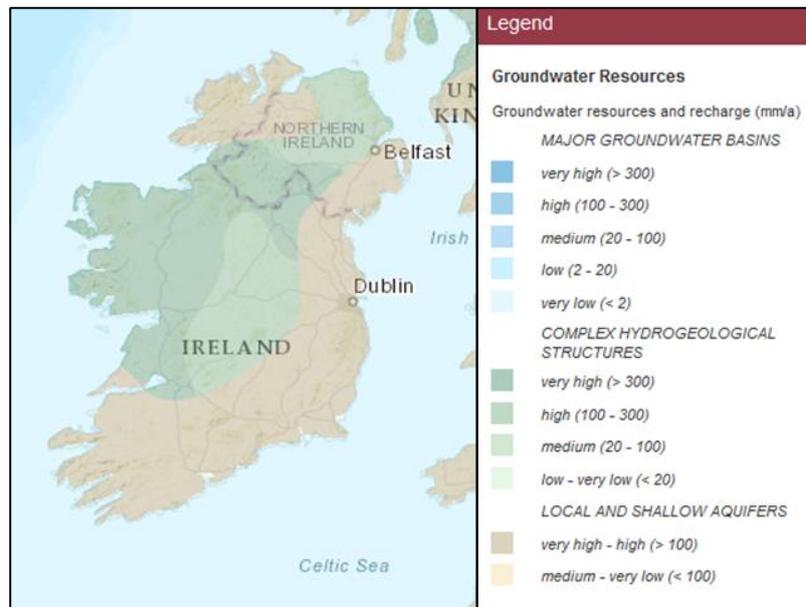


Figura 14: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica dell'Irlanda (da WHYMAP Viewer)

Per quanto riguarda le aree attorno alla sorgente (SPAs - Source Protection Areas), queste vengono definite basandosi sulle caratteristiche idrogeologiche dell'area. Qualora la qualità e la quantità di informazione sia scarsa, è possibile procedere con l'utilizzo del semplice metodo geometrico che spesso però comporta un sovradimensionamento, e in alcuni casi del sottodimensionamento, dell'area. Le aree attorno la sorgente vengono suddivise in:

- Inner Protection Area (SI): la modalità di definizione di quest'area è basata sul criterio cronologico che consente di definire un'isocrona a 100 giorni. Qualora non fosse possibile l'applicazione di questo criterio, si procede con la definizione dell'area di protezione interna mediante criterio geometrico con un raggio di almeno 300 m. Quest'ultimo criterio, lo si applica in modi differenti a seconda che si abbia a che fare con una sorgente, con un acquifero carsico o un acquifero granulare. Nel primo caso quest'area assume una forma semicircolare, negli altri casi la dimensione del raggio viene rispettivamente aumentata o ridotta in base alle necessità.
- Outer Protection Area (SO): rientra in questa zona la restante parte della Zona di Contributo (ZOC) alla sorgente. La geometria dipende dunque dalle caratteristiche e dall'estensione dell'intera area di contributo.

Per quanto concerne la vulnerabilità, il territorio in esame può presentare quattro differenti livelli di vulnerabilità, come riportato nella Tabella 5.

È importante mettere in evidenza due particolari considerazioni: il metodo basato sull'utilizzo di un raggio fisso è applicabile con raggi non superiori ai 1000 m, durante la definizione delle aree attorno alla sorgente non si prende in considerazione lo spostamento verticale delle particelle

d'acqua (e conseguentemente dell'inquinante). Quest'ultimo aspetto non deve essere tuttavia trascurato nella definizione del grado di vulnerabilità.

Tabella 5: Schema riassuntivo dei gradi di vulnerabilità delle differenti aree (da Department of the Environment and Local Government Environmental Protection Agency Geological Survey of Ireland, 1999 - Modificato)

Grado di vulnerabilità	Zone di protezione della fonte	
	Inner (SI)	Outer (SO)
Estremo (E)	SI/E	SO/E
Alto (H)	SI/H	SO/H
Moderato (M)	SI/M	SO/M
Basso (L)	SI/L	SO/L

La combinazione di questi due elementi consente di definire la zona di protezione della sorgente (Figura 15).

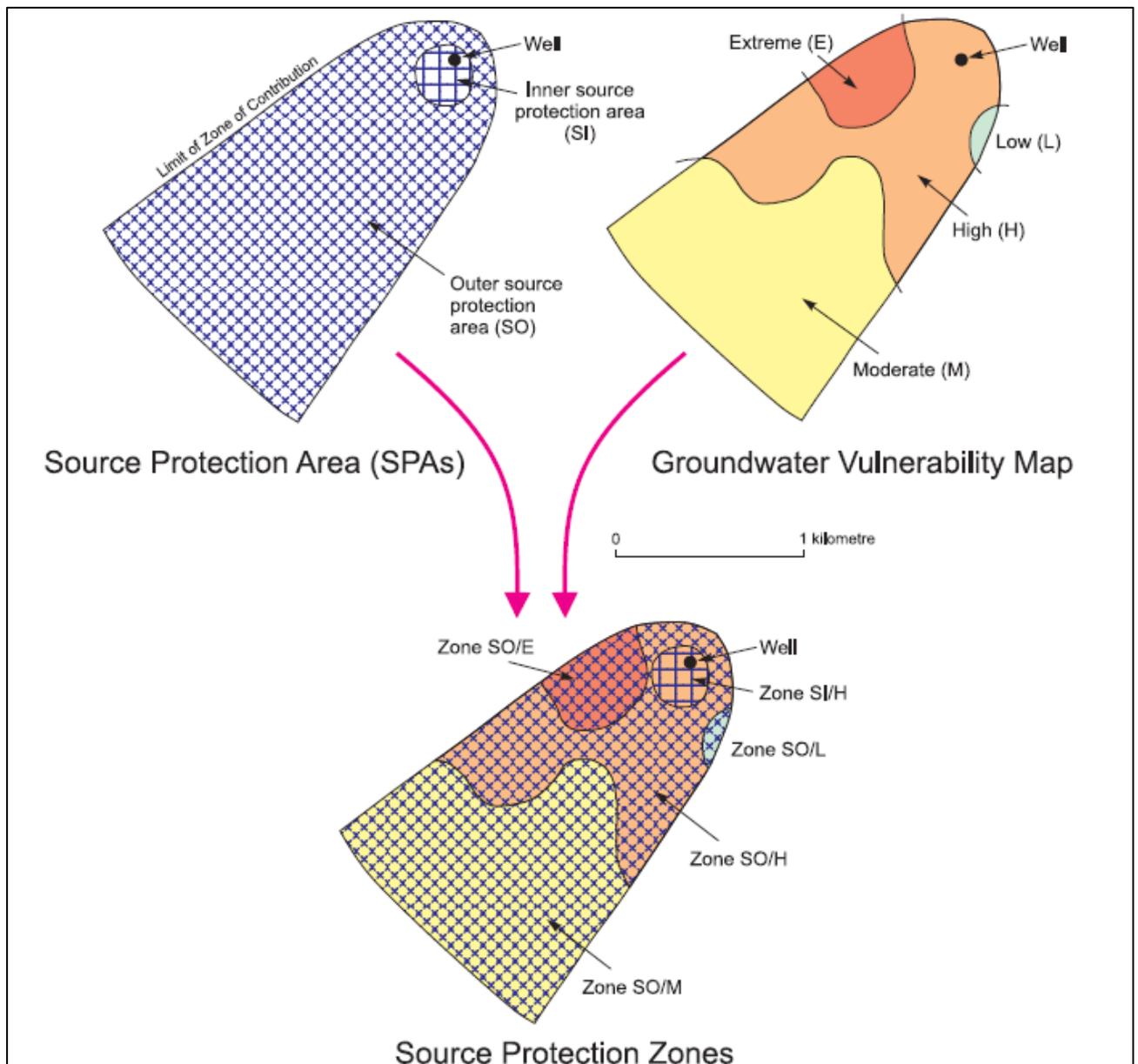


Figura 15: Delimitazione delle zone di protezione attorno a una sorgente (da US EPA, 1987 - Modificato)

2.3 Germania

Per la protezione delle acque sotterranee (Figura 16), in Germania, si fa riferimento alle “Linee guida sulla definizione delle zone - DVGW” che prevede la delimitazione di tre zone (Figura 17):

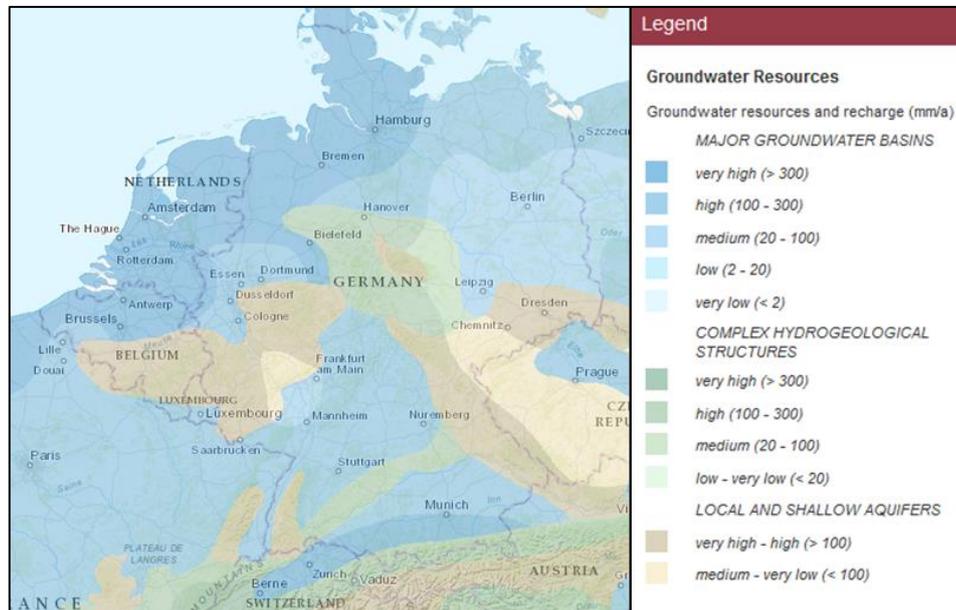


Figura 16: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Germania (da WHYMAP Viewer)

- Well Field Protection Zone - Sector 1 (Zona I): zona di azione correttiva. È la zona adiacente alla sorgente o al pozzo di captazione e ha una estensione almeno di 10 m con ampliamento fino a 20 m in determinate condizioni. Questa zona è caratterizzata dal divieto assoluto di accesso all'area. Le uniche opere realizzabili sono quelle necessarie per la captazione.
- Narrow Protection Zone - Sector 2 (Zona II): zona di attenuazione. La definizione di questa zona si basa sul criterio temporale, andando a delineare una isocrona a 50 giorni. È stata definita questa distanza poiché si è dimostrato che 50 giorni è il tempo medio necessario per la riduzione di un contaminante entro i limiti imposti dalla legge. Qualora fosse necessario, il confine di quest'area viene definito utilizzando isocrone differenti. Le modalità di definizione dell'isocrona dipende anche dalla superficie piezometrica che, nel caso di spessore superiore ai 4 metri si utilizza il metodo di Rehse²². Per livelli inferiori, l'estensione non deve comunque essere inferiore ai 100 m.
- Wide Protection Zone - Sector 3 (Zona III): zona di gestione del pozzo. Ricopre tutta l'area le cui acque alimentano la sorgente o vengono estratte dal pozzo di emungimento. Qualora abbia una estensione superiore a 2 km la Zona III viene divisa in due sottozone definite come Zona III A e Zona III B, aventi caratteristiche e limitazioni differenti.

²² Il metodo di Rehse (1977) è un metodo empirico utilizzato per stimare il tempo necessario per la degradazione e l'eliminazione degli agenti patogeni presenti all'interno dei pori. Il metodo si basa su quattro punti fondamentali: trascurare i primi 4 m di copertura, determinare il parametro indice I per ciascuno strato, determinare il grado di pulizia M_d , calcolare il tempo di residenza dell'acqua mediante apposita equazione ($T = 50 - 50M_d$). Per un maggiore approfondimento si rimanda a: Strobl R. O., Robillard P. D. (Febbraio 3, 2005). "Comparison of U.S. and German wellhead protection approaches".

Il Codice di buone pratiche affronta anche casi particolari come la definizione di confini delle zone di protezione per i bacini di raccolta molto grandi o quando ci sono più pozzi situati nello stesso bacino d'utenza. In generale, la dimensione dell'area da proteggere dipende dai tassi di astrazione e ricarica nel bacino di utenza: più alto è il tasso di astrazione più grandi sono le zone di protezione da definire.

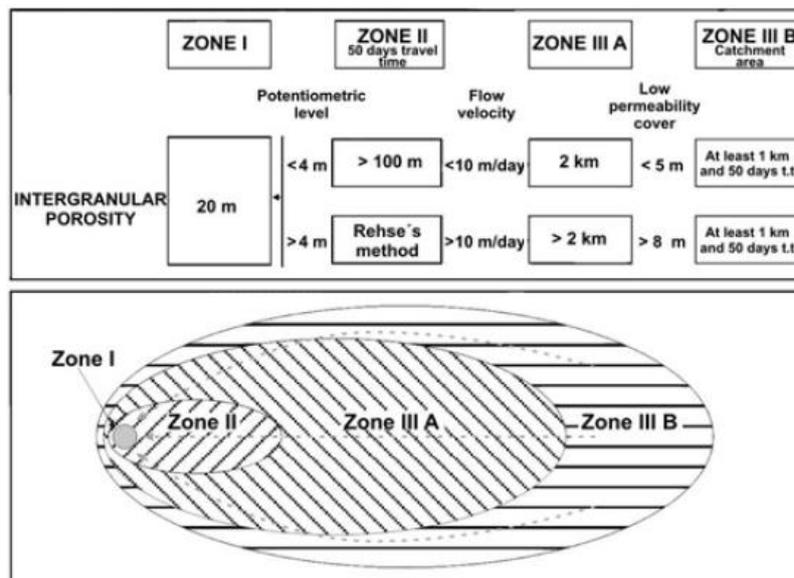


Figura 17: Schema di delimitazione delle aree di ricarica in Germania (da García García A., 2003 - Modificata)

2.4 Slovenia

I punti che fungono da fondamento per la definizione delle aree di ricarica delle acque sotterranee in Slovenia (Figura 18) sono: la velocità di flusso (che la si assume omogenea all'interno di ciascun acquifero) non è mai superiore ai 10 m al giorno, mano a mano che ci si allontana dal punto di captazione il rischio di inquinamento dovuto a microrganismi o ad altre sostanze diminuisce.

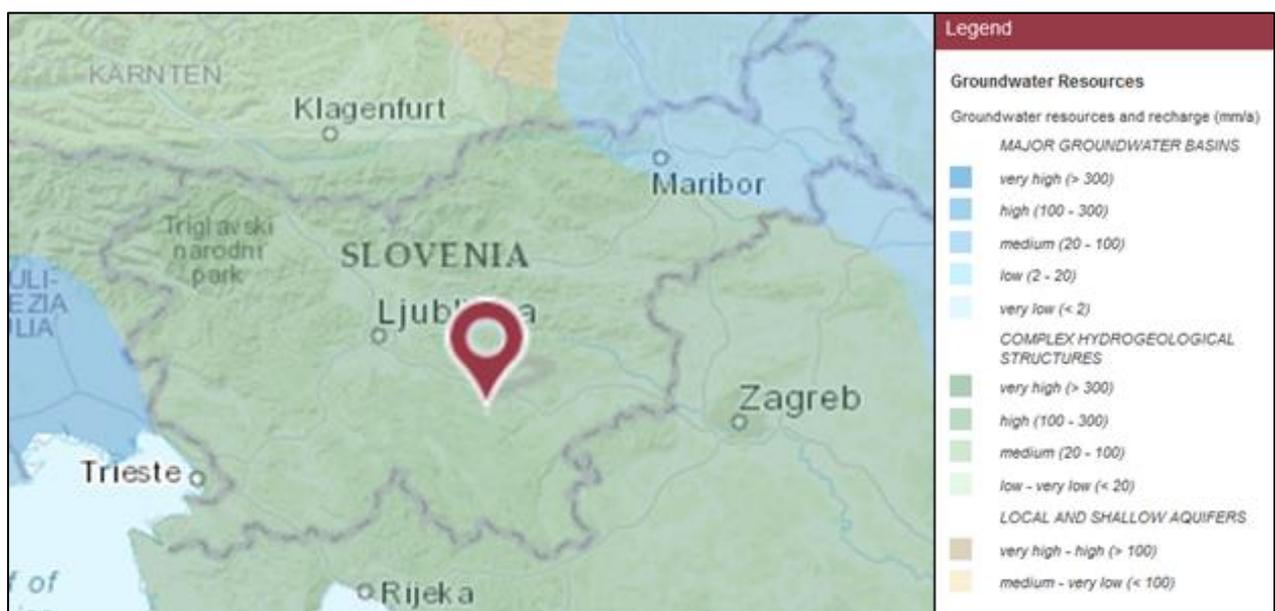


Figura 18: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Svizzera (da WHYMAP Viewer)

In Slovenia la protezione delle acque sotterranee, prevede la definizione di tre zone differenti attorno a ciascuna sorgente (Figura 19):

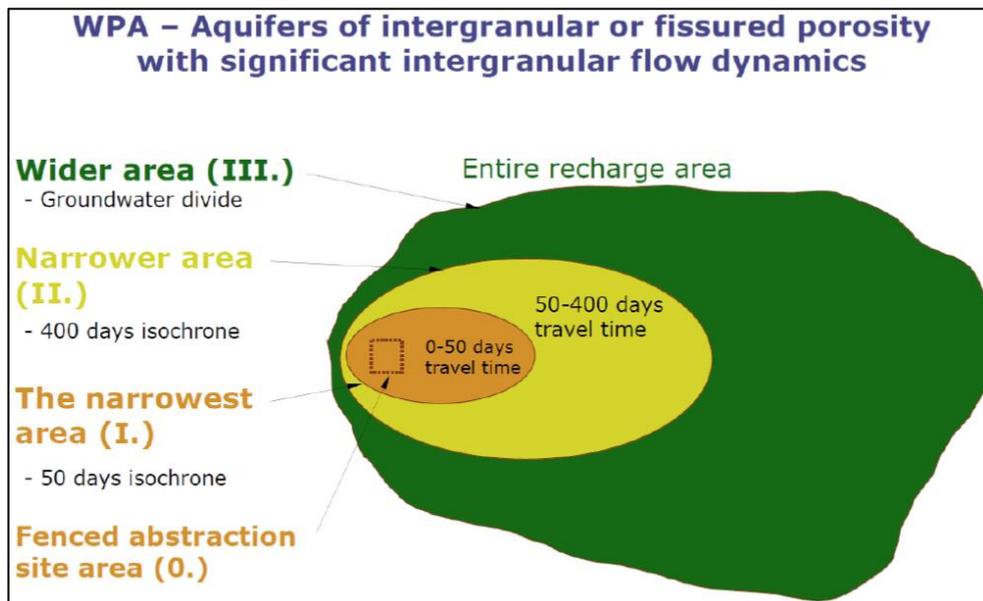


Figura 19: Zone di protezione di un acquifero poroso (da Prestor J., 2008)

- The Narrowest Area (Zona I): la definizione del confine di quest'area si basa in primis sul criterio temporale, con la definizione di una isocrona a 50 giorni. L'estensione tuttavia non deve essere inferiore ai 50 m.
- Narrower Area (Zona II): l'estensione di questa zona è definita mediante l'individuazione di una isocrona compresa nell'intervallo 50-400 giorni. Il limite inferiore lo si utilizza nel caso di acquiferi con basso rischio di inquinamento, grazie anche all'attuazione di adeguate misure di protezione. Il limite superiore lo si utilizza nel caso di medio o alto rischio di inquinamento. Accanto al criterio temporale, la normativa slovena prevede che l'estensione minima di questa zona non sia inferiore all'area contenente un quarto dell'intero volume d'acqua estratto durante un intero anno idrologico medio.
- Wider Area (Zona III): il bordo esterno di quest'area corrisponde con il confine del bacino d'utenza. È importante tenere in considerazione il fattore di dispersione.

È importante evidenziare l'esistenza di alcune deroghe per quanto riguarda la definizione delle zone sopra definite. L'eventuale presenza di strati superficiali a bassissima permeabilità, il prelievo di acqua da acquiferi profondi mediante pozzi opportunamente completati e isolati dall'acquifero superficiale, costituiscono elementi di deroga alla definizione delle aree di protezione sopra definite.

2.5 Svizzera

Nonostante la sua non appartenenza alla Comunità Europea, anche nella Confederazione svizzera è stato adottato un approccio del tutto simile agli Stati appartenenti alla Comunità per quanto concerne la protezione delle aree di ricarica. In Figura 20 è possibile vedere la distribuzione delle risorse idriche sotterranee all'interno del territorio svizzero.

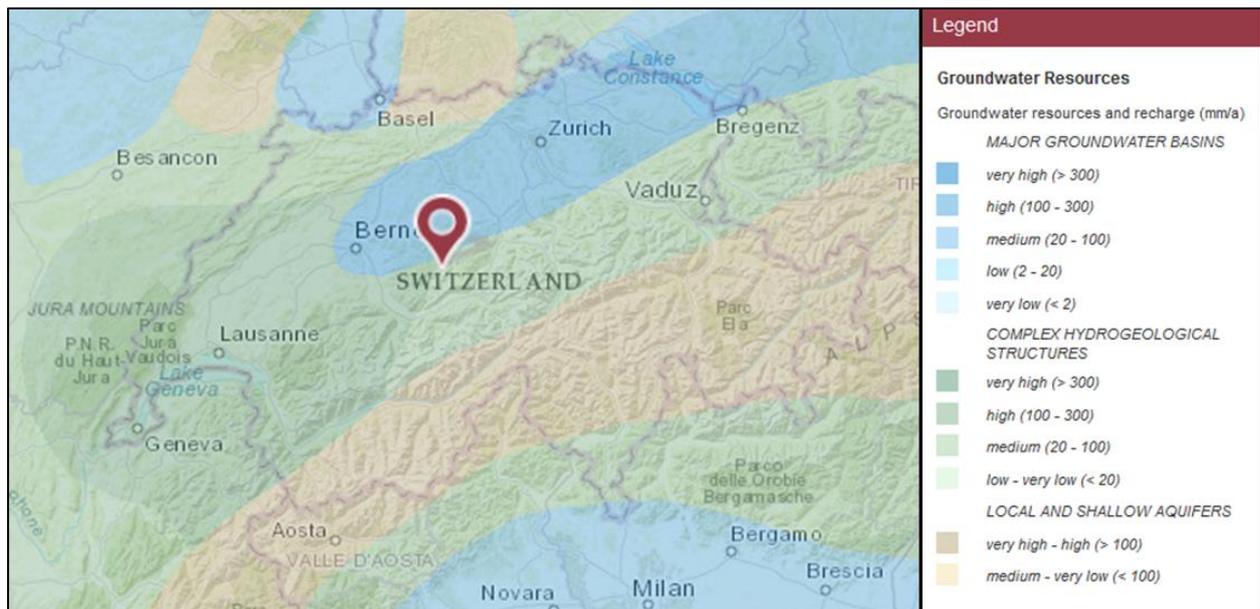


Figura 20: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Svizzera (da WHYMAP Viewer)

Secondo la “Legge federale sulla protezione delle acque”²³, spetta ai Cantoni delimitare: le zone di protezione attorno ai punti di captazione e agli impianti di pubblico interesse; e definire, qualora lo ritengano necessario, delle limitazione del diritto di proprietà (Art. 20). Per quanto concerne la delimitazione delle aree di protezione (Art. 21), spetta ai cantoni il compito di delineare le suddette aree, poiché rivestiranno un ruolo importante nel futuro sfruttamento e alimentazione della falda. Analogamente alla WFD, anche in questo caso si prevede l’imposizione di vincoli relativi alla costruzione di edifici, di impianti e all’esecuzione di lavori che potrebbero compromettere lo sfruttamento o l’alimentazione dell’acquifero.

È riportata invece sul “Ordinanza federale sulla protezione delle acque”²⁴ la strategia per la definizione delle zone di protezione delle acque sotterranee. Si prevede la realizzazione di 3 differenti zone il cui obiettivo è quello di salvaguardare le acque di una captazione a scopo potabile, di interesse pubblico, e comprendono la parte del bacino di alimentazione più esposta al pericolo di inquinamento: la prima zona corrisponde alla captazione e le immediate vicinanze e bisogna impedire ogni forma di danneggiamento o di inquinamento della sorgente e degli impianti di ravvenamento²⁵ presenti, danneggiati o inquinati (Zona S1 o Zona di captazione). La seconda zona serve a impedire che la realizzazione di opere sotterranee inquinino l’acqua o ostacolino il suo afflusso alla captazione (Zona S2 o Zona di protezione adiacente), la terza zona deve garantire la possibilità di intervenire tempestivamente con adeguate soluzioni di risanamento (Zona S3 o Zona di protezione distante). In Figura 21 si riporta uno schema riassuntivo delle caratteristiche delle 3 zone che verranno tuttavia affrontate con maggiore dettaglio nel seguito.

²³ Consiglio federale svizzero (Aggiornamento Gennaio 1, 2017). “814.20 - Legge federale del 24 gennaio 1991 sulla protezione delle acque (LPAC)”.

²⁴ Consiglio federale svizzero (Aggiornamento Gennaio 1, 2018). “814.201 - Ordinanza del 28 ottobre 1998 sulla protezione delle acque (OPAC)”.

²⁵ Impianti in cui avviene l’innalzamento del livello di una falda freatica mediante alimentazione artificiale per mezzo di acque fluviali fatte filtrare nel terreno.

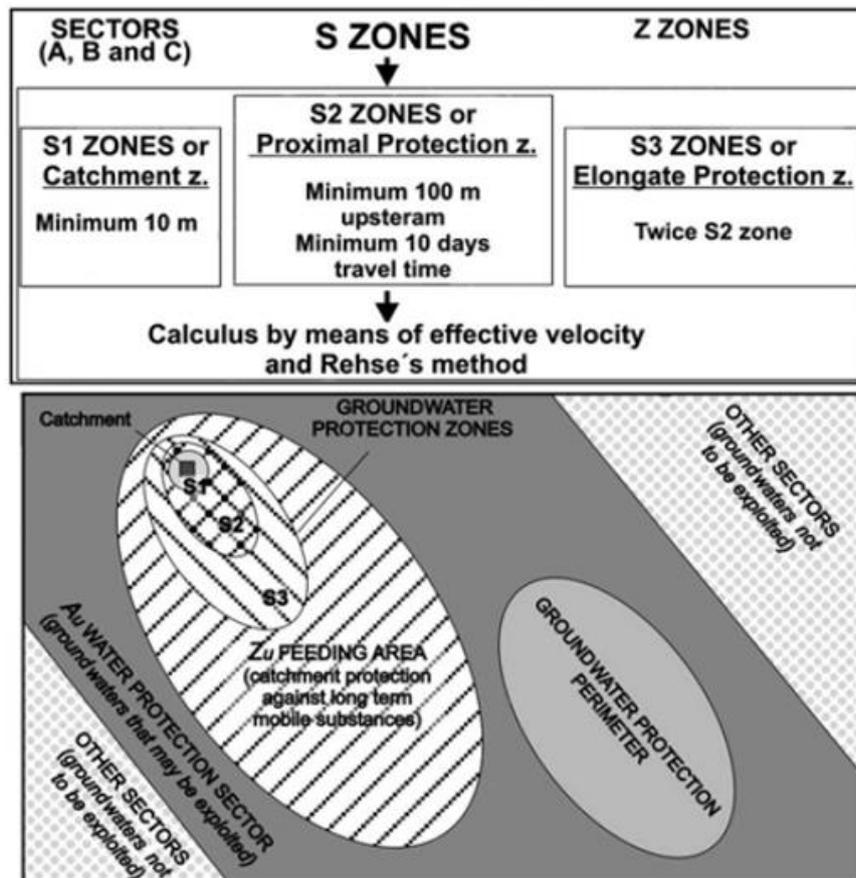


Figura 21: Schema di delimitazione delle aree di ricarica in Svizzera (da OFEFP, 2003 - Modificata)

Oltre a queste zone principali, l'Ordinanza federale prevede la definizione di altre 2 zone aggiuntive: la zona S_h , che comprende le aree del bacino con vulnerabilità elevata e la zona S_m , che comprende le aree con vulnerabilità media. Queste zone sono finalizzate a impedire che le caratteristiche qualitative e idrodinamiche dell'acqua siano pregiudicate dalla costruzione e dall'utilizzo di impianti.

Ai Cantoni viene inoltre affidato anche il compito di designare i settori di protezione delle acque (Art. 29). Quelli maggiormente a rischio sono quattro e sono:

- Settore di protezione delle acque sotterranee (A_u) e delle acque superficiali (A_o): questi settori hanno la finalità di proteggere la qualità delle acque per garantirne l'utilizzazione.
- Settore d'alimentazione delle acque sotterranee (Z_u) e delle acque superficiali (Z_o): per la protezione della qualità di captazione, avente pubblico interesse, da sostanze non sufficientemente degradate, da prodotti fitosanitari e da fertilizzanti.

La delimitazione di queste zone avviene secondo differenti metodi, in funzione delle caratteristiche della sorgente, dell'acquifero e del grado di vulnerabilità. In Figura 22 si riporta la mappa relativa alle zone e alle aree di protezione delle acque sotterranee dell'intero territorio elvetico.

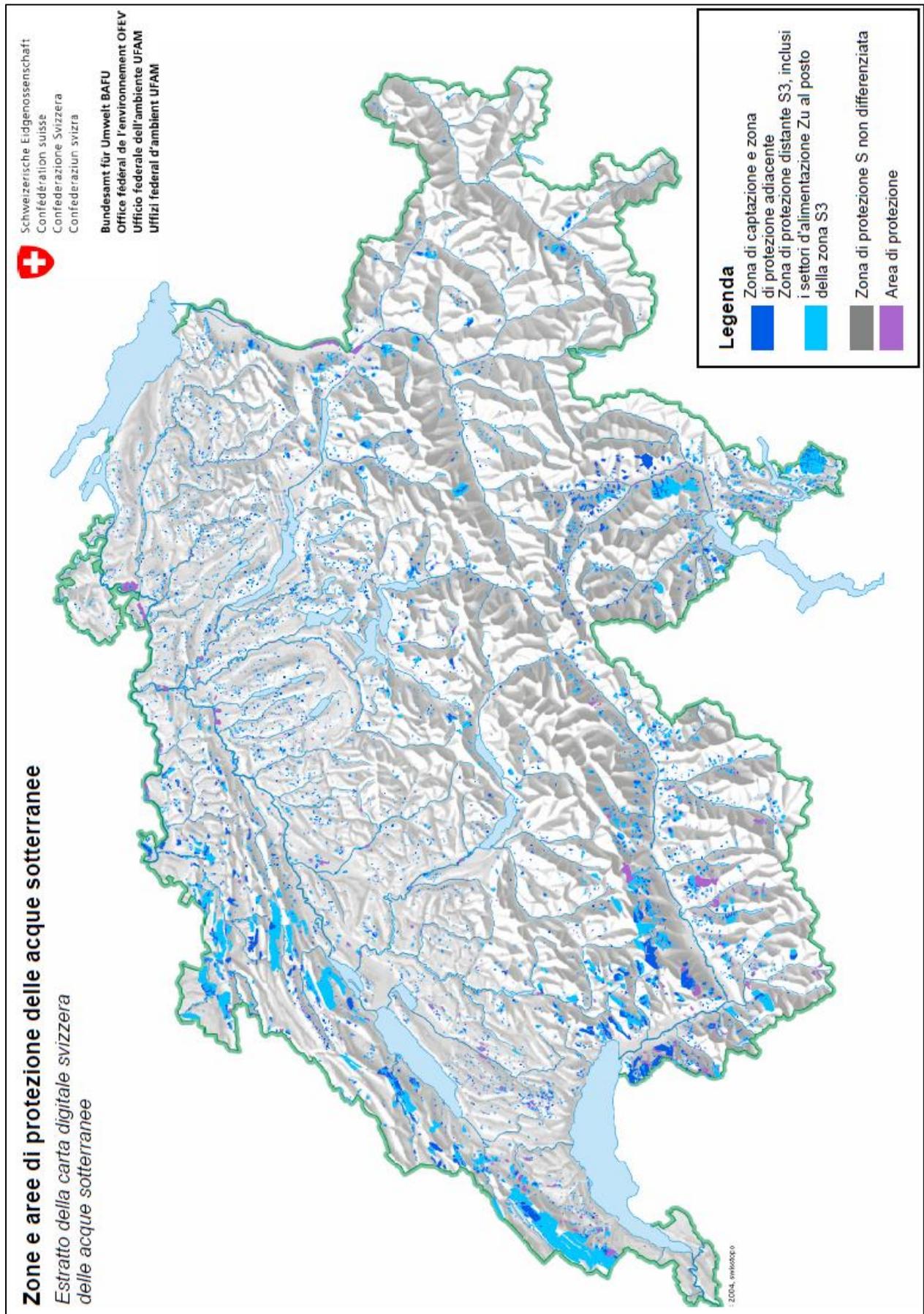


Figura 22: Zone e aree di protezione delle acque sotterranee (da Ufficio federale dell'ambiente UFAM, 2015)

Sorgenti a bassa vulnerabilità

In presenza di sorgenti a bassa vulnerabilità si applica il metodo della distanza. L'estensione delle tre zone deve essere tale da garantire un tempo di permanenza delle acque all'interno dell'intera area, sufficiente a consentire il naturale processo di degradazione delle eventuali sostanze inquinanti presenti all'interno del flusso. Questo metodo è applicabile ad acquiferi omogenei e ad acquiferi eterogenei. Le modalità di definizione delle 3 zone, possono essere così descritte:

- Zona S1: l'estensione deve essere di minimo 10 m attorno o a monte della sorgente e deve contenere al suo interno gli eventuali scarichi, trincee o gallerie drenanti presenti.
- Zona S2: si estende, a partire dal perimetro della zona S1, in direzione di monte per almeno 100 metri. Si considera che il flusso dell'acquifero sia monodirezionale.
- Zona S3: la distanza tra l'estremo della zona S2 e l'estremo della zona S3 deve essere uguale o maggiore alla distanza tra gli estremi della zona S1 e della zona S2.

Sorgenti vulnerabili in acquifero leggermente eterogeneo

In questo caso si utilizza il metodo delle isocrone, in cui l'estensione delle aree è in funzione del tempo di residenza necessario per il naturale degrado delle sostanze contaminanti. Questo metodo lo si usa quando la velocità del flusso delle acque è medio-alto, con valori massimi di poche decine di metri al giorno. Il tracciamento delle isocrone avviene mediante l'utilizzo di traccianti. L'applicazione del metodo avviene per acquiferi fratturati e le modalità di definizione delle 3 zone sono:

- Zona S1: l'estensione deve essere di minimo 10 m attorno o a monte della sorgente e deve contenere al suo interno gli eventuali scarichi, trincee o gallerie drenanti presenti.
- Zona S2: il limite di questa zona è definito mediante l'identificazione a monte della sorgente dell'isocrona corrispondente a 10 giorni, in funzione della massima velocità di flusso. In ogni caso, la sua estensione, partendo dal limite di S1, non deve essere inferiore ai 100 metri.
- Zona S3: la distanza tra l'estremo della zona S2 e l'estremo della zona S3 deve essere uguale o maggiore alla distanza tra gli estremi della zona S1 e della zona S2.

Sorgenti vulnerabili in acquifero fortemente eterogeneo

In questo caso si utilizza il metodo DISCO (o metodo della mappatura della vulnerabilità delle acque sotterranee). Si prevede l'utilizzo di traccianti per la determinazione delle velocità delle acque sotterranee che possono raggiungere anche velocità nel range delle centinaia di metri al giorno. Per l'applicazione di questo metodo si fa riferimento a due parametri principali: le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (DIScontinuities parameter) e le caratteristiche della copertura quali lo spessore e il grado di permeabilità (protective COVer parameter).

Questo metodo multiparametrico viene articolato in 4 fasi che possono essere così schematizzate:

- Fase 1: valutazione dei due parametri precedentemente citati (DIS e CO) con riferimento all'intera area suddivisa in sotto-aree aventi proprietà uniformi.

- Fase 2: determinazione del fattore di protezione intermedio “ F_{int} ” in funzione dei valori dei parametri precedentemente definiti mediante l’equazione: $F_{int} = 2DIS + 1CO$.
- Fase 3: valutazione del parametro di deflusso e calcolo del fattore di protezione finale “F” e successiva realizzazione della sua mappatura.
- Fase 4: in funzione del fattore di protezione “F” si procede alla definizione delle zone con le modalità riportate nella Tabella 6.

Tabella 6: Definizione delle zone di protezione in funzione del fattore di sicurezza “F” (da Pochon A., 2008)

Fattore di protezione “F”		Vulnerabilità	Zona
Molto basso	0, 1	Molto alta	S1
Basso	2, 3, 4	Alta	S2
Medio	5, 6, 7	Media	S3
Alto	8, 9, 10	Bassa	Resto del bacino idrografico

Nel caso in cui, nelle immediate vicinanze della sorgente siano presenti scarichi, trincee e gallerie, queste vengono fatte rientrare nella zona S1 mantenendo una fascia di tamponamento, tra queste opere e il confine della zona, di 10-30 metri in funzione della pendenza dell’area. Altro accorgimento da rispettare è riferito alla zona S3: questa deve distare dalla zona S1 di almeno 100 metri. Infine, la zona definita come “Resto del bacino idrografico” deve distare dal confine della zona S1 non meno di 200 metri.

CAPITOLO 3

Programmi di protezione delle acque nel resto del mondo

Mentre negli Stati aderenti all'Unione Europea la protezione delle acque avviene secondo le direttive contenute nella WFD redatta dalla Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo, nel resto del mondo la tutela delle aree di ricarica di un acquifero, e conseguentemente dell'acquifero stesso, avvengono secondo direttive imposte dagli appositi organi statali di competenza. Mentre gli approcci al problema sono differenti, tutte le leggi, regolamenti e direttive, hanno come unico obiettivo quello di garantire il mantenimento della qualità e della quantità della risorsa idrica: quando la riserva di acqua potabile è compromessa a causa di una cattiva gestione dei centri di pericolo, la principale conseguenza è la compromissione della salute pubblica.

Indipendentemente dallo Stato, il punto di partenza è che la prevenzione dell'inquinamento richiede, anche in termini economici, un quantitativo di risorse molto inferiore rispetto a quello richiesto per la realizzazione di un sistema di bonifica e riqualificazione dell'area. A titolo di esempio si cita la fuoriuscita dal servizio di un pozzo della rete idrica a causa di un inquinamento dell'acquifero sottostante. Questa chiusura del pozzo porta necessariamente alla necessità di realizzare un nuovo pozzo per l'estrazione di acqua potabile e la progettazione di un sistema di contenimento/bonifica delle acque contaminate al fine di ripristinare la buona qualità dell'acqua.

La realizzazione di appositi programmi, si basa inoltre sull'utilizzo delle Best Available Science (BAS), ossia impone l'utilizzo degli ultimi progressi in ambito scientifico non solo in termini di scoperte ma anche di tecnologie, modelli e modalità di approccio al problema.

Come si può osservare dall'analisi delle documentazioni disponibili, è stato possibile concludere che in quasi la totalità degli Stati extra EU si adottano soluzioni simili a quelle previste dalla WFD: la realizzazione di zone attorno alle sorgenti o ai punti di captazioni, aventi diverso grado di vincoli, attui a garantire il mantenimento della qualità delle acque in corrispondenza delle sorgenti stesse. Si prevede la definizione di una prima zona molto ristretta in cui generalmente è fatto divieto di realizzazione di qualsiasi opera non inerente all'impianto di captazione. Si procede quindi con una seconda zona più esterna dove i vincoli sono prevalentemente di tipo costruttivo. Infine si ha una terza zona più esterna in cui i vincoli sono meno restrittivi. Accanto a queste tre aree, alcuni stati prevedono l'aggiunta di altre zone con particolari limitazioni/vincoli in funzione delle particolari esigenze imposte dalla situazione statale. Molti Stati prendono proprio come punto di partenza le direttive contenute nella legislazione europea.

A titolo esemplificativo si riportano le decisioni legislative attuate in alcuni Stati esterni all'Unione Europea.

3.1 Stato di Washington

Il dipartimento di ecologia dello Stato di Washington, ha redatto una guida finalizzata ad aiutare gli enti locali e la popolazione a capire quale comportamento adottare per proteggere le risorse idriche statali. È questo il documento dalle quali le amministrazioni hanno preso le basi per una corretta pianificazione urbanistica e destinazione del suolo.

Al fine di raggiungere l'obiettivo finale, le linee guida sopra citate riportano gli otto punti fondamentali: Identify, Analyze, Inventory, Classify, Designate, Protect, Ensure e Manage.

Il primo step consiste nell'identificazione, mediante apposite mappe tematiche, della posizione dei punti di ricarica (con particolare riferimento ai pozzi idrici pubblici e privati) e l'estensione delle risorse idriche sotterranee. Si riporta in Figura 23, a titolo di esempio, la mappa relativa alle aree di ricarica e al loro grado di ricarica, reperibile sul sito della WHYMAP²⁶. Un'accortezza importante nell'utilizzo delle mappe, così come per l'utilizzo dei registri e degli altri supporti utilizzati, rimane sempre quello di verificare la veridicità delle informazioni contenute. Può capitare, infatti, che l'informazione contenuta sia poco veritiera o in alcuni casi mancante. Accanto a ciò vi è dunque la necessità di eseguire test e prove direttamente in campo per poter avere una più chiara conoscenza dell'area. Il risultato di questa prima fase è la redazione di una nuova mappa riportante tutte le aree di ricarica critiche della zona di interesse. La definizione delle aree di protezione di ciascun pozzo avviene mediante criterio geometrico. I criteri utilizzati per la definizione di queste aree sono i Performance Standards²⁷, i cui risultati influenzano le decisioni future in merito alla politica, alla pianificazione e alla legiferazione.

Il secondo passo è quello di definire il grado di suscettibilità dell'ambiente circostante all'area di interesse mediante uno studio idrogeologico in cui sono riportate le informazioni relative all'uso dell'acquifero.

Si procede quindi al censimento delle fonti di inquinamento che potenzialmente potrebbero impattare negativamente sulla qualità delle acque. In base a questo censimento è possibile procedere alla definizione della vulnerabilità²⁸ e quindi alla realizzazione di apposite carte dedicate in cui si evidenziano le aree maggiormente vulnerabili.

In base alle condizioni locali, i vari enti, con la possibilità di avvalersi di consulenti esterni, provvedono alla realizzazione di piani dettagliati attui a ridurre al minimo il rischio di inquinamento, andando ad agire sulle fonti di pericolo puntuali o diffuse. A questi enti è

²⁶ Il World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme (WHYMAP) è un consorzio formato da diversi enti quali UNESCO, IHP, IGCP, IAH, IGRAC, CGMW, IAEA e BGR, il cui scopo è quello di contribuire a migliorare la gestione delle risorse idriche terrestri mediante mappature e valutazioni idrogeologiche.

²⁷ Il Critical Areas Assistance Handbook, per la gestione delle acque statali, afferma che: "Le aree critiche possono essere designate adottando standard di prestazione specifici, delineando aree geografiche specifiche o entrambe. Generalmente, gli standard di prestazione sono preferiti, poiché qualsiasi tentativo di mappare in modo completo le zone umide, ad esempio, in tutta la giurisdizione sarebbe probabilmente troppo inesatto a fini regolamentari. Anche così, è consigliabile la mappatura delle aree critiche a scopo informativo. Tutte le aree che soddisfano la definizione di area critica, indipendentemente dall'identificazione formale, devono essere designate come tali."

²⁸ È importante ricordare che la vulnerabilità si riferisce al rischio di contaminazione da fenomeni naturali e antropici. La suscettibilità invece è riferita al solo rischio di contaminazione naturale.

affidato anche il compito di assicurarsi dell'attuazione delle miglorie nonché dei piani di protezione.

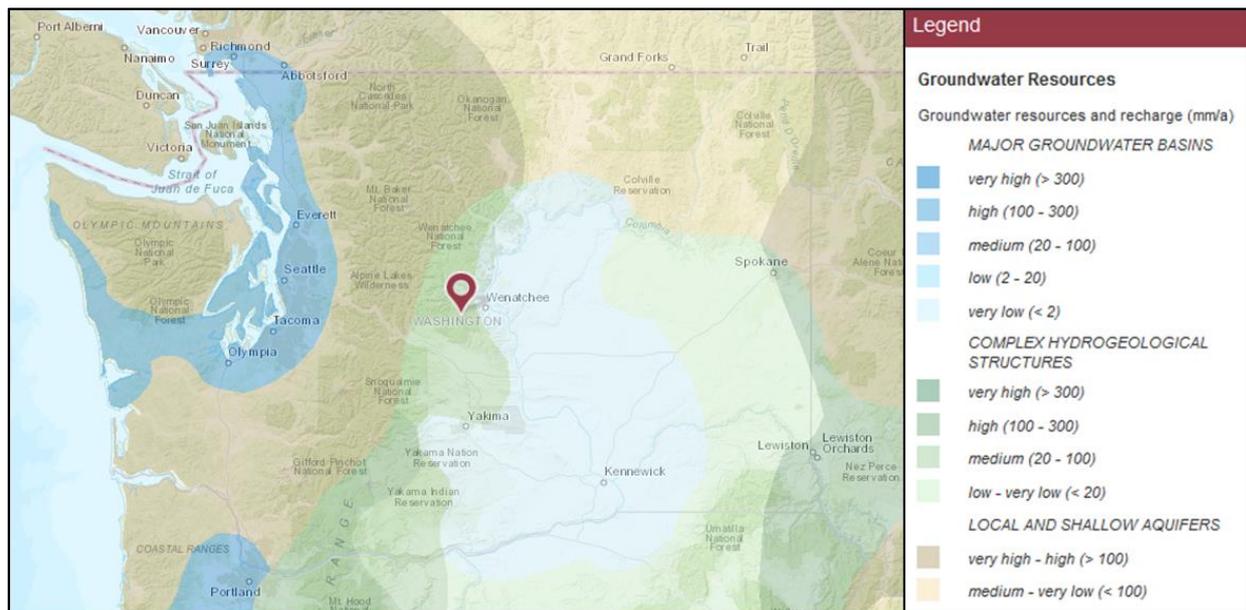


Figura 23: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica dello Stato di Washington (da WHYMAP Viewer)

L'ultimo punto prevede la gestione in maniera corretta dei prelievi e le immissioni di acqua, al fine di preservare la riserva idrica. Come detto pocanzi, fondamentale è l'utilizzo delle BAT con particolare riferimento, per quanto riguarda lo Stato di Washington, a quelle definite dal Dipartimento per la comunità, il commercio e lo sviluppo economico. L'applicazione delle BAT al campo delle aree di ricarica critiche prevede la localizzazione di tali aree e alla successiva definizione delle caratteristiche fisiche. In funzione di queste si procede quindi alla valutazione del rischio di contaminazione e alla valutazione di quali siano le migliori soluzioni ingegneristiche atte a prevenire la contaminazione stessa. La scelta di queste soluzioni devono alterare il meno possibile il comportamento della ricarica naturale dell'acquifero.

3.2 Sudafrica

Da sempre il Sudafrica è stato caratterizzato da una scarsa politica di protezione delle acque sotterranee, a favore tuttavia delle risorse superficiali. A sottolineare questa mancanza di norme adeguate a garantire il mantenimento di un buon grado di qualità, è sufficiente dire che a partire dagli anni '90 si è registrata una sempre più crescente percentuale di morti, legate alla contaminazione dell'acqua ad opera di sostanze nocive. Questa non corretta legislazione è legata anche al fatto che la struttura del sottosuolo è molto fratturata, rendendo quindi complessa la realizzazione di appositi sistemi di gestione. Tuttavia, essendo l'acqua sotterranea una risorsa utilizzata da quasi la totalità della popolazione, si ha la necessità di apposite regolamentazioni atte a garantirne la preservazione. Accanto a quanto appena detto, si aggiunge anche il basso grado di ricarica delle acque sotterranee (Figura 24).

Il piano di zonazione introdotto per la protezione delle risorse idriche sotterranee, prevede il coinvolgimento di tutti i soggetti interessati su scala nazionale, come ad esempio i ministeri dell'agricoltura e quello della salute pubblica, fino ad arrivare agli enti locali, sia quelli che

svolgono mansioni di controllo che quelli che fungono da rappresentanti delle varie categorie di attività dislocate sul territorio (industrie, aziende agricole, fattorie, etc.).

Il passo successivo consiste nella definizione delle caratteristiche degli acquiferi. Tra le caratteristiche di maggior rilievo, sono fondamentali l'identificazione della direzione di flusso, la dislocazione nello spazio delle sorgenti e dei punti di ricarica, per poter definire la vulnerabilità dell'acquifero stesso. La realizzazione delle carte di vulnerabilità si basa sull'utilizzazione di diversi metodi tra cui il metodo DRASTICS. Non meno importante è la tipologia di acquifero: è infatti quest'ultima che influenza maggiormente la contaminazione di un acquifero consentendo una maggiore o una minore velocità di propagazione del contaminante.

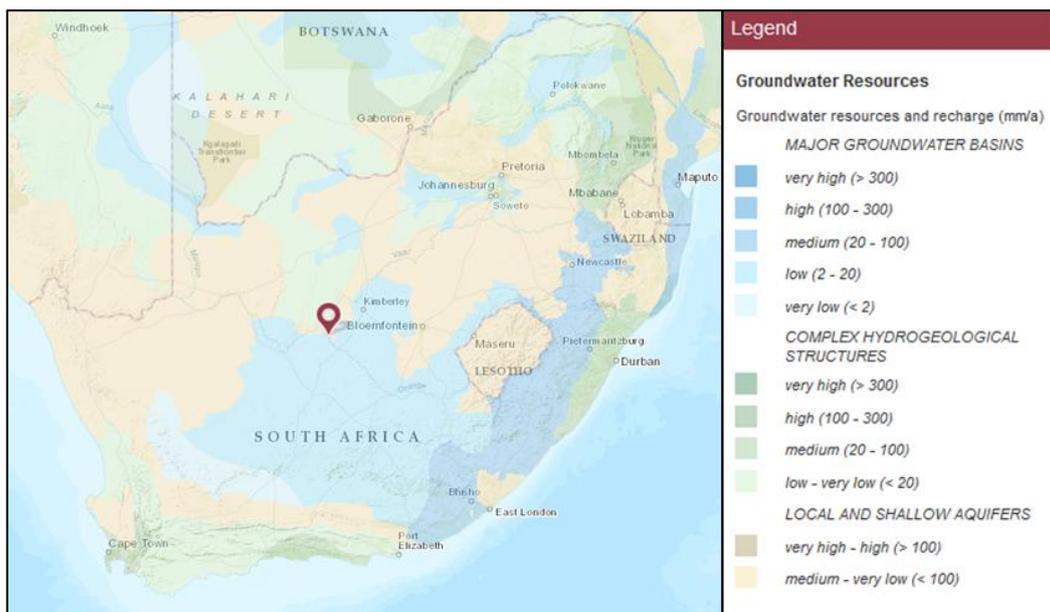


Figura 24: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica del Sudafrica (da WHYMAP Viewer)

Altro step fondamentale che precede la definizione delle varie zone di protezione, è l'individuazione delle varie sorgenti di contaminazione. Queste ultime sono stimate prevalentemente in funzione della tipologia di uso del suolo e della tipologia di sostanze eventualmente utilizzate. Ad esempio, come dimostrato da Usher et al.²⁹, nelle aree in cui si ha una concentrazione di industrie manifatturiere sono spesso associate delle contaminazioni di metalli pesanti e composti organici. Le aree di orticoltura intensiva sono collegate a una eccessiva contaminazione da pesticidi e fertilizzanti. Le discariche generano percolato che può contaminare le falde acquifere. Non meno importante è la definizione delle possibili vie di propagazione che i contaminanti possono seguire nel sottosuolo.

Nota la vulnerabilità dell'area e note le fonti di pericolo, sia puntuali che diffuse, si procede con la definizione delle aree di protezione (Figura 25):

- Operational Zone: è definita anche come zona di prevenzione degli incidenti ed è un'area immediatamente adiacente alla sorgente o al pozzo di captazione e serve per impedire un rapido accesso dei contaminanti con le risorse sotterranee.

²⁹ Usher BH, Pretorius JA, Dennis I, et al (2004). "Identification and prioritization of groundwater contaminants and sources in South Africa's urban catchment".

- Inner Protection Zone: spesso indicata come area di protezione microbica, questa zona viene definita con il criterio temporale e ha una estensione tale da garantire la riduzione della concentrazione di agenti patogeni entro i limiti imposti dalla legge.
- Outer Protection Zone: zona di protezione esterna definita mediante criterio temporale e si basa sul tempo necessario per la diluizione/attenuazione delle sostanze degradanti entro un livello accettabile. Nel caso di contaminanti persistenti, spesso viene anche utilizzato come intervallo temporale, quello necessario per identificare e attuare idonei interventi di riduzione degli stessi.
- Total Capture Area: è l'area più ampia ed esterna che ricopre l'intera area di cattura di un punto di estrazione, sia esso naturale (sorgente) che artificiale (pozzo di emungimento). Viene definita in modo tale da evitare il degrado della qualità delle acque, facendo riferimento al lungo termine.

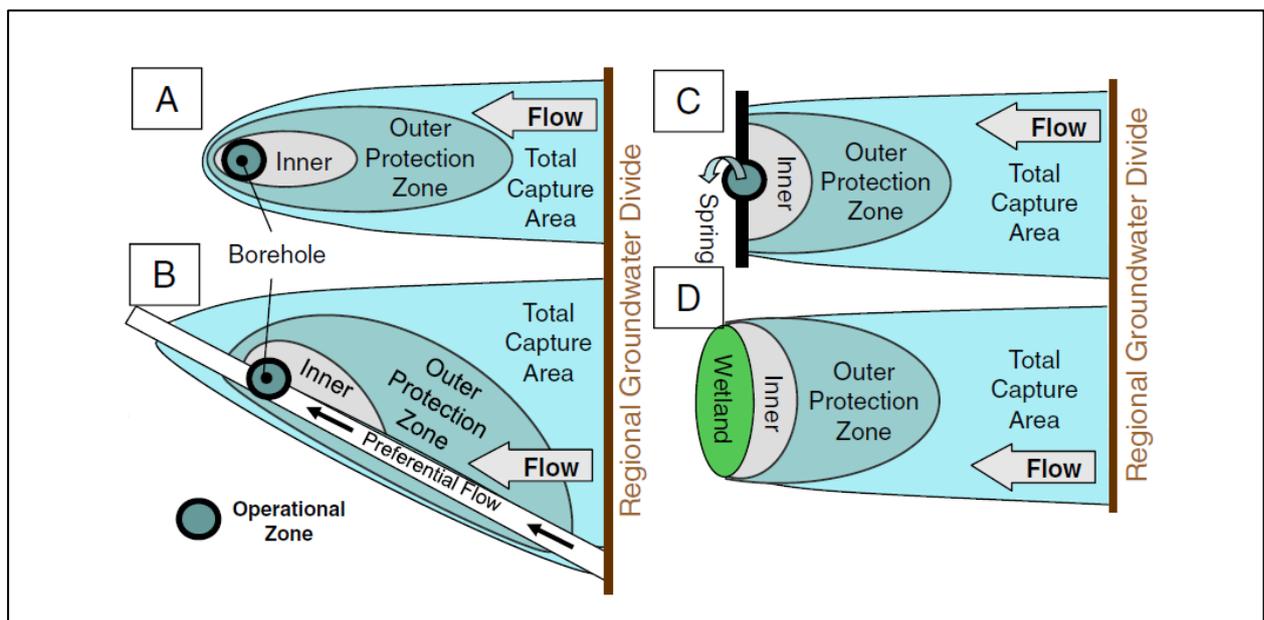


Figura 25: Differenti configurazioni di aree di protezione delineate in funzione della tipologia di captazione: (a) foro in campo di flusso uniforme; (b) pozzo trivellato vicino a un percorso di flusso preferenziale; (c) sorgente; (d) zone umide o altri ecosistemi (da Nel J. et al, 2009)

Mentre i vincoli imposti dalla normativa diventano sempre più restrittivi mano a mano che ci si avvicina al pozzo/sorgente, in Sudafrica, l'estensione di queste zone, a differenza di quanto accade in molti Stati, è molto variabile e dipende dalle caratteristiche di vulnerabilità e dal potenziale grado di inquinamento. In aree molto sensibili, come ad esempio la Lusaka Forest Reserve, l'area di protezione attorno al punto di captazione ha un raggio di 1000 m. In zone meno sensibili il raggio utilizzato per la definizione di queste aree ha estensioni molto più ridotte.

Una volta definite le aree di ricarica si procede con la realizzazione di un database contenente tutte le informazioni relative alle singole captazioni: ad esempio l'estensione delle varie aree, le potenziali fonti di inquinamento e i vincoli imposti. Per una corretta gestione delle risorse è utile l'aggiornamento costante del database.

L'ultimo passaggio prevede la realizzazione di un adeguato sistema di monitoraggio della qualità delle acque, affiancato da un idoneo programma di monitoraggio. Quest'ultimo prevede un monitoraggio della composizione chimica, dei sistemi superficiali e del bilancio idrico.

La normativa sulle acque vigente in Sudafrica si basa sui principi introdotti in Europa dalla WFD. Fortemente accentuato è quindi il concetto de "chi inquina paga" introdotto precedentemente.

3.3 Giordania

La Giordania è da sempre caratterizzata da una scarsità della risorsa idrica, con conseguenti limitazioni allo sviluppo economico e agricolo. In particolare, il forte incremento dell'industrializzazione e il sensibile aumento della popolazione registratosi in questi ultimi anni, hanno portato a un eccessivo sfruttamento della risorsa idrica sotterranea che, unito a un basso grado di ricarica degli acquiferi (Figura 26), porta al quasi totale esaurimento della stessa e al verificarsi di fenomeni di salinizzazione.

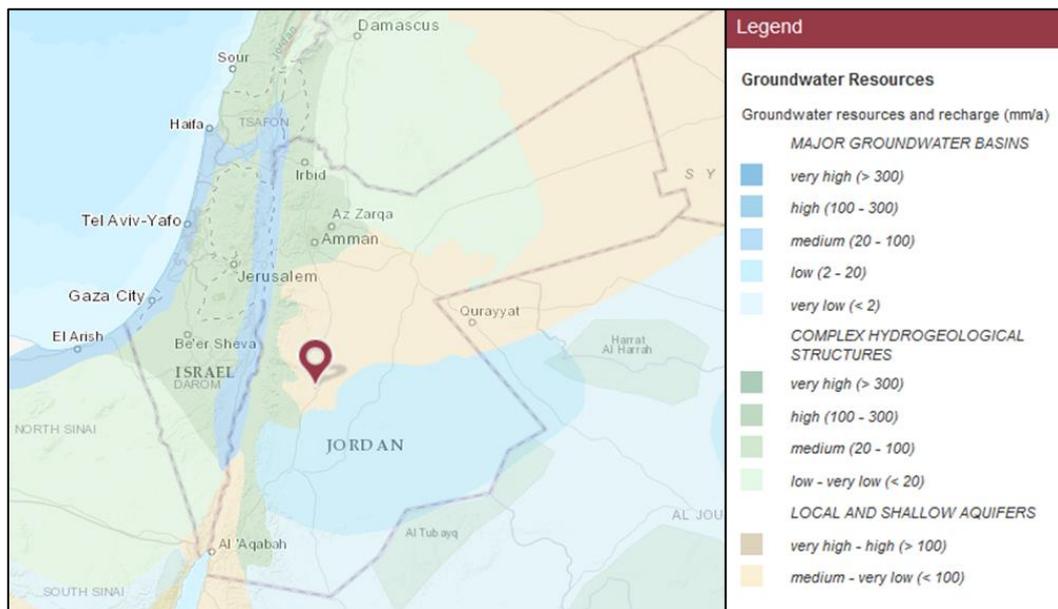


Figura 26: Risorse idriche sotterranee e grado di ricarica della Giordania (da WHYMAP Viewer)

Accanto al problema del sovra sfruttamento delle risorse sotterranee, esiste il problema legato al diretto scambio di acqua tra acque profonde e acque superficiali. In questi ultimi anni si è dunque cercato di adottare leggi e regolamenti in grado di proteggere la qualità di entrambe le tipologie di acqua, affidando la loro gestione al Ministero dell'acqua e dell'irrigazione, costituito al suo interno da due autorità distinte: Water Authority of Jordan (WAJ) e Jordan Valley Authority (JVA). Ad esso è infatti affidato il compito di delineare le aree di protezione, redigere le mappe di vulnerabilità e definire i piani di monitoraggio delle acque.

A partire dal 2002 sono stati emanati dei regolamenti attui a mitigare il problema del declino del livello delle acque sotterranee. In particolare si cita l'introduzione di pesanti sanzioni per lo scarico di sostanze pericolose direttamente in ambiente e la realizzazione di sistemi di monitoraggio in grado di mantenere sotto controllo la qualità e la quantità di acqua presente nel sottosuolo. Un altro aspetto importante introdotto per preservare il livello di falda è il cercare di sostituire il più possibile l'acqua estratta dal sottosuolo con l'acqua derivante dalle

attività agricole. Si introducono regole per la realizzazione di pozzi estrattivi: in particolare si impone una distanza minima tra i pozzi di 1000 metri e la necessità di apposite autorizzazioni da parte delle autorità competenti per poter eseguire attività estrattive dagli stessi.

Sul lato pratico si sono poi introdotte delle linee guida per la protezione delle acque sotterranee, realizzate in collaborazione con l'Istituto Federale di geoscienze e delle risorse naturali della Germania (BGE - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Tali linee guida prevedono la realizzazione di mappe di vulnerabilità mediante l'utilizzo di metodi parametrici. Tra quelli precedentemente citati, il più utilizzato è il metodo DRASTICS con il quale è possibile realizzare mappe di vulnerabilità servendosi del software GIS.

Per quanto riguarda la protezione delle aree di ricarica, si è mirato alla realizzazione di 3 zone attorno ai pozzi, ciascuna delle quali presenta delle restrizioni per quanto riguarda la destinazione d'uso dei terreni.

- Zona I: viene definita con un criterio puramente geometrico. Nel caso di sorgente si impone una estensione di 50 m a monte, 15 m lateralmente e 10 m a valle; nel caso di pozzo invece l'estensione risulta differente imponendo una geometria a monte di 25 m e di 15 m sia a valle che lateralmente. Questa zona viene recintata e l'accesso interdetto al solo personale incaricato della manutenzione e della gestione delle risorse.
- Zona II: viene definita secondo due differenti criteri: geometrico o temporale. Nel primo caso si impone una estensione di massimo 2 km a monte e tra i 50 e i 150 m in direzione di valle. Il criterio temporale si basa sulla definizione di isocrone con intervallo temporale di 50 giorni. In questa zona sono consentite attività agricole e residenziali, a patto che si rispettino dei vincoli imposti dal legislatore.
- Zona III: rientra tutta l'area che contribuisce alla ricarica. Le linee guida citate precedentemente non impongono particolari limitazioni per quanto riguarda l'utilizzo del suolo, a patto però che vengano rispettate le regole definite per la buona gestione.

CAPITOLO 4

Il problema della Valledora

La Valledora è una porzione di territorio piemontese in cui vi è un forte contributo alla ricarica degli acquiferi profondi che si sviluppano sotto di essa. Proprio per questa sua caratteristica, in questi ultimi anni è divenuta sempre più crescente la necessità di introdurre dei regolamenti sempre più rigidi nell'ambito dello smaltimento dei rifiuti e dell'estrazione mineraria. Queste due attività, infatti, sono quelle che maggiormente vengono svolte all'interno della Valledora e sono direttamente connesse tra loro. Al termine dell'attività estrattiva legata all'esaurimento della risorsa all'interno della cava, gli ampi vuoti lasciati vengono convertiti in discariche a cielo aperto.

Di particolare interesse è la stratigrafia del sottosuolo: l'elevato spessore dei depositi, che può superare i 50 metri, e l'elevata soggiacenza della falda, fanno della Valledora il principale polo di estrazione di sabbia e ghiaia del Piemonte. A questa abbondanza di materiale è associata una forte richiesta di materiale anche dalle province limitrofe, dove i giacimenti risultano non idonei a sopperire alle necessità. Le acque reflue provenienti dalle varie fasi estrattive e lavorative, vengono spesso rilasciate in ambiente senza idonei processi di trattamento finalizzati a un miglioramento della qualità. Queste acque, penetrando nell'acquifero sottostante, vanno a contaminare le acque che vengono utilizzate per soddisfare le necessità idriche dei vari comuni.

Come in precedenza accennato, al termine dell'attività estrattiva si ha una forte tendenza alla conversione delle cave esaurite in discariche. La problematica legata a questa attività, oltre al deturpamento del paesaggio, è legata al rischio di contaminazione a seguito della fuoriuscita di liquami. A protezione di ciò, il fondo della discarica viene reso impermeabile nelle due direzioni mediante la realizzazione di differenti strati con appositi materiali. La realizzazione di appositi sistemi di captazione consente inoltre l'allontanamento dei liquami. Tuttavia, nel tempo, è possibile che questi sistemi di protezione, a causa dell'usura e/o di altri fattori, non siano più in grado di svolgere la loro funzione con conseguente fuoriuscita di liquame. Un altro aspetto importante che va considerato durante la progettazione è proprio il livello della falda. È necessario, infatti, che il sottofondo impermeabile si estenda sopra il livello idrico (considerando le eventuali oscillazioni nei vari periodi dell'anno) per evitare che quest'ultima confluisca all'interno della discarica comportando una diluizione e la fuoriuscita di liquami.

Con riferimento a queste problematiche fortemente impattanti sull'area, nel 2016 la Regione ha emanato il D.D. n. 268 del 21 luglio 2016, all'interno del quale vengono riportate apposite misure per la protezione della Valledora (si faccia riferimento in proposito alla Parte II dello stesso decreto). Tali misure riguardano nello specifico la pianificazione territoriale e l'attività estrattiva.

All'interno dello stesso decreto, sono riportate le aree di ricarica e di salvaguardi precedentemente definite. Queste tuttavia sono estremamente poco dettagliate in relazione alla loro importanza, specialmente nella Valledora. Questo ha portato alla necessità di eseguire uno studio di maggior dettaglio per rendere più dettagliate queste aree, per garantire quindi un

maggior grado di protezione. Nasce così il “Progetto Valledora”, una collaborazione tra il Politecnico di Torino e alcuni comuni presenti nell'area, con la finalità di trovare una soluzione utile a ridurre le matrici inquinanti e preservare la qualità delle acque, utilizzate prevalentemente a scopi potabili. Al momento i comuni aderenti sono:

- Arborio (VC)
- Alice Castello (VC)
- Borgo d’Ale (VC)
- Buronzo (VC)
- Carisio (VC)
- Carpignano Sesia (NO)
- Casanova Elvo (VC)
- Collobiano (VC)
- Ghislarengo (VC)
- Livorno Ferraris (VC)
- Mazzè (TO)
- Moncrivello (VC)
- Salasco (VC)
- Tronzano Vercellese (VC)

Nella Figura 27 viene riportato un inquadramento generale e di dettaglio dei vari comuni e delle aree di ricarica precedentemente definite.

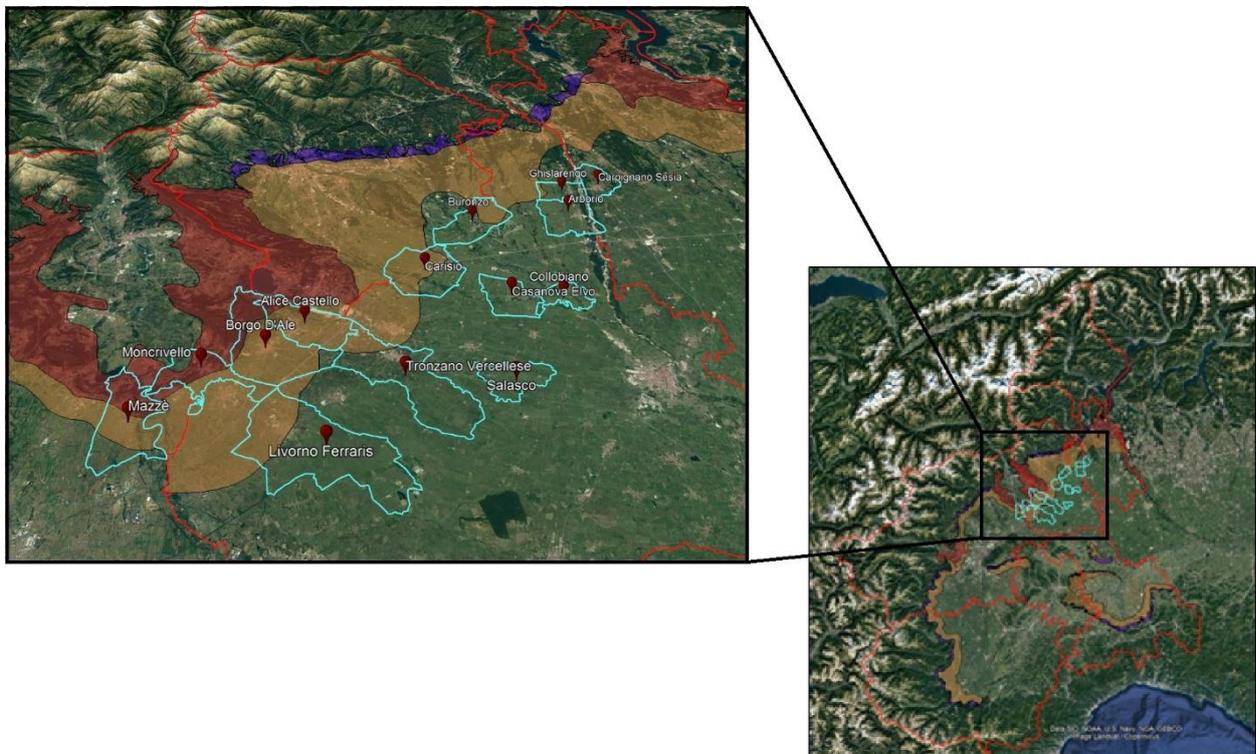


Figura 27: Inquadramento dei comuni aderenti. Graficamente sono visibili i confini amministrativi comunali (azzurro), i confini amministrativi regionali (rosso), le aree di ricarica (riempimento giallo), le potenziali aree di ricarica (riempimento in rosso) e le fasce tampone delle aree di ricarica (riempimento in viola). La mappa è stata ottenuta implementando i dati GIS su Google Earth

L'intero progetto, oltre allo studio preliminare affrontato in questo elaborato, è articolato nei seguenti punti:

- Acquisizione dei dati esistenti
- Studio rapporti fiume-falda
- Campagna piezometrica
- Ricostruzione della struttura idrogeologica
- Caratterizzazione idrogeochimica e qualità
- Censimento CDP e FDP
- Censimento soggetti a rischio
- Applicazione metodi di site analysis: Studio criticità antropiche individuate durante lo studio
- Informatizzazione dati

Come punto di partenza, è necessario reperire tutta una serie di dati, quali la stratigrafia, la piezometria, la soggiacenza, i parametri idrogeologici e tutti quei dati che consentono una prima ricostruzione delle varie caratteristiche dell'area in modo da avere un quadro di partenza più o meno dettagliato.

Sulla base dei dati a disposizione si pianifica una campagna di rilevamento in cui si eseguono una serie di campionamenti e misurazioni (anche in continuo) per migliorare il grado dell'informazione. Da queste informazioni è quindi possibile ricostruire una carta idrogeologica di dettaglio e trarre informazioni, in seguito all'analisi dei campioni prelevati, sulla qualità delle acque e sulla loro composizione chimica.

Non trascurabile è anche la necessità di eseguire un censimento dei centri di pericolo, delle informazioni sull'uso del suolo e dei soggetti potenzialmente a rischio. Questi censimenti vengono affidati ai vari comuni che fanno riferimento al documento riportato nell'ALLEGATO 1.

Si procede quindi con l'informatizzazione in formato GIS dei dati al fine di rendere i dati facilmente confrontabili e modificabili all'eventualità.

4.1 Studio preliminare

Per i motivi sopra descritti, la definizione delle aree di ricarica con un maggior grado di dettaglio rispetto a quello delle mappe contenute nel D.D. n. 268 del 21 luglio 2016 (si faccia riferimento alla Figura 8 del Capitolo 1), è di primaria importanza per salvaguardare la qualità degli acquiferi presenti nella zona.

Grazie ai nuovi sistemi informatici, è possibile eseguire uno studio mediante la combinazione di tecniche di Remote Sensing (telerilevamento) e GIS. Nel caso specifico di questo studio si fa uso dei programmi specifici come ENVI Classic, Geomatica 2017 e ArcMap.

La ricerca delle potenziali aree di ricarica si basa sulla creazione di mappe tematiche che hanno come punto di partenza i DTM (Digital Terrain Model)³⁰ con passo 10 metri della Regione

³⁰ È un file che contiene la rappresentazione digitale del terreno, con particolare riferimento alla distribuzione delle quote. Questa tipologia di rappresentazione può essere facilmente implementata su un software GIS al fine di

Piemonte e della Regione Valle d'Aosta e le immagini satellitari dell'area. Nello specifico, è necessario realizzare le seguenti mappe:

- Pendenza (Slope)
- Tipo di suolo (Soil)
- Geomorfologia (Geomorphology)
- Uso del suolo/Copertura del suolo (Land use/Land cover)
- Densità di drenaggio (Drainage density)
- Densità dei lineamenti (Lineament density)

Ciascuna di queste mappe è caratterizzata da una suddivisione dei valori in classi, cui è attribuito un punteggio in base all'influenza sulla ricarica. Si esegue infine un overlay analysis in cui a ciascuna mappa di input viene attribuito un peso in base al tipo di tematica riportante. Il risultato finale è una mappa su cui sono evidenziate le possibili aree di ricarica, suddivisa anch'essa in classi.

L'aspetto importantissimo cui bisogna prestare sempre attenzione è il sistema di riferimento. Nel caso in esame, tutti i file e le immagini utilizzate sono georeferenziate nel sistema di riferimento WGS_1984_UTM_zone_32N.

Individuazione dell'immagine idonea

Il primo passo consiste nel reperire immagini satellitare contenenti tutti i comuni aderenti al progetto, la porzione di territorio che si estende fino al versante italiano delle Alpi e una ridotta porzione di terreno che si estende verso valle.

Le immagini sono state prese dal sito dell'United States Geological Survey (USGS), agenzia governativa degli Stati Uniti che si occupa di ricerca in campo scientifico. La ricerca è stata fatta su un arco temporale di circa 2 anni, in modo da poter individuare quella con un grado di nuvolosità il più basso possibile. Sono inoltre stati adottati altri tre criteri per la scelta dell'immagine. Innanzi tutto il periodo dell'anno: poiché la presenza di neve è fonte di disturbo nell'analisi delle immagini (con particolare riferimento alle finalità del progetto), si è scelta l'immagine avente il minor valore di copertura nevosa. Non si sono quindi presi in considerazione i mesi che vanno da Novembre a Marzo. Le nevi perenni, che sono presenti in tutte le immagini di tutto l'anno, non rientrano nell'area di studio. Altro criterio di scrematura si basa sulla qualità dell'immagine che deve avere un valore elevato. Infine, cosa da non trascurare, l'immagine selezionata deve essere fatta durante le ore diurne al fine di rendere la stessa più nitida e più facile da analizzare.

Grazie alla possibilità di usufruire delle immagini raccolte da differenti satelliti, un primo tentativo di analisi è stato fatto utilizzando l'immagine estratta dal database del satellite Landsat 7 (Figura 28): LE07_L1TP_195028_20171014_20171110_01_T1.

L'analisi di questa immagine è stata resa impossibile a causa della presenza di righe nere sulle fasce laterali dell'immagine. Per eliminare completamente le immagini di questo satellite da quelle utilizzabili per le successive analisi, sono state prese in considerazione differenti

creare modelli tridimensionali dell'area. Di una stessa area possono esistere DTM con punti posti a differenti distanze (passi): maggiore è il passo, minore è il grado di dettaglio.

immagini dell'area. Tuttavia la presenza costante di queste righe ha reso inutilizzabile questo satellite. Questo problema persiste anche con l'eventuale sovrapposizionamento di più immagini della zona.

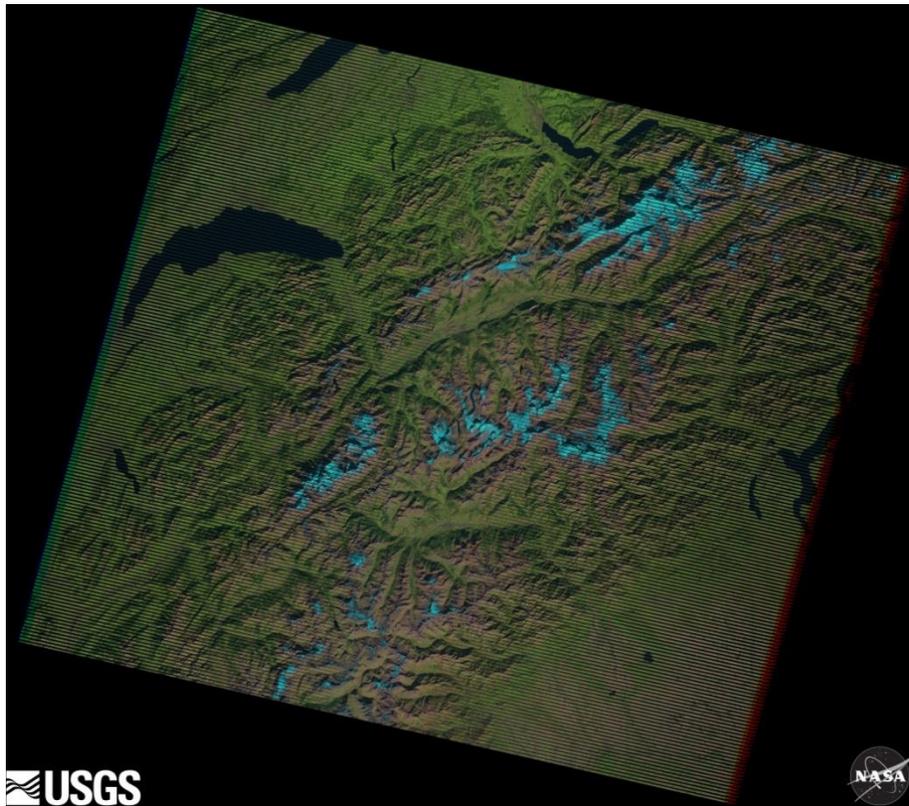


Figura 28: Immagine a colori reali presa dal satellite Landsat 7 (da USGS)

Si è dunque deciso di utilizzare le immagini del satellite Landsat 8, in particolare quella riportata in Figura 29: LC08_L1TP_195028_20161003_20170319_01_T1.

In questo caso, seppur l'immagine non presenti danneggiamenti come la precedente, la risoluzione risulta essere molto bassa: ciascun pixel corrisponde a 30 m (come si vedrà nel seguito, la risoluzione dell'immagine è legata alla qualità della banda con risoluzione peggiore). Questo comporta una difficoltà nella creazione di ROI (Region of Interest)³¹ adeguate per una precisa classificazione dell'intero territorio in esame. Ad esempio, se si prende in considerazione la mappa contenenti le informazioni sull'uso suolo, è possibile notare, confrontandola con quella a falsi colori, che spesso molte aree vengono classificate in maniera errata andando così a generare una mappa non adatta allo scopo (Figura 30). Altro errore di classificazione si ha con l'acqua dei fiumi. Essendo la larghezza di questi contenuti all'interno di un unico pixel, la creazione di un'apposita ROI e la classificazione mediante Maximum Likelihood Classification, non è sufficiente a definirne con precisione la distribuzione nello spazio.

³¹ Le ROI costituiscono un campione rappresentativo della popolazione dalla quale sono estratte. Maggiore è il numero di celle che rientrano all'interno di una singola regione, maggiore è la significatività del campione. Per questo motivo, maggiore è l'estensione di ciascuna cella (pixel), minore è il grado di dettaglio che ciascuna cella contiene e quindi minore è la sua rappresentatività.

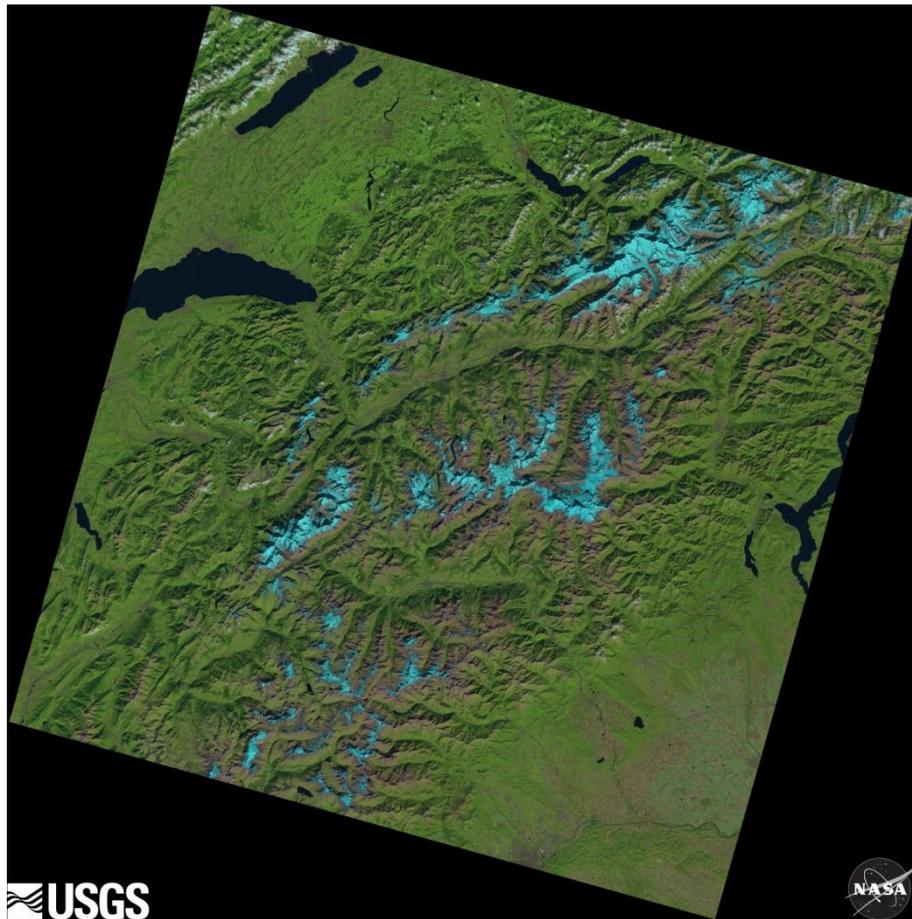


Figura 29: Immagine a colori reali presa dal satellite Landsat 8 (da USGS)

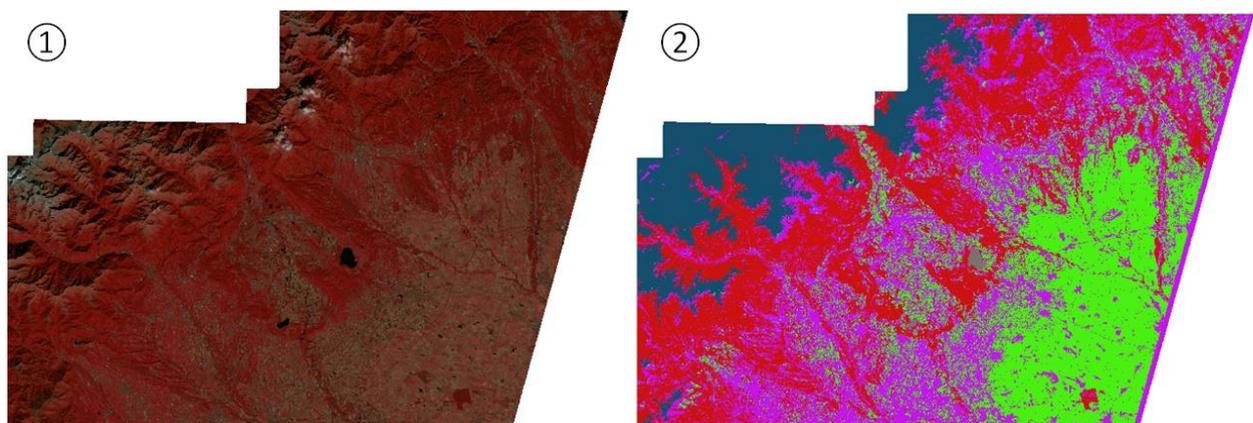


Figura 30: Confronto tra immagine a falsi colori ① e la mappa di uso suolo ②

Per cercare di migliorare la qualità trasmessa dalle varie mappe che hanno come punto di riferimento l'immagine satellitare, si sono prese in considerazione quelle provenienti da un'altra famiglia di satelliti: Sentinel. In particolare si considera il satellite Sentinel 2 e, adottando gli stessi criteri di selezione precedentemente illustrati, si procede con l'individuazione dell'immagine più adatta (Figura 31):

- S2A_MSIL1C_20171014T102021_N0205_R065_T32TMR_20171014T102235
- S2A_MSIL1C_20171014T102021_N0205_R065_T32TLR_20171014T102235

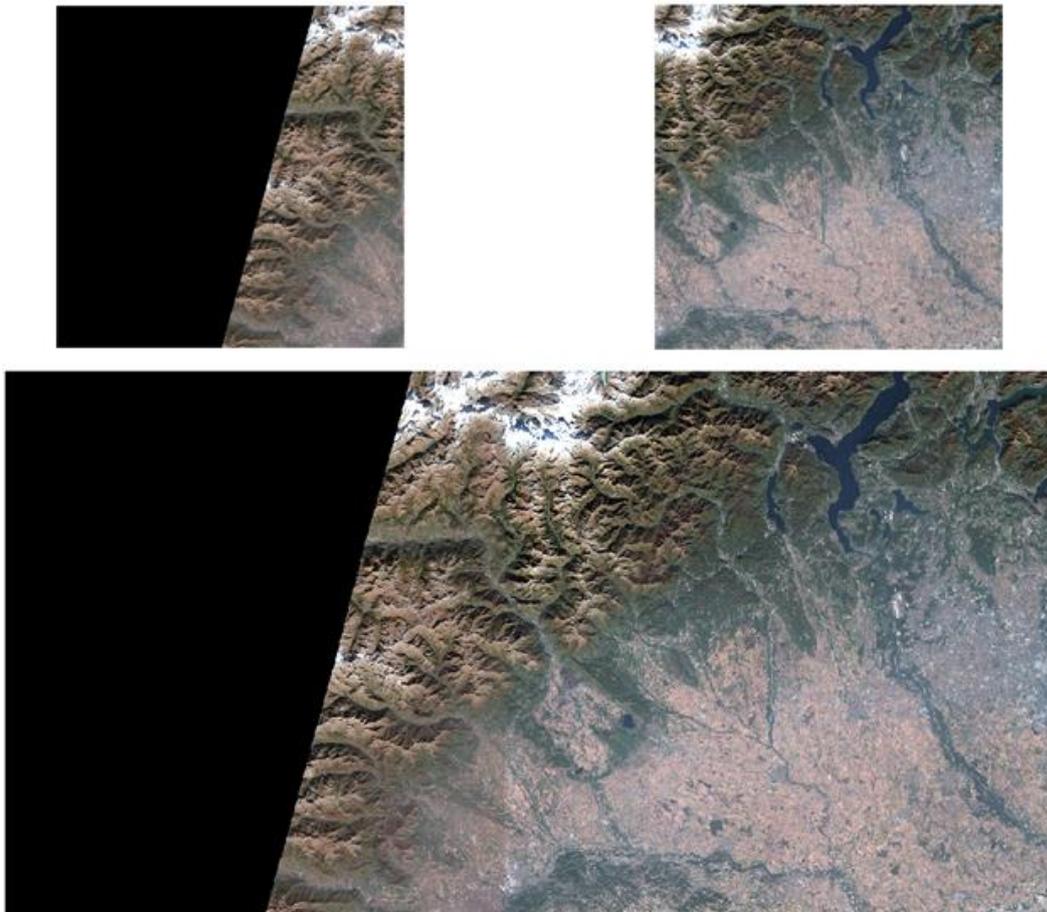


Figura 31: Immagine a colori reali presa dal satellite Sentinel 2: nella parte superiore sono riportate le due immagini prese singolarmente, nella parte inferiore si riporta l'immagine in seguito alla creazione di un "mosaic" che ha portato all'unione delle due (da USGS)

A differenza di quanto fatto per i precedenti satelliti, in questo caso si ha la necessità di utilizzare due immagini separate e unirle. Questo è dovuto al fatto che, utilizzando solo la prima immagine indicata, l'estensione lungo la catena alpina, non è sufficiente a coprire l'intera area d'interesse. È fondamentale, al fine di garantire continuità nelle condizioni climatiche e nelle caratteristiche di acquisizione, utilizzare immagini raccolte nello stesso giorno.

Da una prima analisi delle proprietà dell'immagine, si può assumere che questa sia di qualità idonea per la creazione delle mappe utili per la definizione delle possibili aree di ricarica presenti nella zona d'interesse.

Preparazione dell'immagine

Indipendentemente dal satellite, le immagini sono rese disponibili dall'agenzia scomposte nelle singole bande. Prima di procedere alla creazione di una singola immagine contenente tutte le bande d'interesse, è bene analizzare singolarmente ogni banda. In questo modo è possibile notare che le bande presentano una risoluzione dei pixel differente e la qualità dell'immagine finale è determinata dal pixel con più bassa risoluzione. Per creare le mappe necessarie per la risoluzione del progetto, è necessario utilizzare (e quindi creare) delle immagini in falsi colori. Il satellite Sentinel 2 per creare un'immagine RGB in falsi colori (Figura 32) richiede l'utilizzo della banda 5 nel rosso (R), la banda 4 nel verde (G) e la banda 3 nel blu (B). La creazione di una immagine a colori reali invece richiede l'utilizzo della banda 4 nel rosso (R), la banda 3 nel verde (G) e la banda 2 nel blu (B). Unendo tra loro queste bande, si ottiene un'immagine con risoluzione di 20 metri. Le altre bande disponibili presentano risoluzione che raggiunge anche i 50 metri, causando un peggioramento della qualità dell'immagine. Poiché queste sono inutili al fine di creare un'immagine significativa per lo scopo, è possibile trascurarle garantendo così la buona qualità dell'immagine.

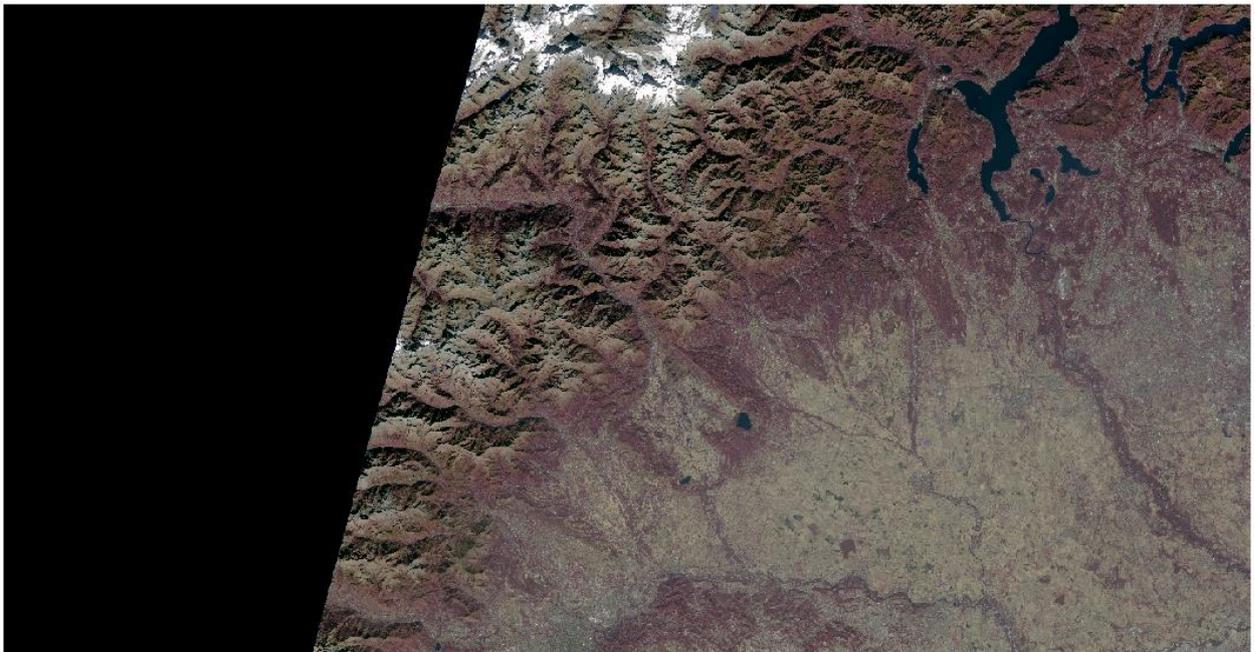


Figura 32: Falsi colori dell'immagine presa dal satellite Sentinel 2 (da USGS)

Creazione del DTM

In base alle caratteristiche dell'immagine, si procede con l'estrazione del DTM d'interesse: l'estensione iniziale dell'area considerata comprende anche parte della regione Valle d'Aosta (Figura 33). Tuttavia la mancanza d'informazioni sulle quote in corrispondenza dei confini regionali, causa la presenza di una linea bianca che comporta un errore nella realizzazione delle mappe successive. Questa mancanza non è stata possibile eliminarla neanche mediante il comando "fill" che consente il riempimento dei vuoti qualora ci sia una mancanza d'informazione.

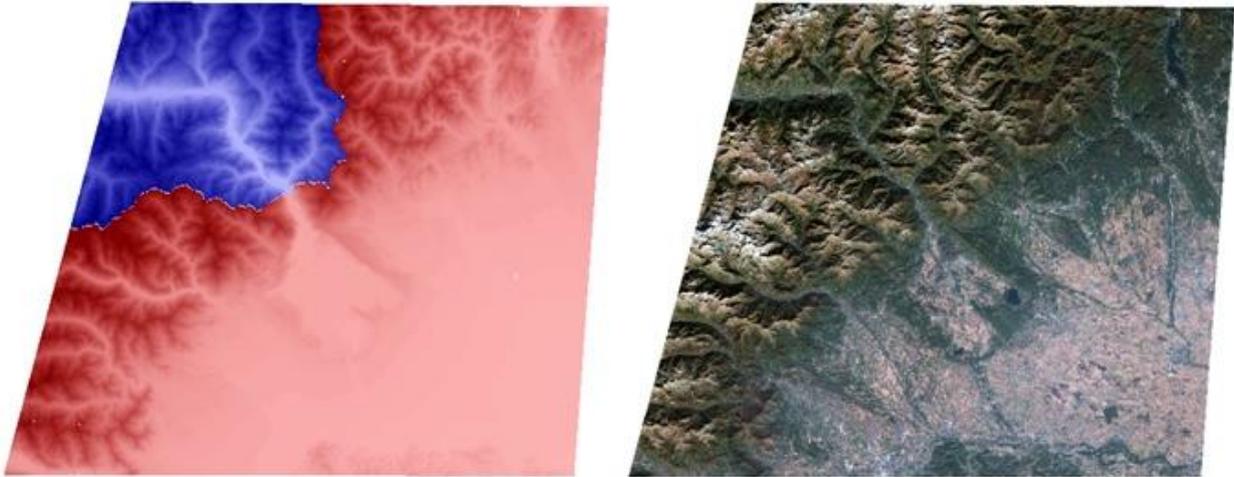


Figura 33: A sinistra il DTM dell'area d'interesse ottenuto considerando le due regioni adiacenti (in blu è indicata la Valle d'Aosta e in rosso il Piemonte), a destra la rispettiva immagine satellitare dell'area

Si opta quindi per l'utilizzo del DTM della sola Regione Piemonte. Essendoci la possibilità di una imprecisione nei dati sul confine, si decide di non far corrispondere i confini dell'area di studio con i confini regionali. Si cerca comunque di approssimare al meglio l'andamento naturale del terreno (Figura 34).

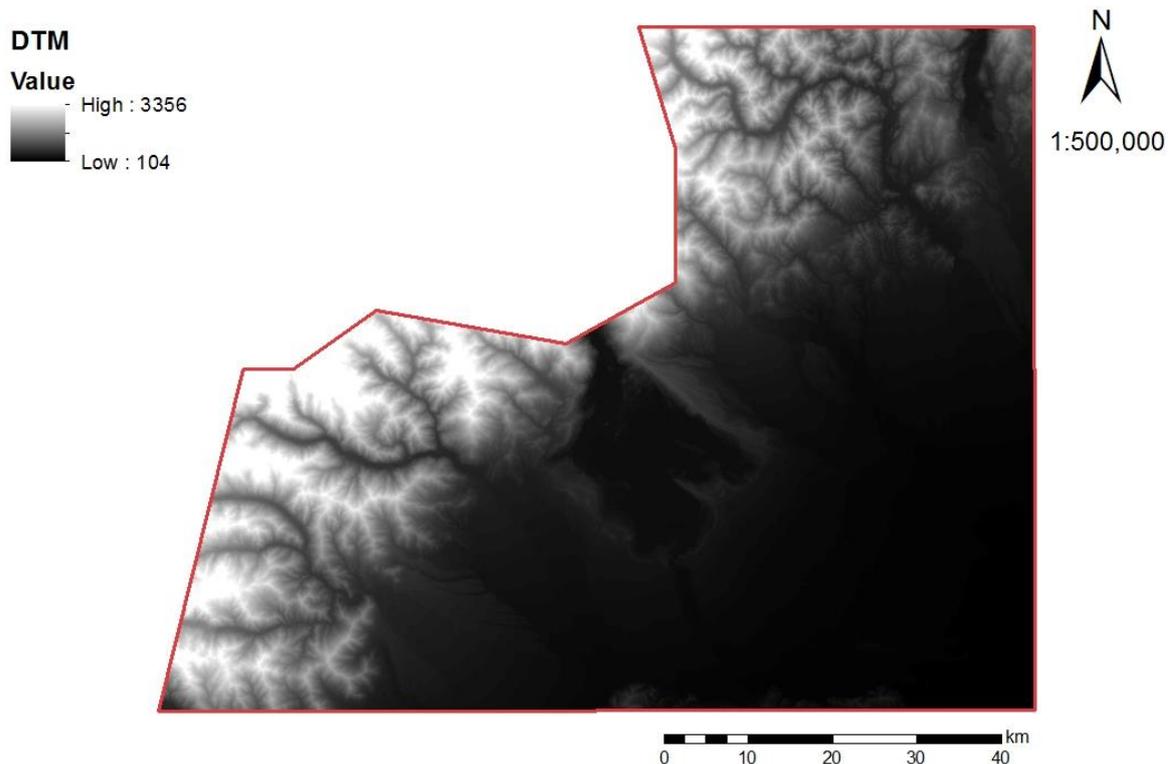


Figura 34: DTM dell'area d'interesse utilizzabile per la realizzazione delle mappe successive

Utilizzando quindi il DTM dell'area d'interesse come maschera, si ritaglia l'immagine satellitare come mostrato in Figura 35.

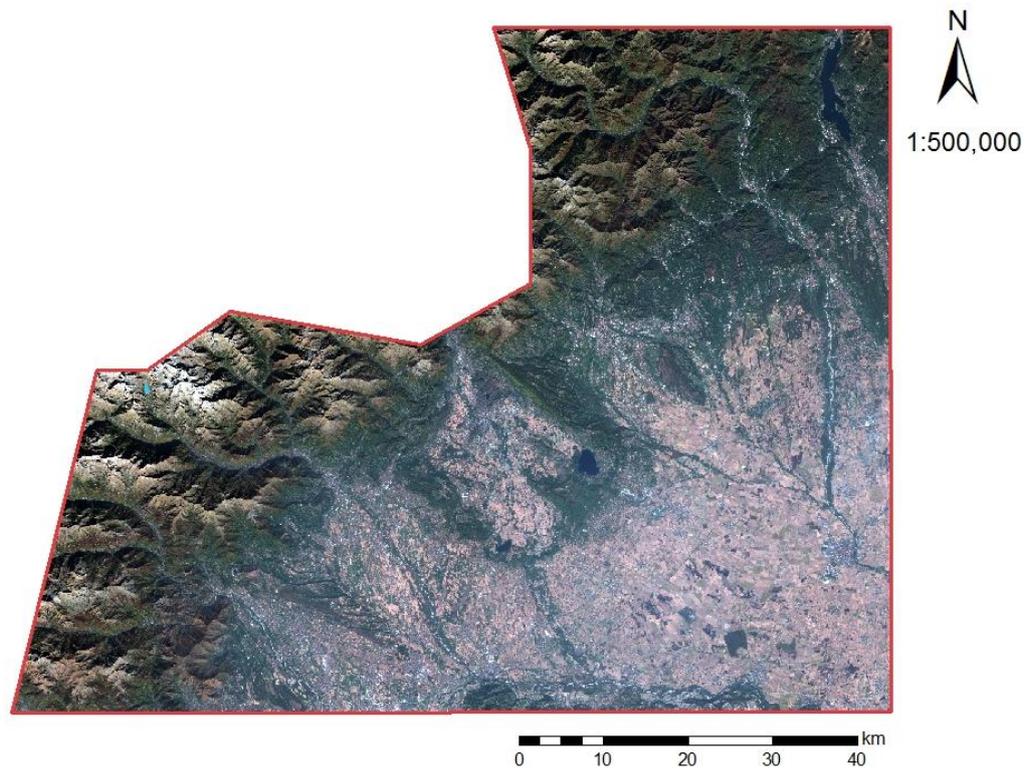


Figura 35: Immagine satellitare dell'area d'interesse

Pendenza (Slope)

Il file DTM viene implementato su ArcMap per poter realizzare la carta tematica della pendenza (Figura 36).

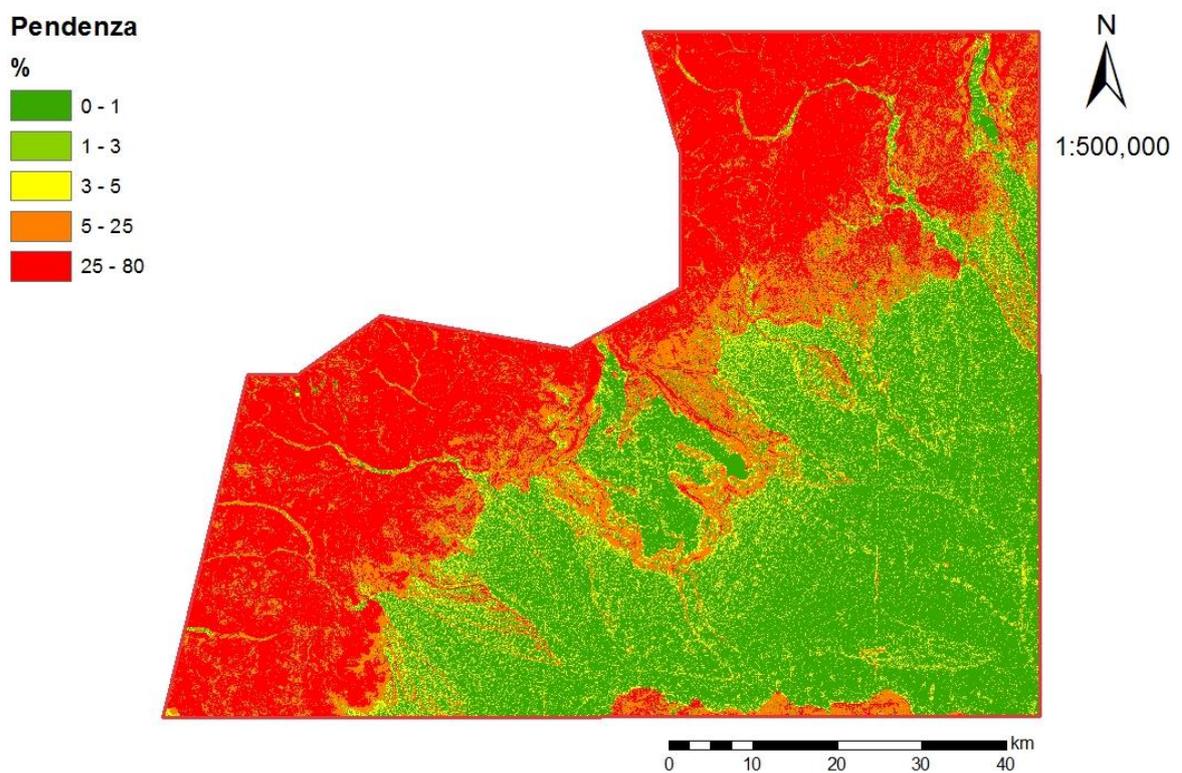


Figura 36: Mappa tematica della pendenza

Si decide di dividere l'intera mappa in 5 classi, a ciascuna delle quali viene attribuito un punteggio in base al contributo che apporta alla potenziale ricarica. Il punteggio utilizzato va da 1 a 3, dove 1 corrisponde a un contributo definito come buono, 2 corrisponde a un contributo moderato e 3 corrisponde a un contributo molto scarso. Questo punteggio è lo stesso che sarà alla base della catalogazione delle informazioni contenute nelle altre mappe. Le informazioni contenute nella mappa sopra riportata sono descritte nella Tabella 7:

Tabella 7: Classificazione della pendenza

Numero classe	Pendenza (%)	Descrizione	Punteggio	Contributo
1	0 - 1	Scarsa pendenza	1	Buono
2	1 - 3	Lieve pendenza	1	Buono
3	3 - 5	Moderata pendenza	2	Moderato
4	5 - 25	Forte pendenza	3	Scarso
5	25 - 80	Ripida pendenza	3	Scarso

Come si può notare dalla tabella precedente, la classe 5 ha come limite superiore una pendenza dell'80%. Questo perché nell'area indagata non si hanno valori di pendenza superiori.

Analizzando la mappa, è possibile notare come la zona di maggior influenza sulla ricarica, è situata proprio in corrispondenza delle pianure e delle aree collinari. La parte montuosa invece è caratterizzata da uno scarso contributo. Questo è dovuto soprattutto al fatto che, in presenza di forti pendenze (trascurando momentaneamente la tipologia di copertura e la tipologia di materiale), l'acqua tende a scorrere superficialmente e a non penetrare negli strati profondi.

La Figura 37 riporta la mappa precedentemente descritta mettendo in evidenza i punteggi.

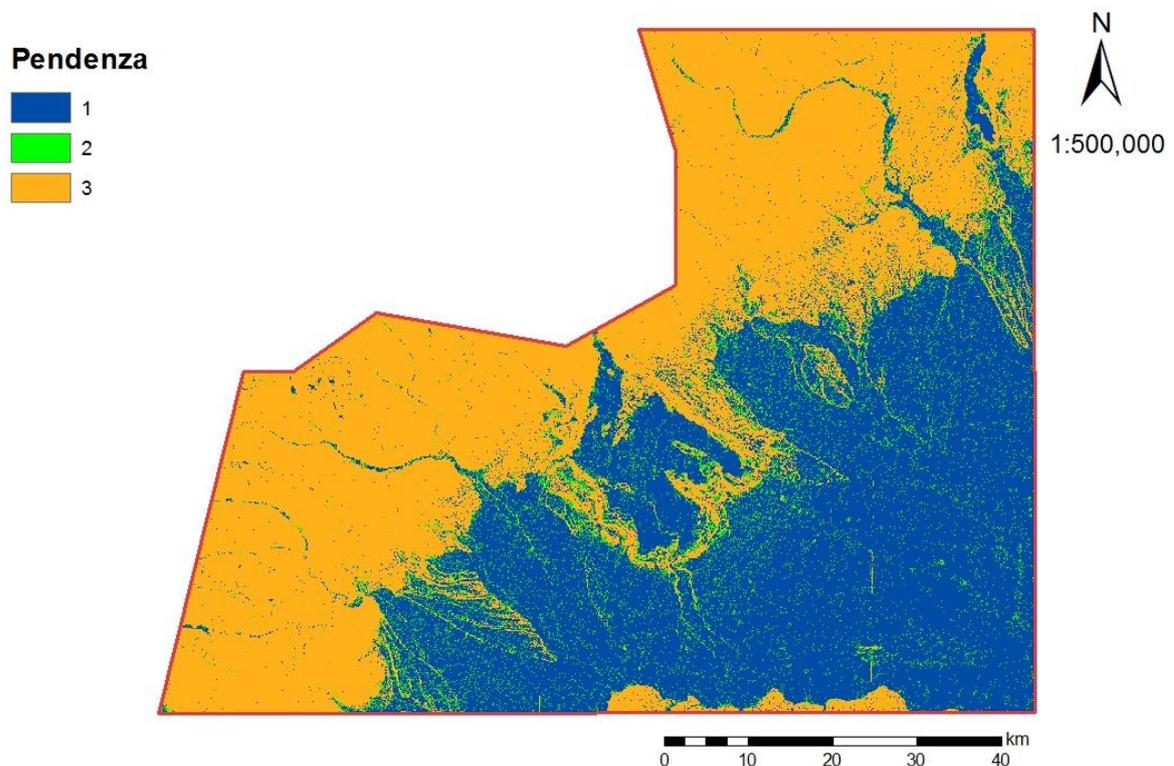


Figura 37: Mappa tematica della pendenza con i punteggi

Tipo di suolo (Soil)

Per la realizzazione di questa mappa si usa come punto di partenza le carte geologiche relative alle due regioni. Dopo aver individuato i complessi geologici che si sviluppano nell'area d'interesse (Figura 38), si procede con una loro classificazione in funzione della permeabilità, ricordando che maggiore è il grado di permeabilità, maggiore è il contributo alla ricarica dell'acquifero.

Complessi idrogeologici

- Complesso dei Depositi Indifferenziati del Pliocene
- Complesso dei Depositi Villafranchiani
- Complesso dei Depositi alluvionali olocenici
- Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Mindel
- Serie dei sedimenti Prepliocenici del Bacino Terziario Piemontese
- Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Riss
- Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Wurm
- Complesso dei Depositi glaciali pleistocenici
- Complesso delle Argille di Lugagnano
- Complesso delle Rocce Calcaree
- Complesso delle Sabbie di Asti
- Serie dei Complessi Cristallini del Rilievo Alpino

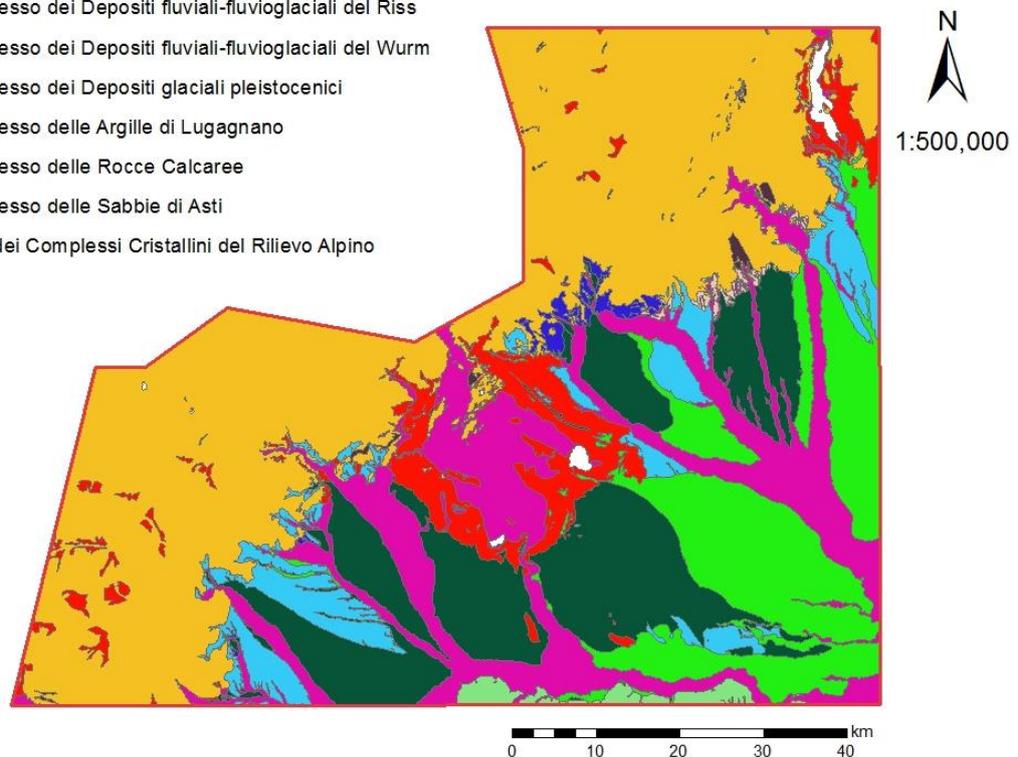


Figura 38: Mappa dei complessi idrogeologici

Dal punto di vista geologico, il territorio piemontese è caratterizzato da diversi complessi. In particolare, nell'area di nostro interesse si trovano:

Complesso dei Depositi Indifferenziati del Pliocene: Questi depositi sono costituiti da sabbie di diverse granulometrie. Nonostante la permeabilità sia molto eterogenea, per la tipologia di materiale che lo costituisce, si attribuisce al complesso un contributo moderato alla ricarica.

Complesso dei Depositi Villafranchiani: Di questo complesso, nell'area di studio, sono presenti due depositi separati aventi caratteristiche differenti. Quello presente nell'area torinese è costituito da sabbie e argille con presenza di ghiaie. Nella zona degli altopiani biellesi, il materiale formante il deposito è prevalentemente costituito da grana grossa: ghiaia e ciottoli. I due depositi, seppur presentino una riduzione della trasmissività con l'aumentare della profondità, vengono classificati in maniera differente: quello situato nella provincia di Torino ha

uno moderato contributo alla ricarica, mentre quello situato nella provincia di Biella è caratterizzato da uno scarso contributo alla potenziale ricarica.

Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Mindel: Depositi costituiti da materiale ghiaioso-sabbioso. Tuttavia l'elevato spessore di argilla presente in superficie influenza notevolmente la permeabilità. Per questo motivo l'infiltrazione delle acque è molto bassa e il contributo alla ricarica è stato classificato come scarso.

Complesso dei Depositi Alluvionali Olocenici: Sono costituiti prevalentemente da materiale ghiaioso e ghiaioso-sabbioso, con lenti argilloso-sabbiose sparse. Questi depositi si trovano prevalentemente lungo i fianchi dei principali corsi d'acqua. Nell'insieme delle loro caratteristiche, è possibile attribuire un elevato grado di permeabilità all'intero complesso. Questa sua proprietà, può risultare tuttavia svantaggiosa dal punto di vista della propagazione di eventuali inquinanti: l'elevata permeabilità unita alla presenza di una falda a superficie libera, rendono queste porzioni di territorio estremamente vulnerabili alle sostanze inquinanti.

Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Riss: Sono depositi ghiaioso-sabbiosi che in alcuni punti presentano un forte grado di cementazione. Tuttavia l'estensione di queste aree cementate è molto ridotta e poco influente sulla permeabilità totale dell'area. Il complesso presenta una permeabilità mediamente elevata, rendendolo sede di acquiferi a superficie libera.

Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Wurn: In linea generale, questi depositi sono costituiti da ghiaia e sabbia. Nell'area di studio, tuttavia, si ha una prevalenza di componente sabbiosa, e in alcuni punti limosa, che ne influenza la permeabilità. Per queste caratteristiche, viene attribuito a questo complesso un contributo medio alla ricarica.

Complesso dei Depositi glaciali pleistocenici: È formato da materiali mediamente grossolani con forte presenza di materiali a grana fine. Questi ultimi rendono il complesso scarsamente permeabile o, in alcune aree, impermeabile.

Complesso delle Argille di Lugagnano: Si tratta di argille intercalate nella parte superiore con sabbie. Per questa sua composizione, il complesso risulta scarsamente permeabile.

Complesso delle Rocce Calcaree: Il complesso è formato da rocce fortemente tettonizzate. Questo rende il complesso altamente permeabile.

Complesso delle Sabbie di Asti: È formato da strati di sabbie con diverse granulometrie. Nella parte sommitale ci sono stratificazioni contenenti ghiaie. Nel suo insieme, la permeabilità del complesso ha un range di variabilità tra discreta e buona.

Serie dei Complessi Cristallini del Rilievo Alpino: Sono rocce cristalline, magmatiche e metamorfiche che rendono i complessi sostanzialmente impermeabili.

Serie dei sedimenti Prepliocenici del Bacino Terziario Piemontese: Sono per lo più formati da rocce sedimentarie che li rendono scarsamente permeabili. Qualora ci siano delle fratturazioni, localmente la permeabilità aumenta. A quest'aumento tuttavia non è attribuito un miglioramento della classe di contributo.

Nella Tabella 8 e nella Figura 39 sono riassunti schematicamente i vari complessi con i relativi punteggi:

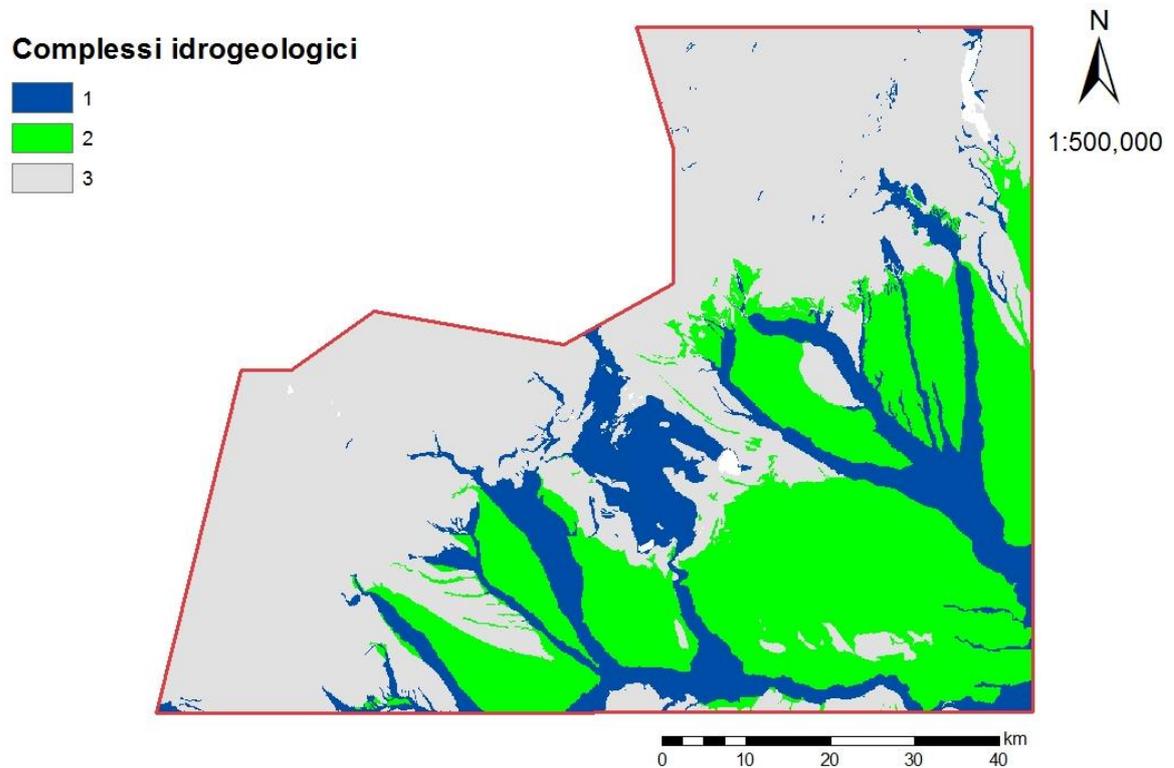


Figura 39: Mappa geomorfologica con i punteggi

Tabella 8: Classificazione del suolo dal punto di vista geologico

Numero classe	Complesso	Materiale	Permeabilità	Punteggio	Contributo
1	Complesso dei Depositi Villafranchiani	Sabbie e argille con ghiaie	Riduzione della trasmissività verso il basso	3	Scarso
		Ghiaie		2	Moderato
2	Complesso dei Depositi Infifferenziati del Pliocene	Sabbie	Eterogenea	2	Moderato
3	Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Wurn	Prevalentemente sabbiosi o sabbioso-limosi	Scarsamente permeabile	2	Moderato
4	Complesso delle Argille di Lugagnano	Argille con intercettazione di sabbie verso l'alto	Scarsamente permeabile	2	Moderato
5	Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Mindel	Ghiaioso-sabbiosi con superficie di argilla	Scarsamente permeabile	3	Scarso
6	Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Riss	Ghiaioso-sabbiosi	Mediamente elevata	2	Moderato

7	Serie dei sedimenti Preplioceni del Bacino Terziario Piemontese	Rocce	Scarsamente permeabile	3	Scarso
8	Complesso delle Sabbie di Asti	Sabbie con livelli ghiaiosi	Da discreta a buona	2	Moderato
9	Complesso dei Depositi glaciali pleistocenici	Mediamente grossolani	Scarsa o impermeabile	3	Scarso
10	Complesso dei depositi alluvionali olocenici	Ghiaioso, Ghiaioso-sabbiosi con lenti sabbioso-argillose	Elevata	1	Buono
11	Serie dei Complessi Cristallini del Rilievo Alpino	Rocce	Impermeabile	3	Scarso
12	Complesso delle Rocce Calcareae	Rocce tettonizzate	Elevata	1	Buono

Geomorfologia (Geomorphology)

Per creare la mappa geomorfologica del territorio, si adotta come punto di partenza le informazioni contenute nel DTM. Partendo da questo infatti si procede con la realizzazione delle curve di livello dalle quali sarà poi possibile definire le aree pianeggianti, collinari e montane (Figura 40).

Curve livello
m

- 200 - 300
- 300 - 600
- 600 - 3300

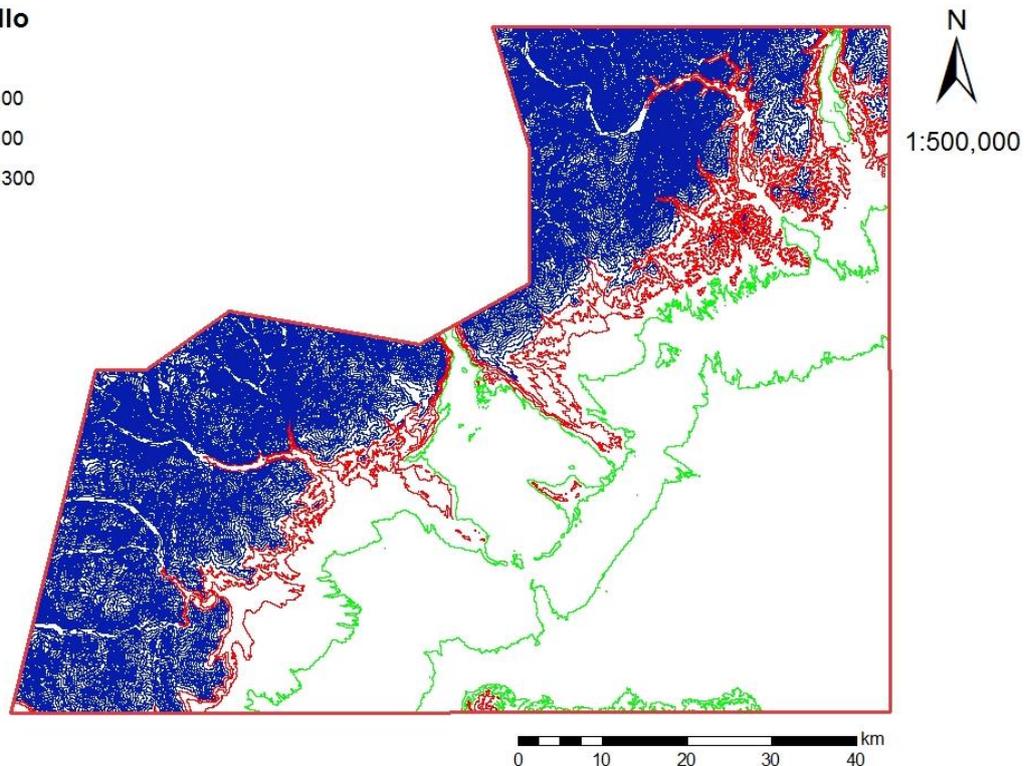


Figura 40: Curve di livello

Per definire la linea di passaggio da una classe a un'altra, si fa riferimento alla suddivisione in zone altimetriche proposta dall'Istituto nazionale di statistica (ISTAT). Tale classificazione definisce:

- Pianura: porzione di territorio caratterizzato dall'assenza di masse rilevate con quota non superiore a 300 m s.l.m.. L'eventuale presenza di aree isolate con quote superiori possono essere classificate come pianura o come collina isolata in funzione della loro estensione. Nel caso in esame queste aree sono classificate come pianura poiché di estensione molto ridotta.
- Collina: Porzione di territorio con quota non superiore ai 600 m s.l.m. per quanto riguarda l'Italia settentrionale, e quota non superiore ai 700 m s.l.m. nell'Italia centrale, meridionale e insulare. Nel caso in esame si considerano colline le aree con quota superiore ai 600 m s.l.m..
- Montagna il territorio caratterizzato dalla presenza di masse rilevanti aventi quota superiore 600/700 m s.l.m. in funzione della zona del territorio che si considera.

Con questi criteri di classificazione (Tabella 9) si ottiene la mappa riportata in Figura 41:

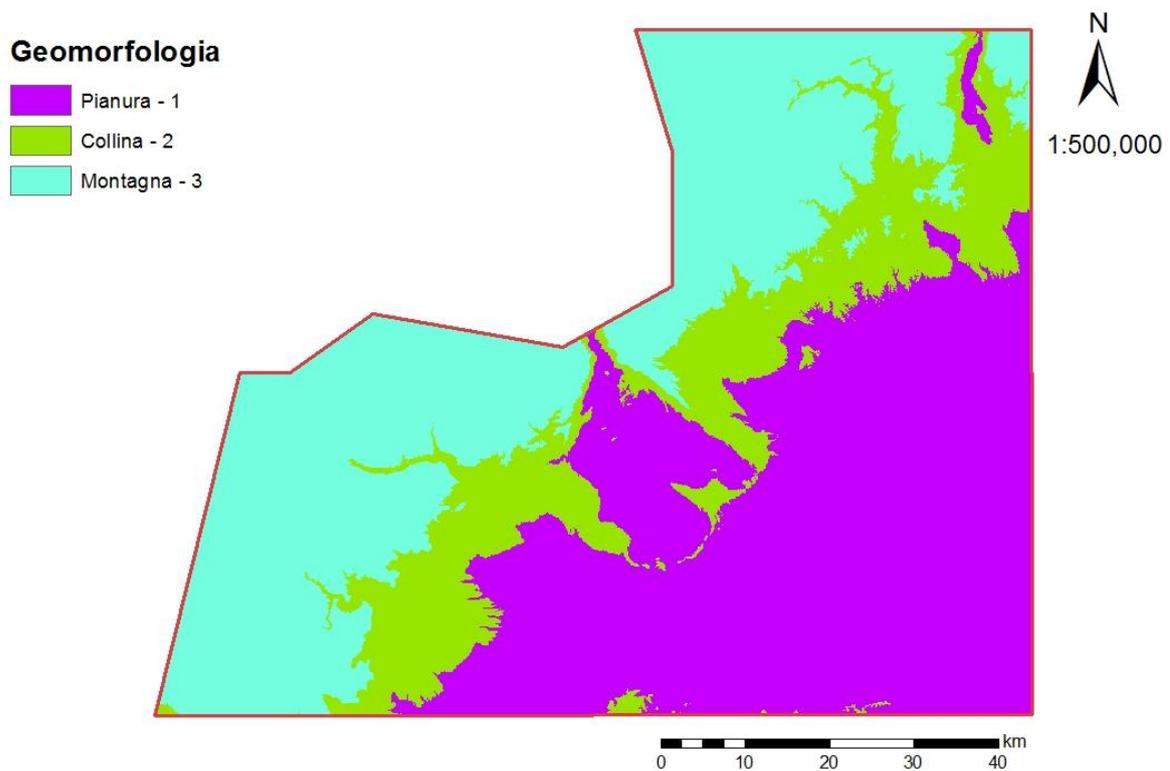


Figura 41: Mappa tematica della geomorfologia

Tabella 9: Classificazione della geomorfologia

Numero classe	Descrizione	Punteggio	Contributo
1	Collina	2	Moderato
2	Montagna	3	Scarso
3	Pianura	1	Buono

Uso del suolo/Copertura del suolo (Land use/Land cover)

Come punto di partenza si utilizza la mappa riguardante la tipologia di copertura del suolo della Regione (Figura 42).

Uso suolo

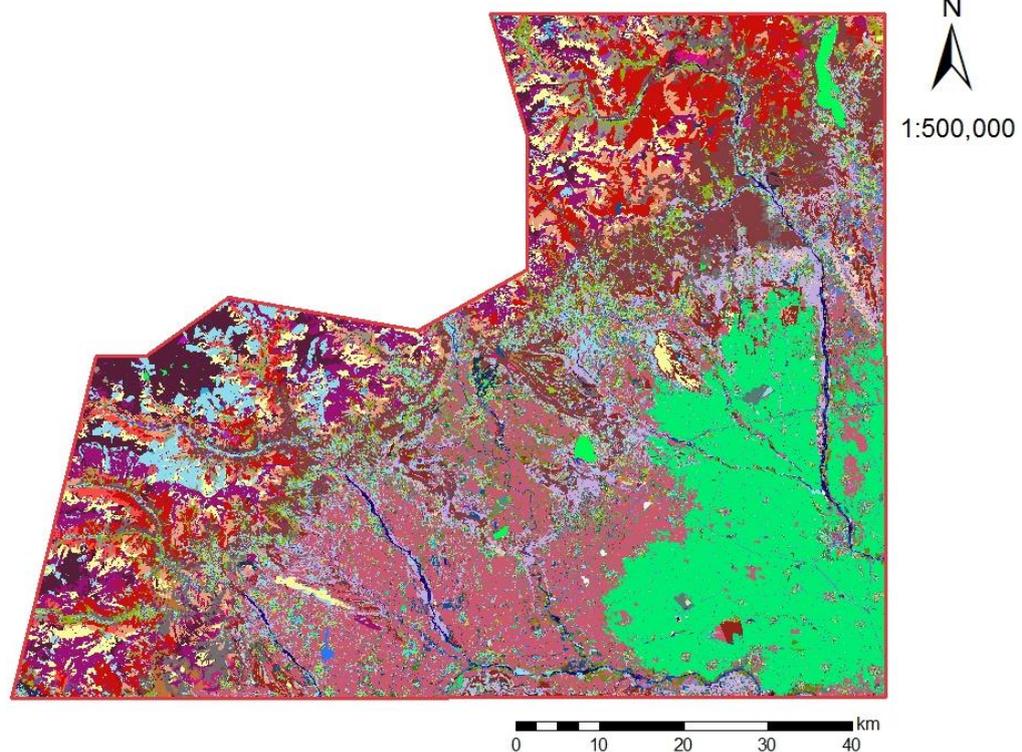
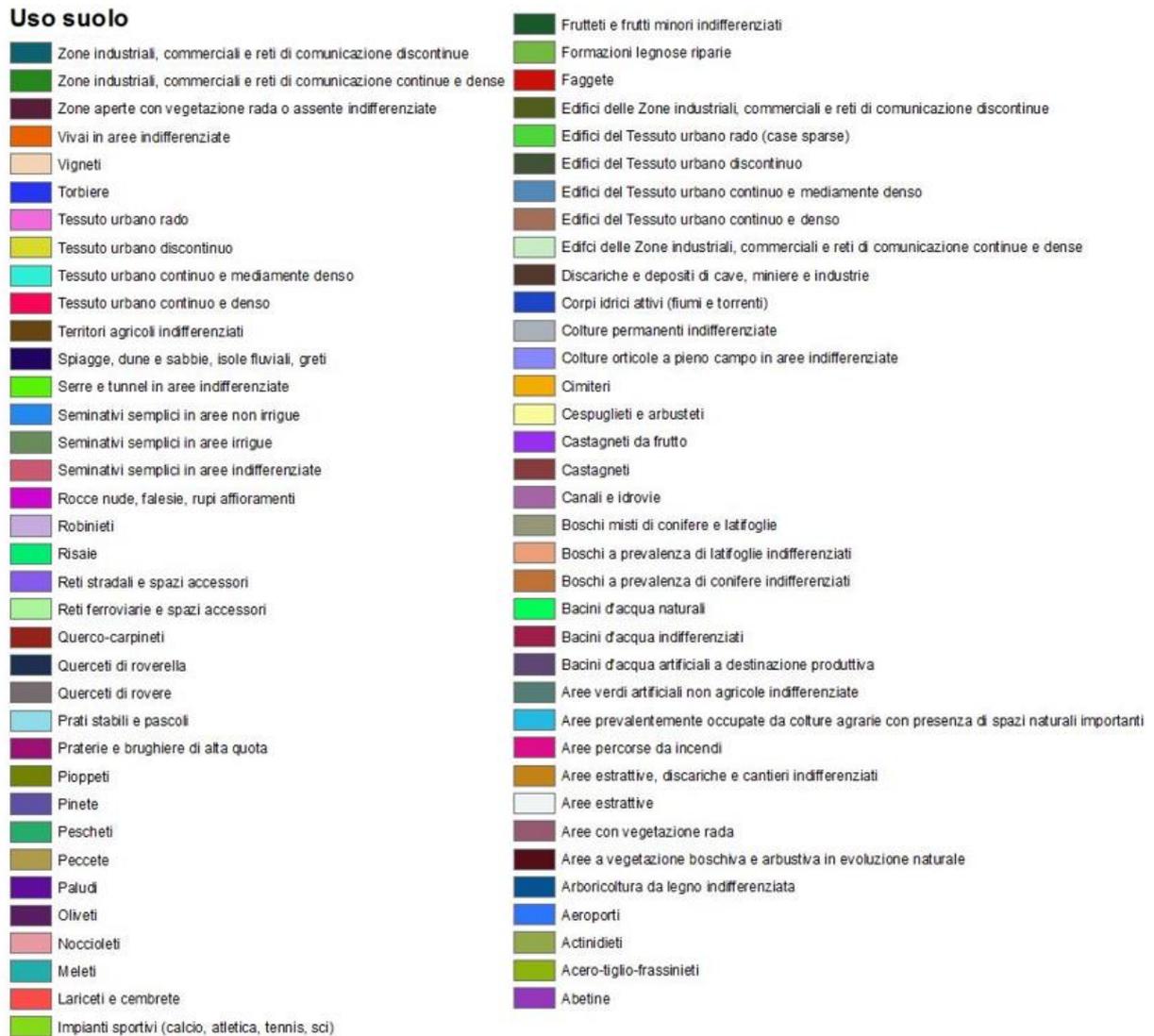


Figura 42: Mappa tematica di uso del suolo

A tutte le varie categorie sono poi attribuite le rispettive classi di contributo alla ricarica. Per facilitare la realizzazione della mappa tematica, si sono create 6 differenti maxi-classi a ciascuna delle quali viene attribuito un dato punteggio (Tabella 10 e Figura 43). Tutte le tipologie di uso del suolo precedentemente illustrate, vengono fatte rientrare nella maxi-classe che meglio le rappresenta:

Tabella 10: Classificazione dell'uso del suolo/copertura del suolo

Numero classe	Uso del suolo/Copertura del suolo	Punteggio	Contributo
1	Acqua	1	Buono
2	Agricoltura	1	Buono
3	Bosco	3	Scarso
4	Costruito agricolo	2	Moderato
5	Costruito urbano	3	Scarso
6	Roccia	3	Scarso

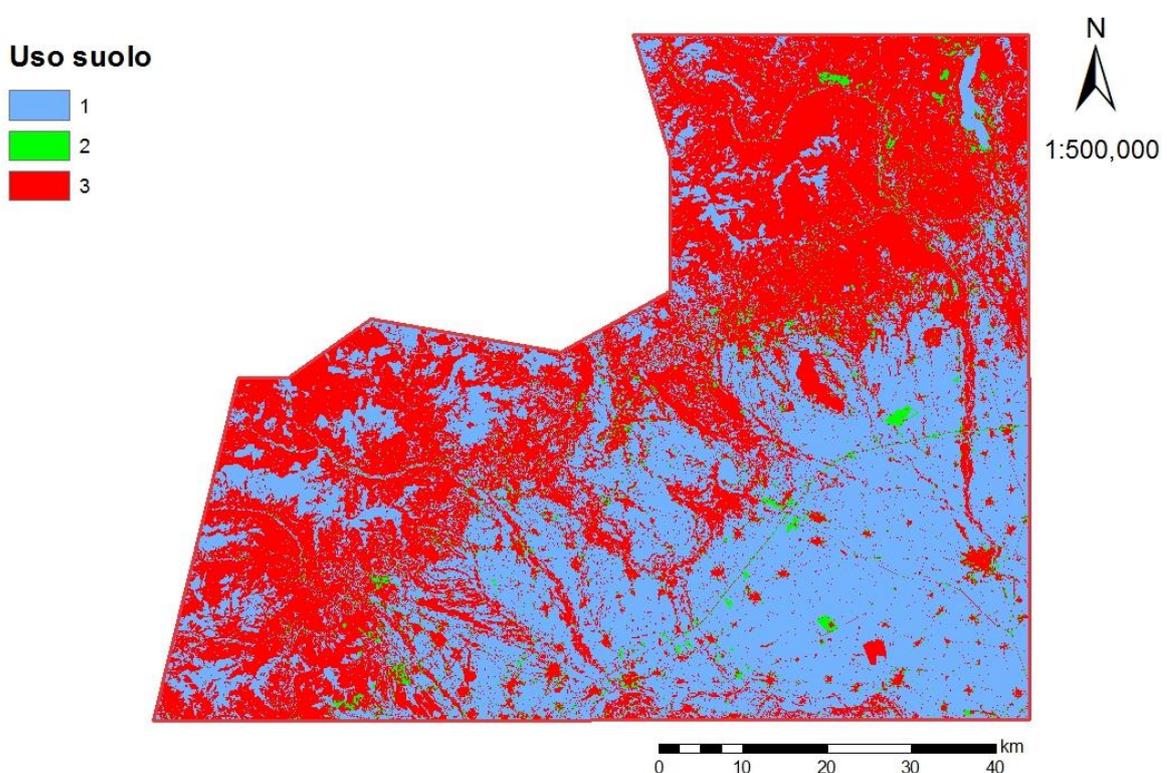


Figura 43: Mapa tematica di uso del suolo con i punteggi

Qualora non sia disponibile la mappa dell'uso suolo di interesse, è possibile ugualmente procedere alla creazione di una mappa, partendo però dall'immagine satellitare. Dopo aver creato delle regioni d'interesse (ROI) per ciascuna tipologia di copertura, si esegue un'analisi mediante il metodo della Maximum Likelihood Classification (massima verosimiglianza). Questo metodo è il più affidabile tra tutti quelli utilizzabili per la classificazione delle immagini poiché va ad attribuire ciascun pixel dell'immagine alla classe che più si avvicina a esso. Alla base del metodo c'è quindi la necessità di eseguire una precisa assegnazione dei pixel di riferimento alle varie classi, così da renderle più complete e rappresentative possibili. Maggiore è la qualità dell'immagine, maggiore è la precisione con cui avviene l'assegnazione di ciascun pixel alla classe corrispondente.

Densità di drenaggio (Drainage density)

La mappa è stata creata andando a calcolare la densità lineare dei corsi d'acqua, andando a utilizzare come input e come maschera il file della distribuzione fluviale in precedenza determinata (Figura 44). Così facendo si estrapolano le informazioni sulla densità di drenaggio relativa all'area di interesse (Figura 45).

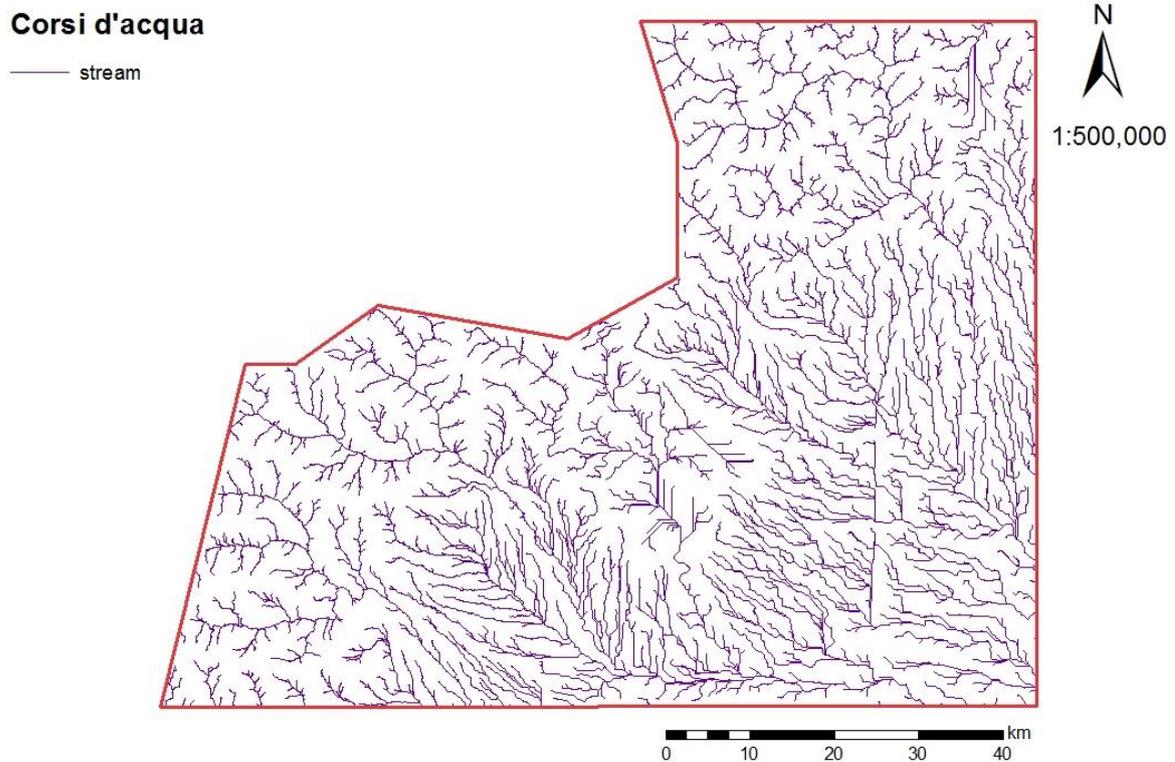


Figura 44: Mappa dei corsi d'acqua della zona

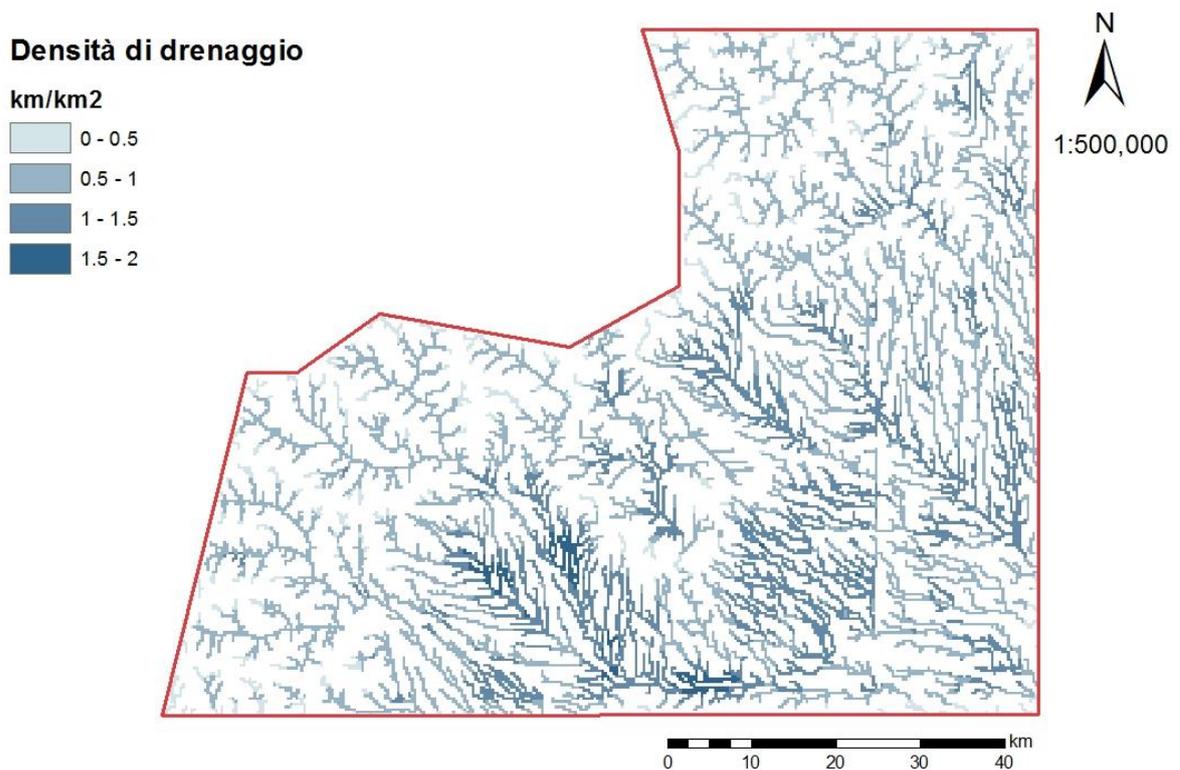


Figura 45: Mappa tematica della densità di drenaggio

La densità di drenaggio, espressa in km/km², è calcolata mediante il rapporto tra la lunghezza complessiva degli elementi fluviali all'interno dell'area e la superficie dell'area d'interesse. Nel caso in esame, questa grandezza morfologica è pari a:

$$DD = \frac{\text{Lunghezza totale dei fiumi}}{\text{Area}} = \frac{4936.417}{6026.263} = 0.819 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

La densità di drenaggio assume valori molto alti in corrispondenza di aree in cui il reticolo idrografico è molto ramificato e fitto. I valori più bassi invece vengono assunti in corrispondenza di quelle porzioni di terreno che presentano un comportamento permeabile e consentono quindi la penetrazione delle acque nel terreno. Come nelle mappe precedenti si procede alla suddivisione delle informazioni in classi come riportato in Tabella 11 e in Figura 46:

Tabella 11: Classificazione della densità di drenaggio

Numero classe	Densità di drenaggio (km/km ²)	Descrizione	Punteggio	Contributo
1	0 - 0.5	Bassa densità	1	Buono
2	0.5 - 1	Moderata densità	2	Moderato
3	1 - 1.5	Alta densità	3	Scarso
4	1.5 - 2	Elevata densità	3	Scarso

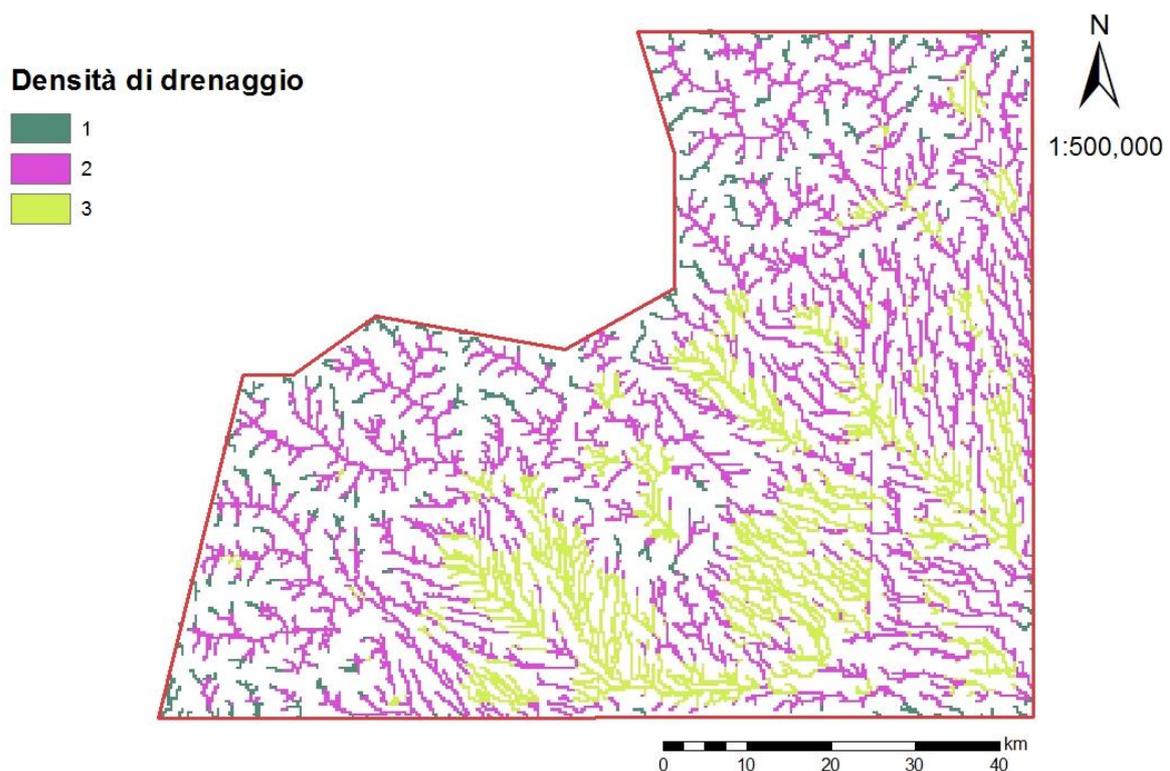


Figura 46: Mapa tematica della densità di drenaggio con i punteggi

Densità dei lineamenti (Lineament density)

I lineamenti sono caratteristiche geomorfiche lineari definite come "Linee significative di paesaggio, che rivela l'architettura nascosta dello strato di roccia"³². Questi lineamenti possono rappresentare zone di spostamento strutturale della crosta terrestre come ad esempio fratture,

³² Patil S. G., Mohite N. M. (Febbraio, 2014). "Identification of groundwater recharge potential zones for a watershed using remote sensing and GIS".

linee di confine tra differenti tipologie di rocce e faglie. Queste informazioni sono estraibili esclusivamente dalle immagini satellitari.

Il primo passo per la realizzazione di questa mappa consiste nell'analisi dell'immagine satellitare mediante il software ENVI Classic. In particolare si procede alla trasformazione della stessa in formato TIFF/Geo TIFF con una risoluzione in 8-bit in scala di grigi. Si procede quindi all'utilizzo di un altro software, Geomatica 2017, che consente di andare a definire in maniera corretta tutti i lineamenti presenti nell'area di interesse (Figura 47).

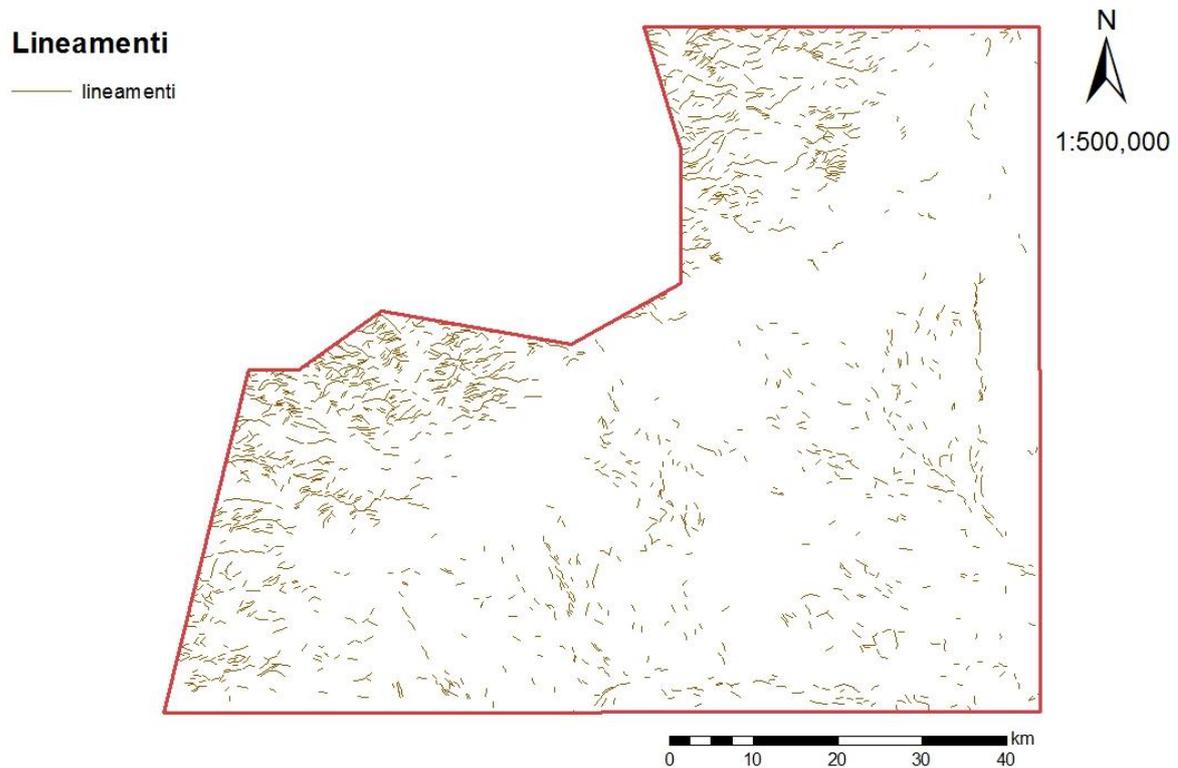


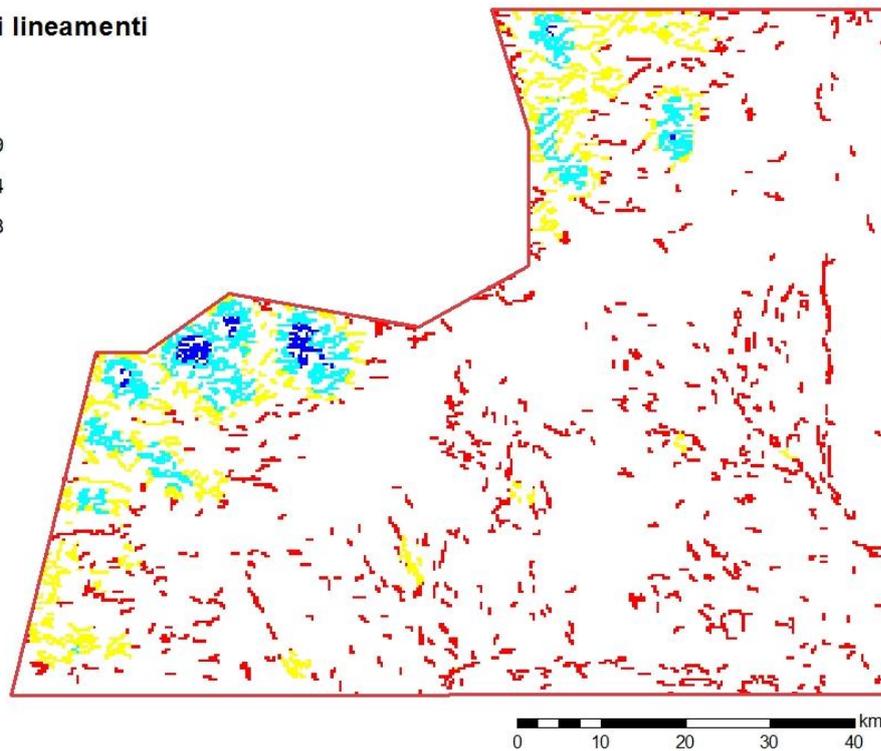
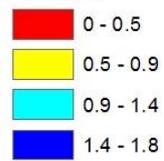
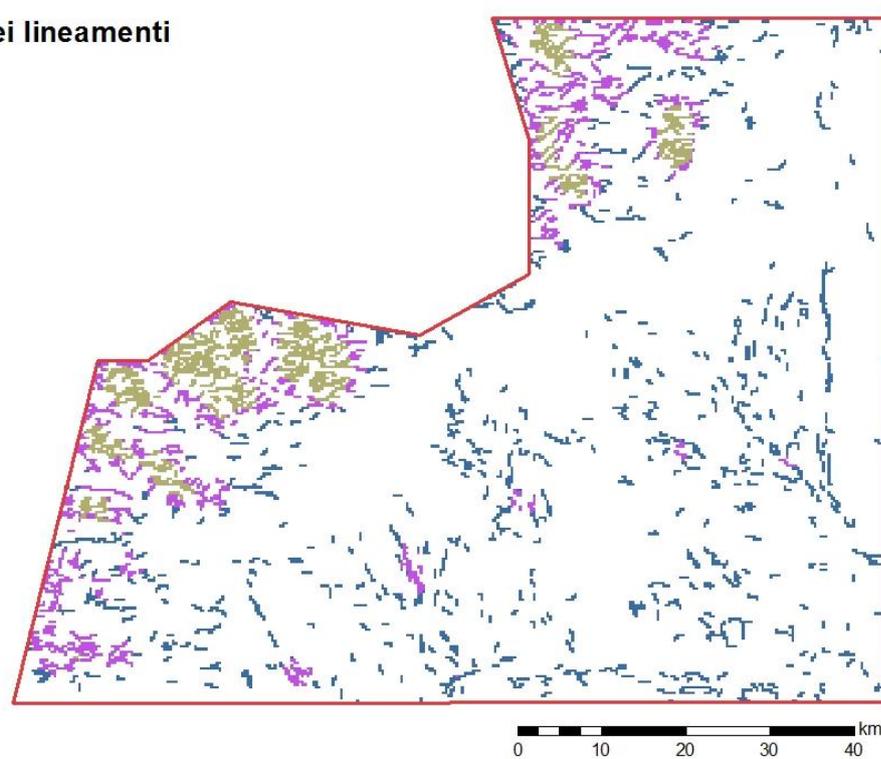
Figura 47: Distribuzione dei lineamenti

Anche in questo caso, la mappa è stata creata andando a calcolare la densità lineare dei lineamenti, andando a utilizzare come input e come maschera il file della distribuzione dei lineamenti definita pocanzi (Figura 48).

Come per le mappe precedenti, viene attribuito un punteggio ai vari intervalli definiti. A differenza della densità di drenaggio, il maggior contributo alla ricarica viene attribuito alle aree in cui vi è una maggior densità (Tabella 12 e Figura 49):

Tabella 12: Classificazione della densità dei lineamenti

Numero classe	Densità dei lineamenti (km/km ²)	Descrizione	Punteggio	Contributo
1	0 - 0.5	Bassa densità	3	Scarso
2	0.5 - 0.9	Moderata densità	2	Moderato
3	0.9 - 1.4	Alta densità	1	Buono
4	1.4 - 1.8	Elevata densità	1	Buono

Densità dei lineamentikm/km²**Figura 48: Mappa tematica della densità dei lineamenti****Densità dei lineamenti****Figura 49: Mappa tematica della densità dei lineamenti con i punteggi**

Overlay Analysis

L'ultimo passo consiste nella realizzazione di una mappa tematica che rappresenti le potenziali aree di ricarica della zona di interesse. Questa è ottenuta da una sovrapposizione delle mappe in precedenza realizzate, andando ad attribuire a ciascuna di esse un peso, come riportato nella Tabella 13.

Tabella 13: Riassunto delle informazioni delle differenti mappe tematiche e rispettivi pesi

Numero mappa	Tipologia mappa	Classe		Punteggio	Peso (%)
1	Pendenza	0 - 1 %		1	20
		1 - 3 %		1	
		3 - 5 %		2	
		5 - 25 %		3	
		25 - 80 %		3	
2	Tipo di suolo	Complesso dei Depositi Villafranchiani (sabbie e argille)		3	20
		Complesso dei Depositi Villafranchiani (ghiaie)		2	
		Complesso dei Depositi Inifferenziati del Pliocene		2	
		Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Wurn		2	
		Complesso delle Argille di Lugagnano		2	
		Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Mindel		3	
		Complesso dei Depositi fluviali-fluvioglaciali del Riss		2	
		Serie dei sedimenti Prepliocenici del Bacino Terziario Piemontese		3	
		Complesso delle Sabbie di Asti		2	
		Complesso dei Depositi glaciali pleistocenici		3	
		Complesso dei depositi alluvionali olocenici		1	
		Serie dei Complessi Cristallini del Rilievo Alpino		3	
Complesso delle Rocce Calcaree		1			
3	Geomorfologia	Collina		2	25
		Montagna		3	
		Pianura		1	
4	Uso del suolo/ Copertura del suolo	Acqua		1	25
		Agricoltura		1	
		Bosco		3	
		Costruito agricolo		2	
		Costruito urbano		3	
		Roccia		3	
5	Densità di drenaggio	0 - 0.5	Bassa densità	1	5
		0.5 - 1	Moderata densità	2	
		1 - 1.5	Alta densità	3	
		1.5 - 2	Elevata densità	3	
6	Densità dei lineamenti	0 - 0.5	Bassa densità	3	5
		0.5 - 0.9	Moderata densità	2	
		0.9 - 1.4	Alta densità	1	
		1.4 - 1.8	Elevata densità	1	

Dopo aver fatto una riclassificazione delle mappe, usando come unico parametro il punteggio, si procede alla realizzazione della mappa finale che avviene mediante l'implementazione su ArcMap della seguente equazione che consente, per ciascuna mappa, di andare a moltiplicare il punteggio con il rispettivo peso:

$$Overlay = \sum (Punteggio \times Peso)$$

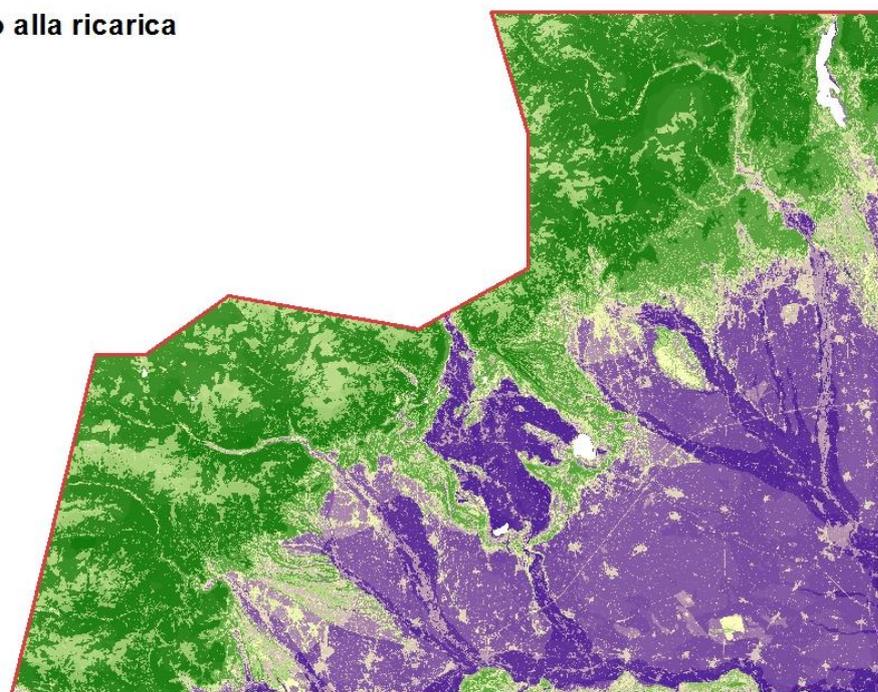
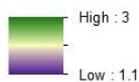
È importante specificare che la riclassificazione non è obbligatoria ma consigliata in modo da avere file contenenti come unica informazione quella d'interesse. In alternativa si va ad aggiungere colonna agli attributi di ciascuna mappa, contenente per ciascuna classe il rispettivo punteggio. Quest'ultima opzione è altrettanto valida ma richiede un tempo di svolgimento ed elaborazione più lungo.

Per consentire al software di eseguire l'operazione in precedenza descritta è necessario inserire il seguente codice:

```
Lookup("pendenza","punteggio")*0.20+Lookup("tipo_suolo","punteggio")*0.20+Lookup("geomorfologia","punteggio")*0.25+Lookup("uso_suolo","punteggio")*0.25+Lookup("densità_drenaggio","punteggio")*0.05+Lookup("densità_lineamenti","punteggio")*0.05
```

In questo modo è possibile ottenere la mappa che consente di individuare le aree di maggior influenza sulla ricarica delle acque sotterranee (Figura 50) che, come per le mappe precedenti, può essere rappresentata anche in termini di punteggio (Figura 51):

Contributo alla ricarica



N
1:500,000

0 10 20 30 40 km

Figura 50: Mappa tematica ottenuta dalla sovrapposizione delle diverse mappe tematiche

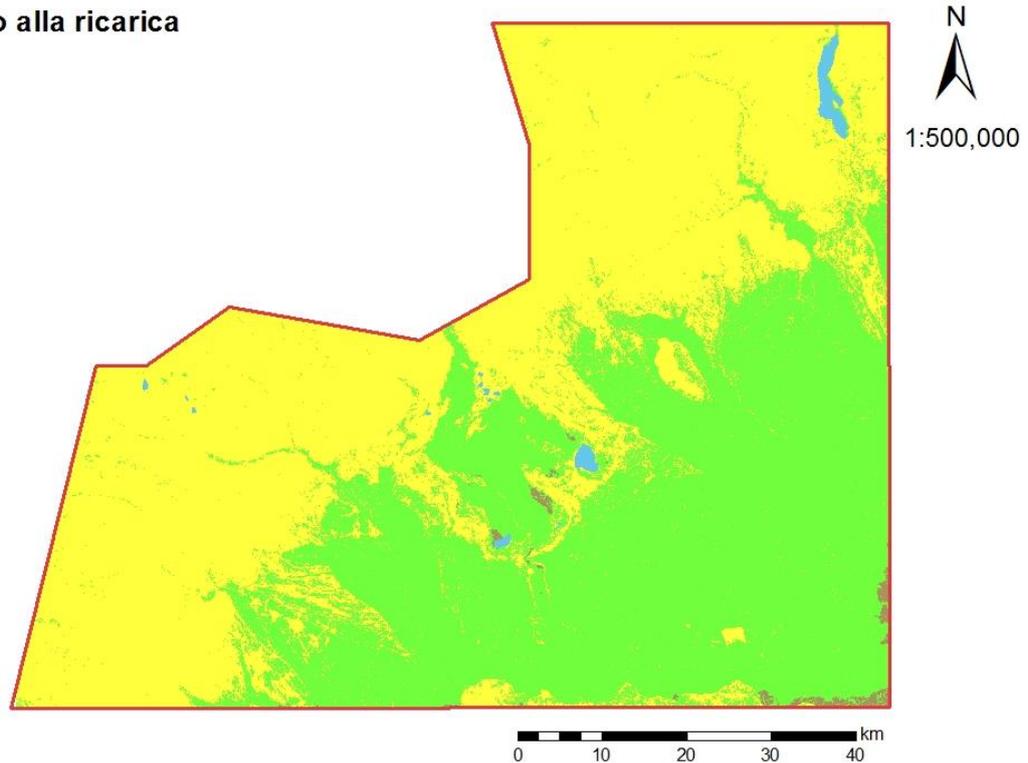
Contributo alla ricarica

Figura 51: Mappa tematica del contributo alla ricarica

La mappa ottenuta è estremamente precisa poiché tutti gli input hanno una risoluzione di 10 metri, fatta eccezione della mappa relativa all'uso del suolo che ha una risoluzione di 2 metri. Questa elevata precisione, tuttavia, perde di significato dal momento che, come definito precedentemente per le immagini satellitari, l'immagine o le immagini con la qualità peggiore influenzano la qualità del risultato finale. Si ottiene quindi una mappa con un elevato grado di dettaglio fino a una scala 1:10.000.

CAPITOLO 5

Confronto tra le aree di ricarica

Dopo aver creato tutte le mappe d'interesse (Figura 52) e aver creato quindi la mappa tematica relativa alle potenziali aree di ricarica (Figura 53), è necessario fare un confronto con le aree di ricarica individuate dalla Regione nel D.D. n. 268 del 21 luglio 2016 (Figura 54).

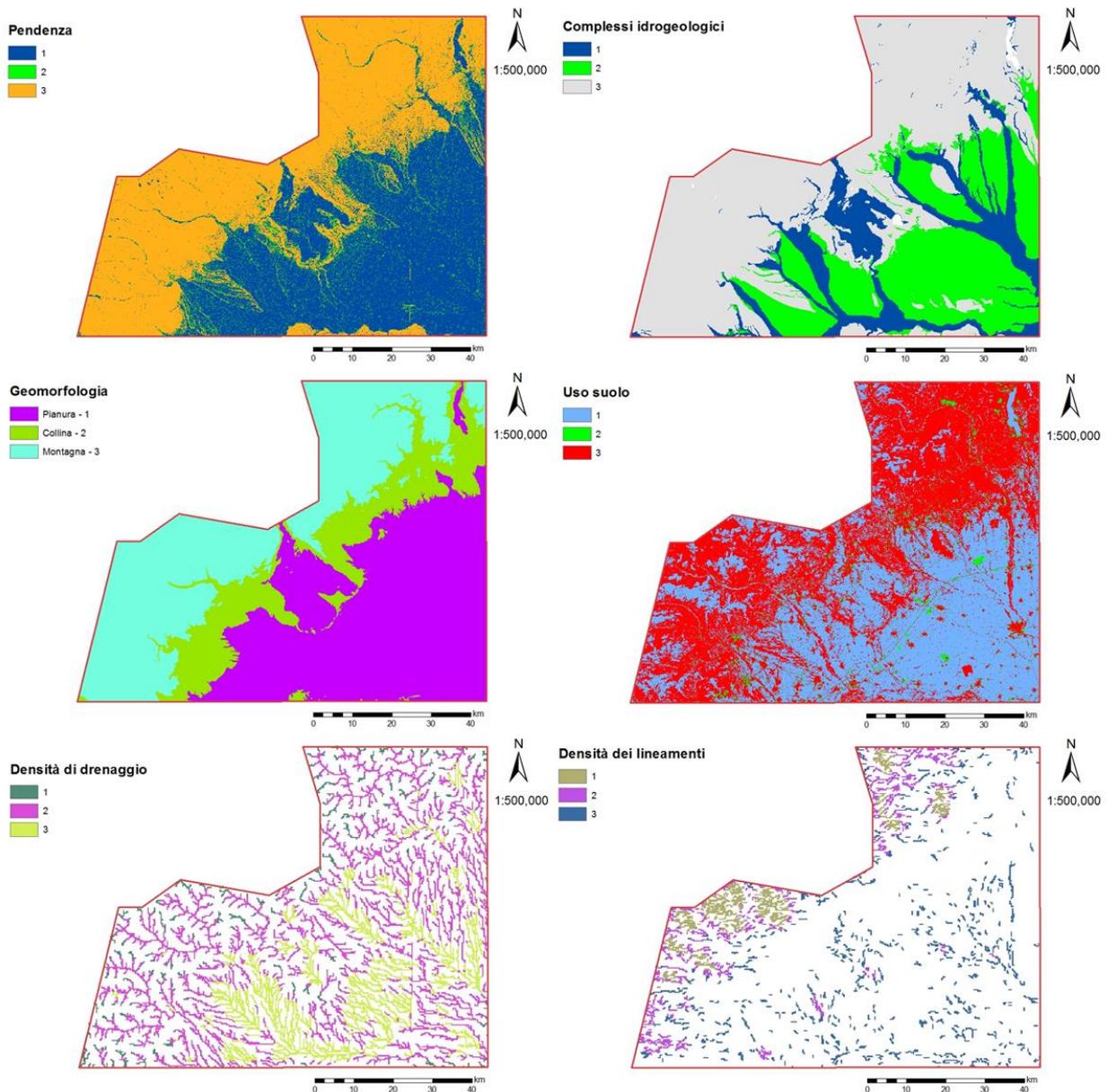


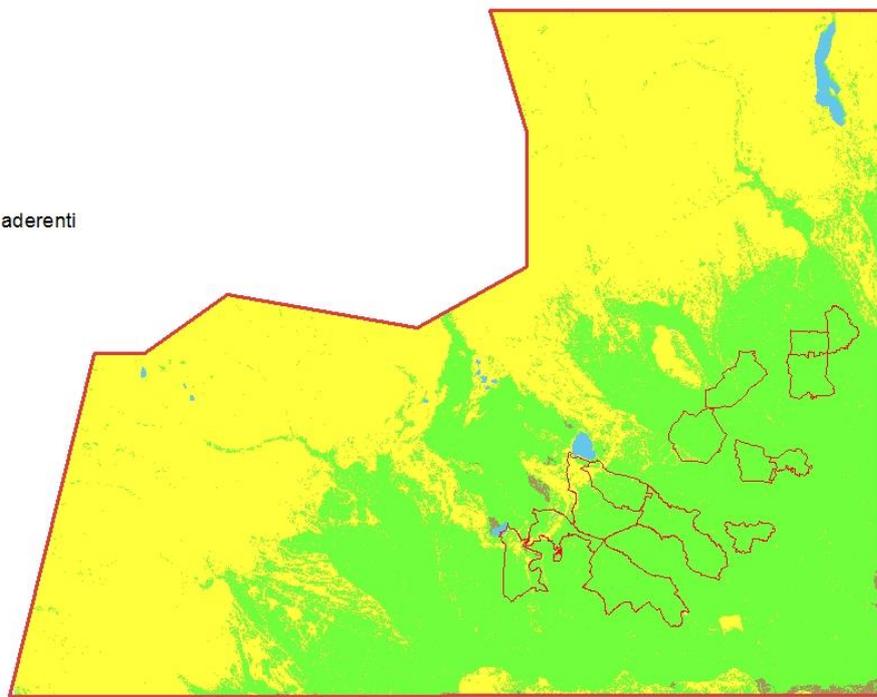
Figura 52: Riassunto delle mappe realizzate per definire le potenziali aree di ricarica

Andando ad analizzare singolarmente la Figura 53 è possibile notare come tutta la parte montana contribuisca in maniera non significativa all'area di ricarica, mentre nella zona collinare e pianeggiante il contributo risulta mediamente significativo. Ci sono poi, in prossimità dei comuni d'interesse, delle aree in cui il contributo alla ricarica è molto alto (Figura 55). Sarà necessario, nella successiva fase di campionamento e d'indagine, andare ad approfondire

queste aree e nel caso adottare le adeguate misure di protezione. Altre aree di buon contributo si trovano nella parte Sud-Ovest dell'area. Queste tuttavia, essendo particolarmente distanti dai comuni, potrebbero non influire in maniera significativa.

Legenda

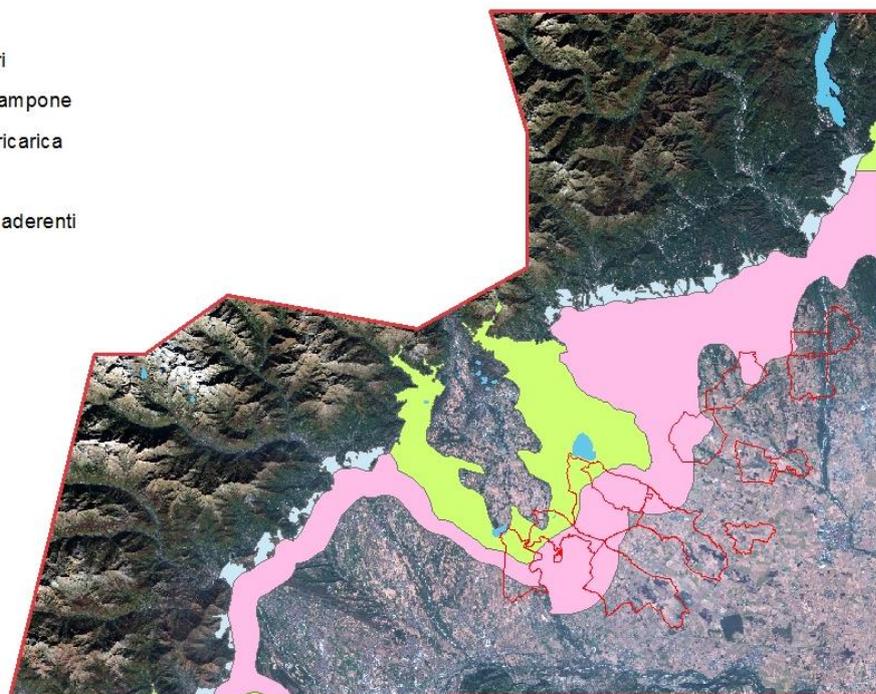
- 1
- 2
- 3
- Laghi
- Comuni aderenti

N
1:500,000

0 10 20 30 40 km

Figura 53: Mapa tematica del contributo alla ricarica con i confini comunali**Legenda**

- Anfiteatri
- Fascia tampone
- Area di ricarica
- Laghi
- Comuni aderenti

N
1:500,000

0 10 20 30 40 km

Figura 54: Aree di ricarica individuate dalla Regione nel D.D. n. 268 del 21 luglio 2016

È da precisare che, come indicato nella legenda, le aree azzurre rappresentano i laghi naturali. Si è deciso, all'interno di questo studio, di trascurare questi elementi in fase di realizzazione delle mappe poiché il loro contributo alla ricarica, seppur estremamente importante, risulta totalmente indipendentemente dalle altre caratteristiche territoriali. La loro considerazione avrebbe potuto comportare una non adeguata accuratezza dei risultati ottenuti.

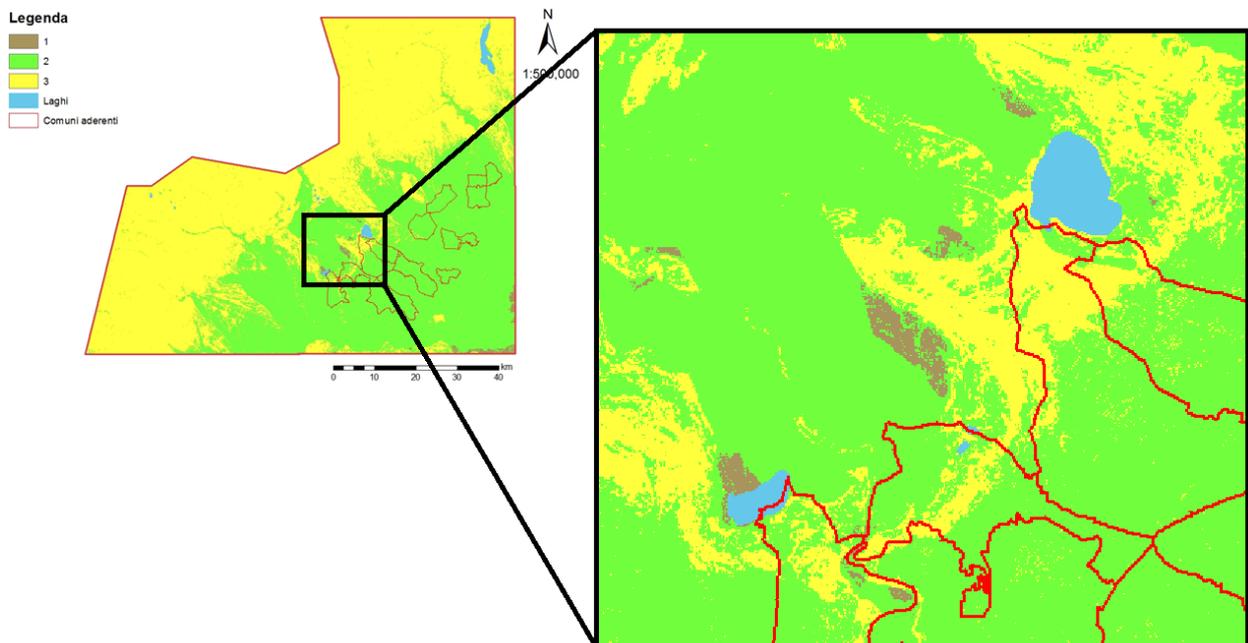


Figura 55: Zoom sulle aree di maggior contributo in prossimità dei comuni aderenti

Prima di procedere al confronto tra le due mappe, è necessario andare a specificare alcuni termini presenti nella Figura 54. Oltre a quello di aree di ricarica, abbondantemente trattata nel Capitolo 1 del presente elaborato, è importante dare un significato ai termini di anfiteatro (morenico) e fascia tampone. L'anfiteatro morenico viene definito come un "complesso di cordoni (argini, valli) morenici, disposti a semicerchio o a ferro di cavallo e spesso concentrici, depositi da un ghiacciaio allo sbocco di una valle in area pedemontana"³³. Come detto in precedenza, seppur non ha la concreta certezza di un contributo da parte di questi elementi al fenomeno della ricarica dell'acquifero profondo, in via cautelativa si è deciso di far rientrare anche queste zone nell'area di ricarica.

La fascia tampone, invece, sono aree di passaggio da una agricoltura tradizionale a una di tipo intensiva e sono individuate in prossimità della zona di passaggio tra collina e montagna. Da un punto di vista idrologico, queste aree contribuiscono in maniera scarsa alla ricarica delle acque sotterranee, tuttavia la loro importanza è dovuta alla capacità di intercettare eventuali sostanze inquinanti presenti nelle acque, impedendo il loro raggiungimento delle aree di ricarica situate poco più a valle. La loro funzione è quindi di consentire un primo filtraggio delle acque.

Appurata l'importanza di considerare anche questi elementi all'interno dell'analisi, si procede con il confronto delle due mappe riportate nelle figure precedenti.

³³ ARPA Piemonte (Luglio 3, 2018). "Anfiteatro morenico".

Da un primo confronto è possibile individuare una certa corrispondenza con quanto definito dalla mappa tematica della Regione. Tuttavia è possibile fare una prima constatazione: la mappa regionale è in scala 1:250.000 che a sua volta è stata estrapolata da una mappa 1:500.000. Questo fa sì che il grado di dettaglio dell'informazione contenuta sia molto bassa. Differente invece è l'informazione trasmessa dalla mappa realizzata in questo elaborato: come descritto nel precedente capitolo, l'immagine ha un grado di dettaglio accettabile fino a 1:10.000. Questo è reso possibile grazie alle proprietà del DTM a passo 10 utilizzato come base di partenza di questa elaborazione.

È importante precisare che il livello del grado d'informazione non è da trascurare. Infatti, da esso dipendono, qualora le esigenze lo richiedano, le aree da sottoporre a restrizioni nell'uso del suolo o, nei casi di maggiore necessità, da sottoporre a esproprio.

Concentrandosi ora sulle sole aree di ricarica e sulle fasce tampone, è possibile fare alcune considerazioni, con particolare riferimento alla loro estensione (Figura 56 e Figura 57).

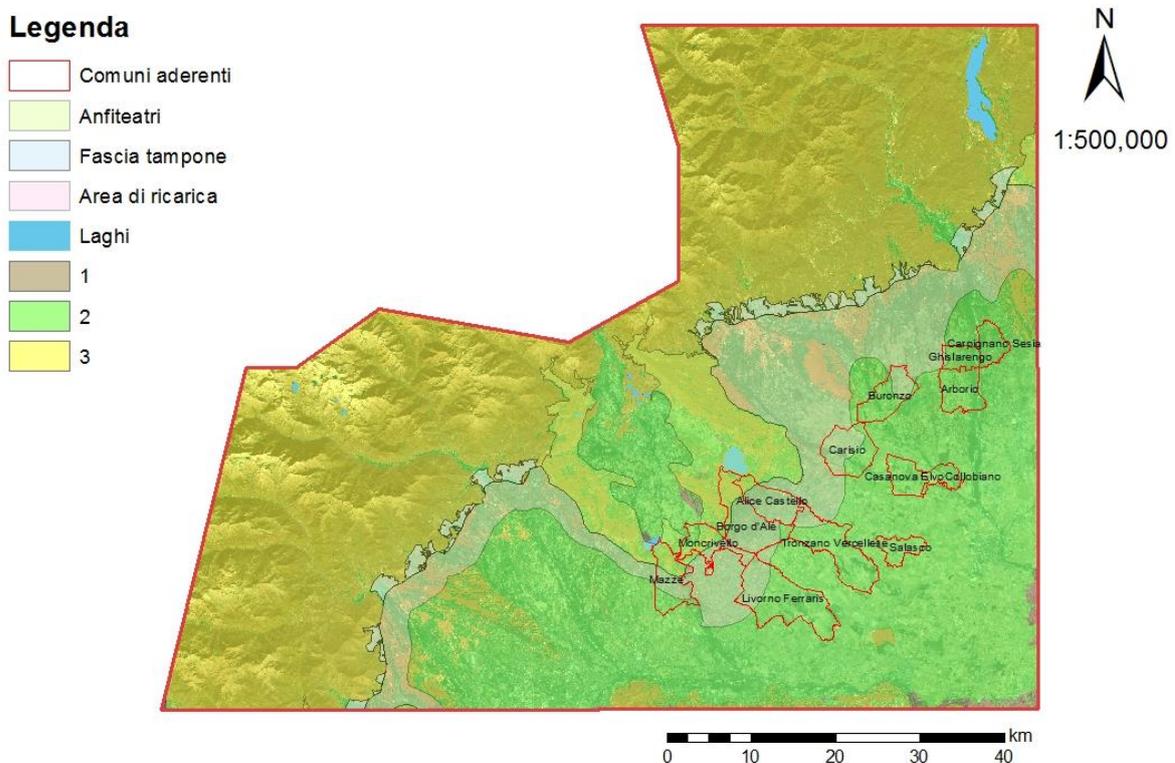


Figura 56: Confronto tra le aree di ricarica

Una prima considerazione è possibile farla per quanto riguarda le fasce tampone, esse si trovano quasi interamente in corrispondenza di aree con uno scarso contributo alla ricarica. Tuttavia, in corrispondenze di quelle zone in cui le fasce tampone corrispondono a zone classificate come aventi moderato contributo alla ricarica, è bene eseguire uno studio di maggior dettaglio nelle successive fasi di progetto. Questo è finalizzato alla definitiva attribuzione dell'area a una data classe di contributo.

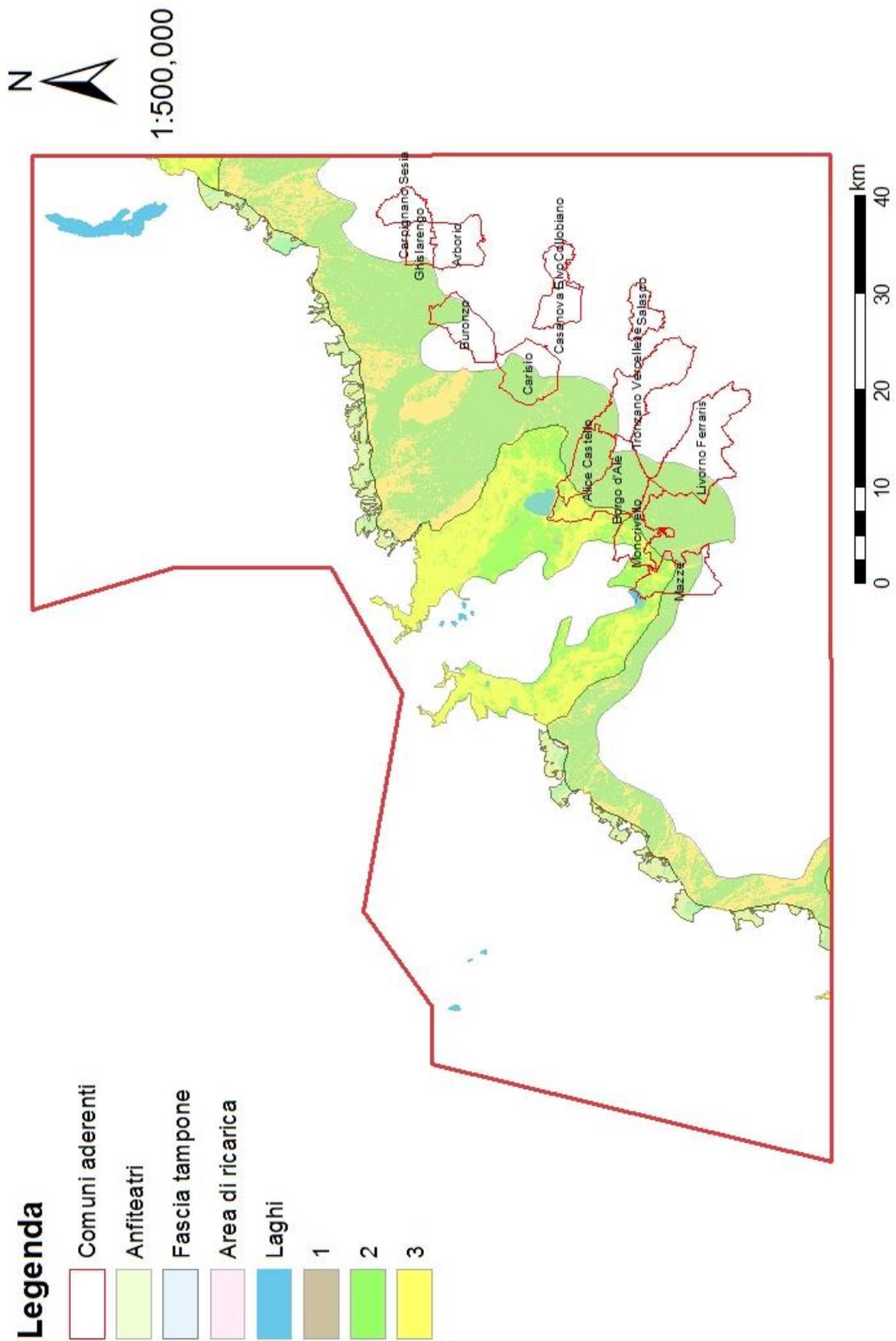


Figura 57: Confronto di dettaglio tra le mappe

Analizzando con maggior dettaglio la Figura 57, è possibile affermare che gli anfiteatri morenici, considerati all'interno dalla mappa regionale come appartenenti all'area di ricarica, sono costituiti in prevalenza da terreno con uno scarso contributo. Si potrebbe quindi affermare che questi elementi geologici in realtà hanno uno scarso contributo. Fanno eccezione le aree in prossimità dei laghi, in cui si ha un mediocre contributo alla ricarica. All'interno dell'area degli anfiteatri morenici, sono state individuate anche aree con un buon contributo. Sarà necessario quindi prevedere un'indagine di maggior dettaglio al fine di adottare eventuali sistemi di protezione di queste aree. Tra l'altro, data la presenza di zone agricole, è bene valutare l'eventuale possibilità di imporre limitazioni sulle modalità di coltivazione, al fine di evitare che l'eccessivo utilizzo di diserbanti e sostanze pesticida. Queste, infatti, potrebbero, infiltrandosi nel terreno, causare un peggioramento dello stato qualitativo dell'acqua. Lo studio di quest'area richiede un'attenzione particolare dovuta anche alla presenza di laghi naturali che, come accennato, contribuiscono a pieno alla ricarica degli acquiferi. Il discorso appena affrontato per quanto riguarda gli anfiteatri morenici, è valido solo per quello considerato all'interno dello studio. È chiaro che gli altri distribuiti sul territorio piemontese, richiedono una propria indagine.

Altra considerazione viene fatta esaminando direttamente le aree di ricarica. Queste effettivamente si sviluppano in un territorio classificato come avente un mediocre contributo alla ricarica. Tuttavia, nella parte Nord-Est, rientrano all'interno di queste aree, anche zone di territorio classificate come scarsamente contribuenti alla ricarica. È bene quindi valutare una potenziale modificazione dell'andamento delle aree di ricarica in questa zona. Questa possibilità è spinta soprattutto dal fatto che, un territorio che rientra all'interno di un'area di ricarica, è soggetto a limitazioni dal punto di vista dell'uso del suolo. Essendoci all'interno delle stesse dei centri abitati, è bene valutare se i vincoli legati alle aree di ricarica possono essere ridotti oppure no.

Per concludere, è importante ribadire che l'area oggetto di studio è particolarmente sensibile all'inquinamento delle acque sotterranee. L'intero progetto è finalizzato alla correzione delle aree di ricarica esistenti al fine di preservare la qualità delle acque. Tuttavia è importante tenere presente che le indicazioni e i risultati ottenuti all'interno di questo elaborato sono indicativi per le successive fasi di progetto (a tal proposito si faccia riferimento alla parte iniziale del Capitolo 4). Solo in seguito ad un adeguato piano d'indagine, con maggior approfondimento nelle aree più sensibili individuate in questa analisi, sarà possibile redigere delle adeguate mappe sostitutive a quella presente nel Decreto Dirigenziale n. 268 del 21 luglio 2016.

Saranno poi queste ultime la base per l'avanzamento di una proposta di legge atta a modificare e migliorare l'estensione delle aree di ricarica, con particolare interesse all'area della Valledora.

ALLEGATI

Allegato 1: Censimento dei Centri Di Pericolo (CDP) presenti sul territorio

Sezione 1: PRODUTTORI REALI E POTENZIALI DI INQUINAMENTO DEI CORPI IDRICI SOTTERRANEI	SI	NO
Industria con scarichi e/o rifiuti organico-biologici (F = allacciamento in fognatura urbana)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Industria con scarichi e/o rifiuti organici difficilmente biodegradabili (F = allacciamento in fognatura urbana)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Industria con scarichi e/o rifiuti inorganici (F = allacciamento in fognatura urbana)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gasdotto, metanodotto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oleodotto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Deposito di petrolio, benzina, ecc. (compresi distributori di carburanti)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autoparco, officina meccanica, interporto, stazione ferroviaria importante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Centrale termoelettrica.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Centrale elettronucleare	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Discarica incontrollata e/o abusiva di rifiuti solidi misti	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Discarica incontrollata e/o abusiva di marino e sterili minerali, scorie e residui di lavorazione industriale, autodemolizioni, rottamazioni	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cava abbandonata utilizzata come di-scarica incontrollata di RSU o assimilabili (v); di RS o assimilabili (x) RTN o assimilabili (+) (Per le distinzioni, vedi DPR 915/82 e relative norme tecniche)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lagunaggio, bacino e vasche di raccolta, decantazione e/o dispersione di rifiuti liquidi (urbani o/e industriali)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Miniera, pozzo minerario (con freccia se provvisto di impianto di eduazione)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Punto di recapito di collettore di acque reflue urbane o assimilabili (non tratta-te)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pozzo perdente, fossa settica, ecc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Area urbana o assimilabile, di rete fognaria	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Collettore principale di rete ft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ospedale, luogo di cura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mattatoio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cimitero	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aeroporto commerciale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Porto-petrolifluviale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Campeggio, campo nomadi, mento provvisorio o/e abusivo copoli)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coltivazioni intensive in serra	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Punto di sversamento/travaso, accidentale o doloso di liquidi tossici e nocivi sul/nel sottosuolo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Strada di grande traffico, autostrada, superstrada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Industria zootecnica. N.B. Ove possibile, indicare con numeri romani accanto al simbolo la classe di consistenza: I = meno di 50 capi; II = 50-200; III = 200-500; IV = 500-2000; V = 2000-5000; VI = oltre 5000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allevamento con stabulazione libera	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allevamento: suini	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allevamento: bovini	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allevamento: ovicaprini ed equini	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allevamento: piscicoltura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Allevamento: ovicunicoli	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Area sterile, incolta o con colture spontanee o che non prevedono trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, ecc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Area con colture che prevedono limitati trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, ecc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Area con colture che prevedono frequenti ed abbondanti trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, ecc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Area soggetta ad irrigazione per sommersione o per scorrimento. Risaia, marcita	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Deposito di prodotti chimici ed altri materiali ad uso agricolo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Concimaia, stoccaggio di deiezioni animali (liquide e/o solide) se separate dall'allevamento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sezione 2: POTENZIALI INGESTORI E VIACOLI DI INQUINAMENTO DEI CORPI IDRICI SOTTERRANEI	SI	NO
Cava in attività (P = scavo che raggiunge la superficie piezometrica della falda sottostante)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cava abbandonata (P = scavo che raggiunge la superficie piezometrica della falda sottostante)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cava ritombata	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pozzo, abbandonato o/e mal costruito, potenzialmente capace di connettere l'inquinamento di superficie all'acquifero sottostante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Forme carsiche diffuse (Indice di carsismo = 0.5-1; 1-5; > 5)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Campo carsico con doline	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cavità carsica orizzontale (a = attiva; b = temporaneamente attiva; c = inattiva)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inghiottitoio, pozzo verticale, abisso, punto di sparizione di un corso d'acqua superficiale (a = attivo; b = temporaneamente attivo)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sezione 3: PREVENTORI E/O RIDUTTORI DELL'INQUINAMENTO	SI	NO
Impianto di depurazione di acque reflue urbane (solo primario e secondario)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Impianto di depurazione di acque reflue urbane (primario e secondario)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Impianto di depurazione di acque reflue urbane (primario, secondario e terziario)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Discarica (prima categoria)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Discarica (seconda categoria tipo A)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Discarica (seconda categoria tipo B)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Discarica (seconda categoria tipo C)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Centro di trattamento per rifiuti tossici e nocivi (RTN) e assimilabili	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Centro di trattamento per rifiuti solidi urbani (RSU) e assimilabili	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zona di rispetto di opera di captazione a scopo idropotabile (tempo di sicurezza 60g)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sezione 4: PRINCIPALI SOGGETTI AD INQUINAMENTO	SI	NO
Pozzo di captazione a scopo industriale e/o agricolo (C = captazione di più acquiferi sovrapposti)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pozzo di captazione a scopo idropotabile (C = captazione di 00 acquiferi sovrapposti)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Campo-pozzi (C = captazione di più acquiferi sovrapposti)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sorgente importante non captata	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sorgente importante captata a scopo idropotabile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sorgente o gruppo sorgivo termale (T) e/o minerale (M) (Lettere affianco al simbolo)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Perimetro di recinzione protezione delle opere di presa.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Traccia del cono di depressione indotto dal pompaggio in periodo di magra	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Acquedotto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Galleria drenante, trincea drenante, opera di presa in falda di sorgenti	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Serbatoio interrato, in caverna per acque potabili	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bibliografia

A

Allison G., Stone W., Hughes M. (1990). "Land clearance and river salinization in the western Murray Basin, Australia", *J. Jydrol*, p. 119.

B

Boccardo P., Mondino E. B., Disabato F., Tonolo F. G., Perez F. (Settembre, 2007). "Laboratorio di telerilevamento: Guida all'utilizzo del Software ENVI". Politecnico di Torino. Versione 2.

Bove A., Casaccio D., Destefanis E., De Luca D. A., Lasagna M., Masciocco L., Ossella L., Tonussi M. (Luglio, 2005). "Assetto geoidrologico della Regione Piemonte". Idrogeologia della pianura piemontese, Chapter: 1, Publisher: Mariogros Industrie Grafiche S.p.A., Editors: Regione Piemonte, pp.17.

Bruno R., Esposito L., Mainolfi L., Valletta M. "La protezione degli acquiferi attraverso la valutazione della vulnerabilità intrinseca all'inquinamento: esempi di applicazione nell'area beneventana (Campania)".

C

Carey M, Hayes P., Renner A. (Agosto 2009). "Groundwater source protection zones - Review of methods". Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD. ISBN: 978-1-84911-036-5

Catalano M., Lonigro A. (2015). "Progetto PON In.Te.R.R.A.: Linee guida per il riuso irriguo delle acque reflue depurate". Edizione: Edizioni di pagina, Bari, Capitolo: 1

- Introduzione, Editori: Rubino P. e Lonigro A., pp. 17 – 50.

ČenčurCurk B., ŽvabRožič P. (Ottobre 13, 2016). "Slovenian Rules on criteria for the designation of a water protection zone". Faculty of Natural Sciences and Engineering University of Ljubljana (FB5). Ljubljana, 2015.

Chave P., Howard G., Schijven J., Appleyard S., FladererF., SchimonW. (2006). "Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources". Chapter 17, Pag. 465-492. Edited by Schmoll O., Howard G., Chilton J. and Chorus I.. ISBN: 1843390795. Published by IWA Publishing, London, UK.

Civita M. (1987). "La previsione e la prevenzione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità". Atti Conv.: "Inquinamento delle acque sotterranee: previsione e prevenzione. Mantova".

Civita M., De Maio M., Farina M., Zavatti A. (2001). "Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento".

Civita M. (2005). "Idrologia applicata e ambientale". Roma. Casa Editrice Ambrosiana.

Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato e le Regioni e le Province Autonome - Accordo 12 dicembre 2002 (Linee guida per la tutela della qualità delle acque destinate al consumo umano e criteri generali per l'individuazione delle aree di salvaguardia

delle risorse idriche di cui all'art. 21 del Decreto Legislativo 11 maggio 1999, n. 152).

Consiglio regionale del Piemonte (Marzo 26, 1990). "*Legge regionale n. 13 del 26 marzo 1990 - Disciplina degli scarichi delle pubbliche fognature e degli scarichi civili (art. 14, legge 10 maggio 1976, n. 319)*". Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n. 14 del 04 Aprile 1990.

Consiglio regionale del Piemonte (Aprile 30, 1996). "*Legge regionale n. 22 del 30 aprile 1996 - Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee*". Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n. 19 del 08 Maggio 1996.

Consiglio regionale del Piemonte (Gennaio 20, 1997). "*Legge regionale n. 13 del 20 gennaio 1997 - Delimitazione degli ambiti territoriali ottimali per l'organizzazione del servizio idrico integrato e disciplina delle forme e dei modi di cooperazione tra gli Enti locali ai sensi della legge 5 gennaio 1994, n. 36 e successive modifiche ed integrazioni. Indirizzo e coordinamento dei soggetti istituzionali in materia di risorse idriche*". Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n.4 del 29 Gennaio 1997.

Consiglio regionale del Piemonte (Dicembre 29, 2000). "*Legge regionale n. 61 del 29 dicembre 2000 - Disposizioni per la prima attuazione del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152 in materia di tutela delle acque*". Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n. 1 del 03 Gennaio 2001.

Consiglio regionale del Piemonte (Dicembre 29, 2000). "*Legge regionale 7 aprile 2003, n. 6 - Disposizioni in materia di autorizzazione agli scarichi delle acque reflue domestiche e modifiche alla legge regionale 30 aprile 1996, n. 22 (Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee)*".

Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n. 15 del 10 Aprile 2003.

Consiglio regionale del Piemonte (Luglio 21, 2016). "*D.D. 21 luglio 2016, n. 268 - Aree di ricarica degli acquiferi profondi - attuazione del comma 4 dell'articolo 24 delle Norme del Piano di Tutela della Acque. Approvazione della metodologia utilizzata e della delimitazione a scala 1:250.000*". Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n.41 del 13 Ottobre 2016.

Consiglio regionale del Piemonte (Febbraio 2, 2018). "*Deliberazione della Giunta Regionale 2 febbraio 2018, n. 12-6441 - Aree di ricarica degli acquiferi profondi - Disciplina regionale ai sensi dell'articolo 24, comma 6 delle Norme di piano del Piano di Tutela delle Acque approvato con D.C.R. n. 117-10731 del 13 marzo 2017*". Pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione n.6 del 8 Febbraio 2018.

D

De Luca D. A., Masciocco L. (2016). "*Le aree di ricarica degli acquiferi profondi: criteri per l'identificazione e prima individuazione*". Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino.

Doveri M., Menichini M., Scozzari A. (Settembre 11, 2015). "*Protection of groundwater resources: worldwide regulations and scientific approaches*". Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

E

El-Naqa A., Al-Shayeb A. (Dicembre 9, 2008). "*Groundwater protection and management strategy in Jordan*". Springer Science + Business Media B.V. 2008. Water Resour Manage (2009) 23:2379–2394.

European Commission (Marzo 9, 2015). "*The Water Framework Directive (WFD) and the Floods Directive (FD): Actions towards the*

'good status' of EU water and to reduce flood risks". Bruxelles.

European Commission (Marzo 9, 2015). "Report on the progress in implementation of the Water Framework Directive Programmes of Measures". Bruxelles.

G

García García A., MartínezNavarrete C. (2003). "Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio". IGME, Madrid.

GarcíaGarcía A., Martínez Navarrete C. (2005). "Protection of groundwater intended for human consumption in the water framework directive: strategies and regulations applied in some European Countries". Atti Conv.: "Hydrogeological transboundary problems. West and East European Bridge". Polish Geological Institute Special Papers, 18 (2005): 28-32.

I

ISPRA (GdL) (Settembre 2014). "Reti di monitoraggio e Reporting Direttiva 2000/60/CE": Progettazione di reti e programmi di monitoraggio delle acque ai sensi del D. Lgs. 152/2006 e relativi decreti attuativi". Manuali e Linee Guida 116/2014. Roma.

L

Laurie M., Washington State Department of Ecology, Water Quality Program (Gennaio, 2005). "Critical aquifer recharge area guidance". Publication Number 05-10-028.

Lerner D. (1997). "Groundwater recharge. In d. C. Saether O.M., Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments". Rotterdam, AA Balkema, p. 110.

Leterme B., Mallants D. (Settembre, 2011). "Climate and land use change impacts on groundwater recharge". Germania.

N

Nel J., Xu Y., Batelaan O., Brendonck L. (Febbraio 24, 2009). "Benefit and implementation of groundwater protection zoning in South Africa". Springer Science + Business Media B.V. 2009. Water Resour Manage (2009) 23:2895–2911.

M

Mishra N., Khare D., Gupta K.K., Shukla R. (Aprile 21, 2014). "Impact of land use change on groundwater". Advances in Water Resource and Protection (AWRP), Vol. 2.

P

Pan Y., Gong H., Zhou D., Li X., Nakagoshi N. (2011). "Impact of land use change on groundwater recharge in Guishui River Basin, China". Chinese Geographical Science, 21(6): 734–743. doi: 10.1007/s11769-011-0508-7.

Patil S. G., Mohite N. M. (Febbraio, 2014). "Identification of groundwater recharge potential zones for a watershed using remote sensing and GIS". International Journal of Geomatics and Geosciences. Volume 4, No 3, 2014. ISSN 0976 - 4380

Pochon A., Tripet J., Kozel R., Meylan B., Sinreich M., Zwahlen F. (Agosto 22, 2008). "Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland". Springer-Verlag 2008. Hydrogeology Journal (2008) 16: 1267-1281.

Prestor J., Matoz H., Sušin J. (2008). "Implementation of new Rules on criteria for the designation of a water protection

zone in Slovenia". Workshop on the protection of groundwater as a source of drinking water in karst areas - Malinska, Island Krk (Croatia). 14-15th April 2008.

R

Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP (1998). *"Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna"*. A cura di G. Di Dio, S.EL.CA. (Firenze), p. 120.

Regione Lombardia, ENI-AGIP (2002). *"Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia"*. A cura di C. Carcano & A. Piccin, S.EL.CA. (Firenze).

Regione Piemonte (2018). *"Aree di ricarica degli acquiferi profondi - Disciplina regionale ai sensi dell'articolo 24, comma 6 delle Norme di piano del Piano di Tutela delle Acque approvato con D.C.R. n. 117-10731 del 13 marzo 2017"*. Piano di Tutela delle Acque.

Robins N. S., Chilton P. J., Cobbing J. E. (Dicembre 1, 2006). *"Adapting existing experience with aquifer vulnerability and groundwater protection for Africa"*. Journal of African Earth Sciences 47 (2007) 30–38.

Rwanga S. S. (Novembre, 2013). *"A review on groundwater recharge estimation using WetSpas model"*. International Conference on Civil and Environmental Engineering (CEE'2013) Nov. 27-28, 2013 Johannesburg, South Africa.

S

Scanlon B., Cook P., Healy R. (2002). *"Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge"*. Hydrogeology Journal, Vol. 10, N. 1.

Strobl R. O., Robillard P. D. (Febbraio 3, 2005). *"Comparison of U.S. and German*

wellhead protection approaches". Journal of Environmental Hydrology. Volume 13.

T

Toth J.A. (1963). *"A theoretical analysis of ground-water flow in small drainage basins"*. Journal of Geophysical Research, p. 4795-4811. Washington, DC: American Geophysical Union. Copyright 1963 by the American Geophysical Union.

U

U.S. EPA (1987). *"Guidelines for delineation of wellhead protection areas"*. Office of Groundwater Protection, US Environmental Protection Agency.

Usher BH, Pretorius JA, Dennis I, et al (2004). *"Identification and prioritization of groundwater contaminants and sources in South Africa's urban catchment"*. WRC report 1326/1/04. Water Research Commission, Pretoria.

W

Washington Dept. of Community Trade and Economic Development (Novembre, 2003). *"Critical areas assistance handbook - Protecting critical areas within the framework of the Washington Growth Management Act"*. Washington.

Risorse Web

A

ARPA Piemonte (Luglio 3, 2018). "Anfiteatro morenico". Pubblicato su Arpa.piemonte.it: <http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/glossario/anfiteatro-morenico>

ARPA Valle d'Aosta (Revisione Febbraio 10, 2016). "Cosa sono le acque sotterranee". Pubblicato su Arpa.vda.it: <http://www.arpa.vda.it/it/acqua/acque-sotterranee/cosa-sono-le-acque-sotterranee>

C

Civita M. (Febbraio, 2008). "L'assetto idrogeologico del territorio italiano: risorse e problematiche". Pubblicato su socgeol.it: <http://www.socgeol.it/files/download/Quaderni/Quaderno%203.pdf>

Consiglio federale svizzero (Aggiornamento Gennaio 1, 2017). "814.20 - Legge federale del 24 gennaio 1991 sulla protezione delle acque (LPAc)". Pubblicato su Admin.ch: <https://www.admin.ch/opc/it/classified-compilation/19910022/index.html>

Consiglio federale svizzero (Aggiornamento Gennaio 1, 2018). "814.201 - Ordinanza del 28 ottobre 1998 sulla protezione delle acque (OPAc)". Pubblicato su Admin.ch: <https://www.admin.ch/opc/it/classified-compilation/19983281/index.html#>

D

Disconzi F. (Maggio, 2018). "Digital Terrain Model". Pubblicato su Fabiodisconzi.com: <https://www.fabiodisconzi.com/gislocal/informazioni/19/index.html>

Department of the Environment and Local Government Environmental Protection Agency Geological Survey of Ireland

(Gennaio 1, 1999). "Groundwater protection schemes report". Pubblicato su Gsi.ie: <https://www.gsi.ie/en-ie/publications/Pages/Groundwater-Protection-Schemes.aspx>

E

Ecology Unit (Ottobre 25, 2017). "Groundwater source protection terminology used in Ireland". Pubblicato su Catchments.ie: <https://www.catchments.ie/groundwater-source-protection-terminology-used-ireland/#!>

Environmental Encyclopedia (Ottobre 25, 2017). "Recharge Zone". Pubblicato su Encyclopedia.com: <http://www.encyclopedia.com/environment/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/recharge-zone>

Eur-Lex (Ottobre 23, 2000). "Direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2000, che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque". Pubblicato su Eur-lex.europa.eu: <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/35/oj>

Eur-Lex (Aprile 21, 2004). "Direttiva 2004/35/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 aprile 2004, sulla responsabilità ambientale in materia di prevenzione e riparazione del danno ambientale". Pubblicato su Eur-lex.europa.eu: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>

European Commission (Revisione Giugno 20, 2016). "WFD Implementation report". Pubblicato su Ec.europa.eu: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/impl_reports.htm

European Commission (Revisione Ottobre 28, 2016). "Status of implementation of the WFD in the Member States". Pubblicato su Ec.europa.eu:

http://ec.europa.eu/environment/water/participation/map_mc/map.htm

G

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (Aggiornamento Novembre 12, 2014). "Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale". Pubblicato su Gazzettaufficiale.it:

http://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171

Giovanni F. (Revisione Novembre 26, 2013). "Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia". Pubblicato su Engeology.eu: www.engeology.eu

M

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. "Attuazione direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE". Pubblicato su Direttiva.acque.minambiente.it: <http://www.direttivaacque.minambiente.it/index.html>

Ministero della Salute (Ottobre, 2016). "Aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano". Pubblicato su Salute.gov.it: http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4237&area=acque_potabili&menu=acque

O

OFEFP - Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage(2003). "Guide pratique. Delimitation des zones de

protection des eaux souterraines en milieu fissure". OFEFP, Berne. Pubblicato su Admin.ch:

<http://www.admin.ch/buwal/publikat/f/>

R

Regione Piemonte (2018). "Normativa Acqua". Pubblicato su Regione.piemonte.it: http://www.regione.piemonte.it/ambiente/normativa/acqua_normativa.htm

Rispoli D. (Giugno, 2018). "Quota fasce altimetriche: pianura, collina, montagna". Pubblicato su Diegorispoli.it: www.diegorispoli.it/quota-fasce-altimetriche-pianura-collina-montagna.html

S

Scuola Agraria del Parco di Monza (Febbraio 21, 2013). "Le Fasce tampone: valenza paesaggistica e funzione ambientale". Pubblicato su Fritegotto.it: <http://www.fritegotto.it/News-Le-Fasce-tampone-valenza-paesaggistica-e-funzione-ambientale/>

T

The Environment Agency (Aprile 3, 2018). "Groundwater source protection zones". Pubblicato su Apps.environment-agency.gov.uk: <http://apps.environment-agency.gov.uk/wiyby/37833.aspx>

The Hidden Water (Giugno 18, 2010). "Artificial recharge of unconfined aquifer". Pubblicato su WordPress.com: <https://thehiddenwater.wordpress.com/>

U

Ufficio della protezione delle acque e dell'approvvigionamento idrico (2018). "Acqua: protezione e approvvigionamento. Zone di protezione". Pubblicato su Ti.ch:

<https://www4.ti.ch/dt/da/spaas/upaai/temi/acqua-protezione-e-provvigionamento/protezione-e-provvigionamento/acque-sotterranee/pianificazione-della-protezione-delle-acque-sotterranee/zone-di-protezione/>

Ufficio federale dell'ambiente UFAM (Versione Febbraio 2, 2015). "*Carte delle acque sotterranee e carte di protezione delle acque*". Pubblicato su Bafu.admin.ch: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/acque/stato/carte/grundwasser--und-gewaesserschutzkarten.html>

USGS - Science for a changing world:
<https://earthexplorer.usgs.gov>

W

WHYMAP network:

https://www.whymap.org/whymap/EN/Map_Applications/map_applications_node_en.html;jsessionid=EFD64B5334B24F0E5FD3C0FBCF58B679.1_cid292

Wikipedia, the free encyclopedia (Ottobre 24, 2017). "*Ground water recharge*". PubblicatosuEn.wikipedia.org:
https://en.wikipedia.org/wiki/Groundwater_recharge

RINGRAZIAMENTI

In primo luogo vorrei ringraziare la Professoressa Marina De Maio che mi ha concesso la possibilità di partecipare e contribuire alla realizzazione di questo importante progetto. Nell'ambito di questa fase iniziale ho appreso molte nozioni in merito agli argomenti trattati e all'utilizzo di programmi che, in un futuro lavoro nel settore, saranno essenziali.

Un ringraziamento speciale va a Simone Orioli che con estrema pazienza mi ha guidato nei vari steps operativi. Preziosi sono stati i suggerimenti e l'aiuto forniti per la realizzazione delle mappe e l'utilizzo dei programmi di elaborazione, oltre che per la stesura dell'elaborato finale.

Un doveroso ringraziamento va anche ad Ashwani che ha contribuito fornendo documenti utili alla prosecuzione del lavoro. Allo stesso modo ringrazio tutti i ricercatori e i dottorandi che hanno fornito supporto tecnico durante la fase di utilizzo dei software e di elaborazione.

Con questa Tesi si conclude anche la mia esperienza torinese. Vorrei ringraziare amici e colleghi che hanno contribuito a rendere meravigliosa questa esperienza. In particolare Manuel, Elena, Ivana, Andrea e Michela, con cui ho condiviso, fin da subito, esperienze dentro e fuori l'ambito universitario. Un ringraziamento va anche a tutti coloro che, nel loro piccolo, hanno lasciato un segno nel corso di questa avventura.

Ringrazio gli amici di Gallarate che, nonostante le distanze e la scarsità con cui ci siamo visti in questi anni, non hanno mai smesso di sostenermi.

Ringrazio Chiara, che nonostante le mille difficoltà di un rapporto a distanza, non ha mai smesso di sostenermi e di farmi sentire la sua vicinanza, sia nei momenti di gioia che di delusione.

In ultimo, ma non per importanza, un grazie a tutti i miei parenti. In particolare ringrazio i miei genitori e mia sorella che mi hanno sostenuto e supportato in ogni momento. A loro, che hanno reso possibile tutto questo, dedico questo mio lavoro conclusivo.