



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE**

**CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE**

**APPLICAZIONE DEL METODO SINTACS  
NELLA VALLE DEL CHIAMPO IN PROVINCIA DI VICENZA**

**Relatore:** Prof. Paolo Fabbri

**Laureando:** Tbaldo Davide  
2043358

Anno Accademico 2023/2024



## Sommario

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>I COMUNI DELLA VALLE DEL CHIAMPO .....</b>	<b>4</b>
IL TERRITORIO IN GENERALE .....	4
INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO.....	5
INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	5
ASSETTO GEOMORFOLOGICO .....	7
CLIMA .....	7
<b>IL METODO SINTACS .....</b>	<b>8</b>
GENERALITÀ E CENNI TEORICI .....	8
SOGGIACENZA.....	9
INFILTRAZIONE EFFICACE .....	11
EFFETTO DI AUTODEPURAZIONE DEL NON SATURO .....	15
TIPOLOGIA DELLA COPERTURA .....	18
CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL'ACQUIFERO .....	21
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA DELL'ACQUIFERO.....	23
ACCLIVITÀ DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA .....	25
DESCRIZIONE DELLE SITUAZIONI IDROGEOLOGICHE E DI IMPATTO .....	27
L'INDICE DI VULNERABILITÀ .....	29
PROCEDURA DI GEOREFERENZIAZIONE .....	30
CARTA DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA DELLA VALLE DEL CHIAMPO .....	30
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>33</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>34</b>

## INTRODUZIONE

Le riserve d'acqua sotterranea, che si trovano nelle falde acquifere, sono di importanza cruciale perché rappresentano la fonte principale d'acqua potabile per uso civile, oltre ad essere necessarie per l'uso agricolo e industriale. La loro tutela, sia in termini di quantità che di qualità, è fondamentale per promuovere uno sviluppo ambientale sostenibile.

Le attività umane possono avere effetti dannosi sulle condizioni qualitative delle falde acquifere perché possono provocare inquinamento idrico. Questo riguarda l'immissione di sostanze che, finendo all'interno delle acque sotterranee, ne determinano un peggioramento delle qualità chimico e/o fisiche. Le cause di questi peggioramenti sono: la dispersione di fanghi e acque reflue, l'uso di fertilizzanti chimici e pesticidi, il deflusso delle acque piovane da aree urbanizzate, la presenza di serbatoi di idrocarburi, le attività di cava, le intrusioni saline, la mala gestione dei rifiuti, lo stoccaggio di sostanze chimiche e ulteriori attività industriali e agricole. La qualità delle falde acquifere può essere scadente anche per motivi naturali a conseguenza di processi geologici e geochimici come la dissoluzione di minerali, lo scambio ionico, il mescolamento con acque saline, l'evaporazione e la concentrazione di soluti.

Nella Pianura Padana, l'uso intensivo delle risorse idriche e l'uso estensivo dei pozzi di estrazione hanno causato una serie di problematiche che si ripercuotono sulle falde: la scomparsa o la riduzione delle zone umide, la diminuzione delle portate dei fiumi di risorgiva, la diminuzione della pressione nelle falde artesiane e la subsidenza delle aree costiere e lagunari del Veneto. Questi sono segnali evidenti di uno sfruttamento non sostenibile delle risorse idriche sotterranee.

Per far fronte a questi problemi, è necessario adottare politiche e pratiche di gestione delle risorse idriche che promuovano un uso responsabile e sostenibile delle falde acquifere.

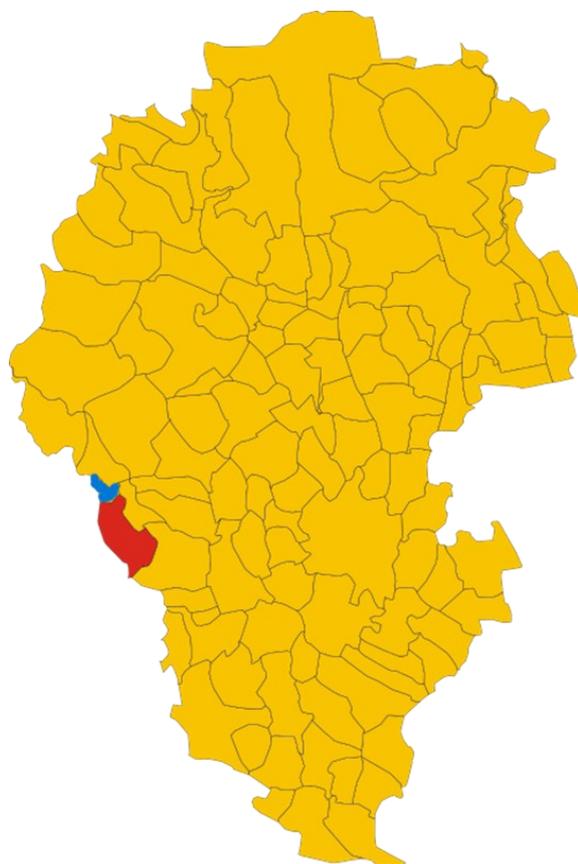
Lo studio da me effettuato offre un'analisi dettagliata dell'acquifero dei comuni della valle del Chiampo (VI), attraverso l'utilizzo del metodo SINTACS. L'obiettivo è quello di fornire un esempio concreto di valutazione della vulnerabilità dell'acquifero a potenziali fonti di inquinamento, contribuendo così alla promozione di politiche di gestione sostenibile delle risorse idriche a livello locale e nazionale.

L'elaborato si sviluppa in due macro argomenti: il primo riguarda la descrizione fisica, topografica e geologica della zona considerata per lo studio; il secondo, invece, spiega l'applicazione del metodo SINTACS nella Valle del Chiampo nelle sue varie declinazioni.

## I COMUNI DELLA VALLE DEL CHIAMPO

### IL TERRITORIO IN GENERALE

Il territorio della valle del Chiampo comprende i comuni di Altissimo, Crespadoro, Nogarole Vicentino, San Pietro Mussolino e Chiampo. Per motivi pratici, nella costruzione della carta della vulnerabilità degli acquiferi terreno in considerazione solamente l'area di fondovalle dei comuni di Chiampo e di San Pietro Mussolino, in quanto di queste zone si possiedono tutti i dati necessari e, inoltre sono le zone maggiormente interessate dalla presenza di abitazioni ed industrie che potrebbero essere fonte di inquinamento di un acquifero. I comuni di Chiampo e San Pietro Mussolino hanno un'estensione totale di 26,82 km<sup>2</sup>. Collocati nella parte Est della provincia di Vicenza, oltre che a confinare tra di loro confinano entrambi con la provincia di Verona e con i comuni di Altissimo, Nogarole Vicentino, Arzignano e Roncà. L'abitato e l'industria, dunque, si concentrano prevalentemente nella zona di valle e, in particolare, nell'area del comune di Chiampo.<sup>1</sup>



*Figura 1: posizione di San Pietro Mussolino e Chiampo all'interno della provincia di Vicenza*

---

<sup>1</sup> C. Mastella, Relazione di Valutazione di Incidenza Ambientale PATI del comune di Chiampo, Vicenza, 2015

## INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO

I comuni di Chiampo e San Pietro Mussolino si trovano lungo il margine orientale dei Monti Lessini e nella parte mediana della Valle del Chiampo che corre in direzione Nord-Sud in provincia di Vicenza, dove scorre l'omonimo fiume. Si trovano ad una quota media di circa 370 metri s.l.m., racchiudendo i 250 metri s.l.m. del fondovalle nel comune di S. Pietro Mussolino per poi scendere con una pendenza media tra l'1 % ed il 5 % seguendo il decorso della valle fino a raggiungere la quota minima a Chiampo di 150 metri s.l.m. Il territorio si può suddividere in due zone: l'Alta e la Bassa Valle. La prima ha caratteristiche tipicamente montane, molto stretta, impervia e con una densità di popolazione piuttosto bassa; in questa zona, le attività più diffuse sono l'estrazione e la lavorazione del marmo e la piscicoltura. L'area meridionale, invece, si apre sulla pianura alluvionale, qui batte il cuore industriale della Valle dove la principale attività economica è la concia delle pelli ed il territorio è fortemente popolato. Queste principali attività sono legate fortemente al territorio ed alla sua morfologia ed entrambe necessitano di una presenza costante di acqua.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La Valle del Chiampo, situata nella provincia di Vicenza, nel Veneto, si è formata attraverso un processo geologico complesso accompagnato dall'azione dell'acqua. La stratigrafia dei monti Lessini e dell'area considerata per lo studio è dominata da una successione di unità dolomitiche e calcaree che rappresentano l'evoluzione della Piattaforma di Trento, il suo smembramento giurassico e la sua successiva riesumazione con la formazione della Piattaforma dei Lessini. L'unità affiorante più antica è la Dolomia Principale che, assieme al Gruppo dei Calcari Grigi di Noriglio, indica l'ambiente di acque basse che dominava la Piattaforma dal Carnico superiore al Pliensbachiano, come testimoniano i numerosi fossili marini rinvenuti nei calcari, tra cui nummuliti e coralli. Le Formazioni di Tenno e dell'Oolite di San Vigilio sono, invece, la testimonianza di un ambiente di sedimentazione poco più profondo, dominato da barre oolitiche nel Toarciano-Aaleniano. Nella piattaforma dei Lessini si trova depositato in un ambiente marino profondo anche il Rosso Ammonitico Veronese (non presente nell'area di studio) a seguito dell'annegamento della Piattaforma di Trento che inizia nel Giurassico medio; tale ambiente domina questo tratto di Sudalpino per tutto il Cretacico fino al Paleocene, come testimoniano le Formazioni della Maiolica, della Scaglia Variegata Alpina e della Scaglia Rossa. Con il Calcare di Torbole e il Calcare di Nago si ritorna ad avere un ambiente pelagico poco profondo; infine, in seguito alla fase compressiva nel Neogene, vi è l'emersione dei monti Lessini con la cessazione della deposizione di sedimenti calcarei marini.<sup>2</sup> La formazione della Valle del Chiampo si è ultimata tramite l'azione dell'acqua con fenomeni di erosione verticale, laterale e deposito di materiale alluvionale. I depositi alluvionali nel fondovalle sono generalmente di dimensioni medio/fine con prevalenza di materiali limosi, argillosi e sabbiosi, mentre le rocce calcaree sono spesso di tipo nummulitico, particolarmente resistenti all'erosione. La forma della valle è influenzata anche dalla presenza di queste rocce calcaree che, essendo particolarmente resistenti all'erosione, hanno avuto un ruolo chiave nella morfologia tendendo a formare rilievi e pareti più ripide. Nelle zone più elevate sono presenti le dolomie, che derivano da processi di dolomitizzazione di calcari preesistenti e conferiscono ai versanti un aspetto aspro e accidentato; le marne, invece, si trovano intercalate tra i livelli calcarei e rappresentano livelli più facilmente erodibili, favorendo l'instaurarsi di depressioni e valli secondarie. La presenza di questa sequenza stratigrafica complessa riflette i cicli di sedimentazione elencati in precedenza, legati alle variazioni del livello del mare e ai cambiamenti climatici durante le varie ere geologiche. Oltre a ciò, la Valchiampo presenta forme dovute alla fase vulcanica eocenica-oligocenica che ha interessato maggiormente la zona orientale dei Monti Lessini; si riconoscono, infatti, numerosi rilievi dalla forma sub-conica riconducibili a rilievi di neck vulcanico, ovvero i condotti alimentatori di colate che l'erosione superficiale ha messo in luce

---

<sup>2</sup> C. Mastella, *Relazione geologica PATI del comune di Chiampo*, Vicenza, 2014

attraverso la formazione di cime isolate dalla forma piramidale-tondeggiante. Questo tipo di struttura si presenta come un rigonfiamento roccioso e generalmente cilindrico, con un nucleo di roccia ignea intrusiva circondato da strati di lava solidificata; ne sono esempio il monte Madarosa a Chiampo, il monte Postale di Altissimo e la Purga di Durlo.<sup>3</sup>

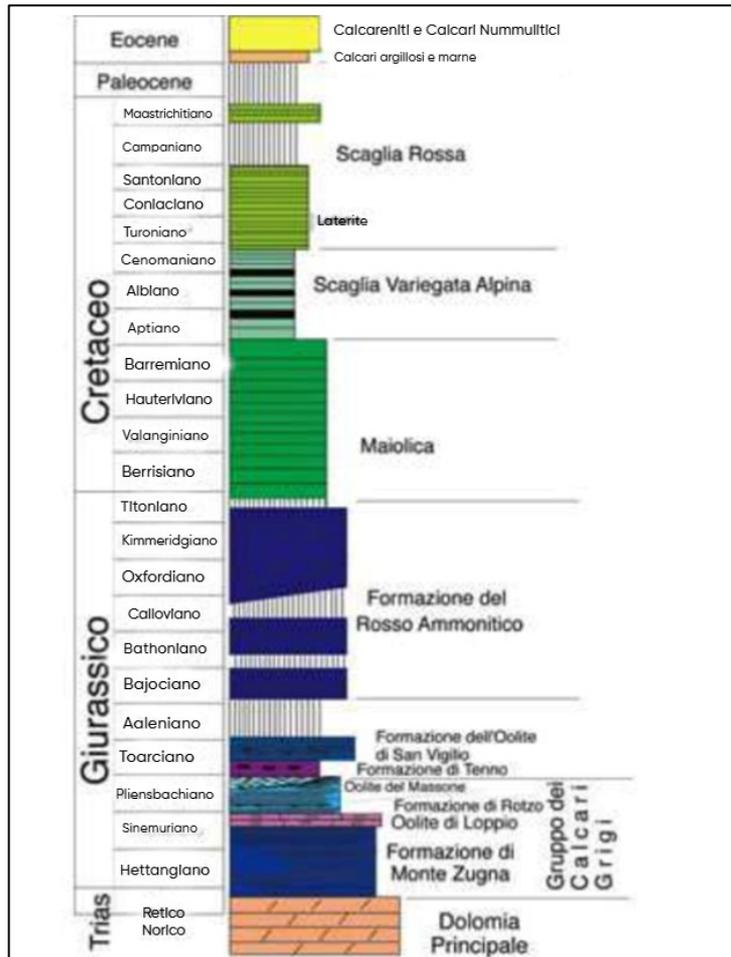


Figura 2: Colonna cronostatigrafica delle Formazioni dei Monti Lessini e della Piattaforma di Trento (da ROGHI & ROMANO, 2009).

<sup>3</sup> C. Mastella, *Relazione geologica PATI del comune di Chiampo*, Vicenza, 2014

## ASSETTO GEOMORFOLOGICO

Gli agenti morfogenetici che hanno modellato maggiormente l'area di studio sono essenzialmente due:

1. La gravità
2. Le acque superficiali

Oltre a questi il paesaggio è condizionato dalla struttura geologica del substrato presente come detto in precedenza.

1. La gravità rappresenta sicuramente uno degli agenti morfogenetici più impattanti nella Valle del Chiampo, ciò è dovuto alle caratteristiche geologiche delle coperture eluvio-colluviali e delle coltri di alterazione che ricoprono buona parte del substrato roccioso vulcanico che compone la bassa Valchiampo; questo materiale, principalmente costituito da argilla e sabbia, favorisce l'insorgere di fenomeni franosi sui versanti della valle. Le frane presenti sono in prevalenza colate o scivolamenti rotazionali; ci sono poi frane di crollo ma concentrate principalmente nella parte più alta della vallata dove le litologie calcaree formano delle scarpate. Infine un altro substrato sul quale si instaurano fenomeni gravitativi è quello costituito dal detrito grossolano di discarica delle cave attive e non attive.<sup>4</sup>
2. Un altro agente che ha formato la valle è l'azione delle acque superficiali, le quali hanno generato una valle abbastanza stretta grazie al torrente Chiampo; su di essa confluiscono anche diverse vallecole a V generate dai vari piccoli torrenti che poi confluiscono nel Chiampo. Vi è dunque presente nell'area collinare limitrofa alla valle un'estesa rete di torrenti secondari che fungono da "scolo"; ciò è dovuto alla natura poco permeabile del substrato roccioso basaltico, associata comunque ad un buon grado di fessurazione favorisce una lenta percolazione d'acqua. Questi stessi torrenti secondari hanno generato forme fluviali di deposizione nella Val Chiampo, che includono i numerosi coni alluvionali situati ai piedi dei versanti, con pendenze che variano dal 2% al 10%.<sup>5</sup>

## CLIMA

La Valle del Chiampo presenta un clima continentale caratterizzato da estati calde con temperature massime che superano i 30°C ed inverni rigidi, durante i quali la temperatura massima media è inferiore ai 9°C. Analizzando i dati del periodo dal 2008 al 2023 forniti dalla stazione meteorologica di Chiampo è possibile notare come la media annua delle precipitazioni equivalga a 1312 mm<sup>6</sup>, con andamento crescente da Sud a Nord della Valle. Il regime pluviometrico ha i suoi minimi durante la stagione invernale e tra i mesi estivi più caldi, mentre i due massimi corrispondono alle stagioni primaverile (Maggio/Giugno) e autunnale (Ottobre/Novembre).<sup>7</sup>

---

<sup>4</sup> C. Mastella, *Relazione geologica PATI del comune di Chiampo*, Vicenza, 2014

<sup>5</sup> C. Mastella, *Relazione geologica PATI del comune di Chiampo*, Vicenza, 2014

<sup>6</sup> ARPAV, [ARPAV - Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto](#)

<sup>7</sup> C. Mastella, *Relazione valutazione di incidenza ambientale PATI del comune di Chiampo*, Vicenza, 2015

# IL METODO SINTACS

## GENERALITÀ E CENNI TEORICI

Il metodo SINTACS è stato ideato in Italia negli anni '90 da Massimo Civita e Marina De Maio, con l'obiettivo di adattare le metodologie di valutazione della vulnerabilità degli acquiferi alle specifiche condizioni idrogeologiche italiane. In particolare, SINTACS nasce come una versione modificata e adattata del metodo DRASTIC, un sistema di valutazione sviluppato negli Stati Uniti, che non sempre si adattava bene alle realtà geologiche e climatiche europee e, nello specifico, italiane, inoltre viene introdotto il concetto di pesi che sono inerenti al nostro territorio<sup>8</sup>. La vulnerabilità intrinseca e naturale degli acquiferi si definisce come la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido od idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea nello spazio e nel tempo.

La vulnerabilità di un corpo idrico sotterraneo è funzione di diversi parametri, tra i quali prevalgono la litologia, la struttura e la geometria del sistema idrogeologico, la natura del suolo e la geometria della copertura, il processo di ricarica-discardica del sistema ed i processi di interazione di eventuali inquinanti che penetrano il sistema.<sup>9</sup>

“SINTACS” è un acronimo che deriva dai sette parametri utilizzati nel metodo, ovvero:

- Soggiacenza
- Infiltrazione efficace
- Effetto di autodepurazione del Non saturo
- Tipologia della copertura
- Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero
- Conducibilità idraulica dell'acquifero
- Acclività della Superficie topografica

Per utilizzare tale metodo bisogna prima suddividere il territorio in esame in una griglia composta da Elementi Finiti Quadrati (EFQ), il cui lato solitamente corrisponde a 0,5 km, ma che dipende da tre fattori:

- Densità dei punti di rilevamento per unità di superficie
- Numero di informazioni ottenibili per ciascun punto
- Denominatore di scala alla quale si intende realizzare la Carta finale

Nello studio da me effettuato la griglia è formata da 59 righe e 41 colonne con EFQ aventi 120 metri di lato. Una volta costruita questa griglia ad ogni cella verrà assegnato un valore da 1 a 10 per ognuno dei sette parametri sopra citati, sulla base della loro influenza nella valutazione complessiva finale; quindi un valore prossimo a 10 sarà un valore che aumenterà la vulnerabilità intrinseca totale. Poi ogni punteggio di ciascun parametro viene moltiplicato per delle stringhe di pesi, scelte in funzione del territorio e delle situazioni idrogeologiche presenti, in modo da esaltare l'importanza di alcuni parametri rispetto ad altri; infine i valori ricavati di tutti i parametri sono sommati per ottenere un punteggio di vulnerabilità intrinseca totale.

In questo studio i dati sono stati ottenuti tramite elaborazione di: carta idrogeologica, litologica, geomorfologica, isoipse presenti nel Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (PATI) fornitomi dal Comune di Chiampo e dalla Carta dei suoli veneti dell'ARPAV.

---

<sup>8</sup> Appunti e dispense di lezione del corso “Elementi di idrogeologia” tenuto dal Prof. Paolo Fabbri

<sup>9</sup> Civita, M.; De Maio, M. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, pagina 7, (2000)

## SOGGIACENZA

La soggiacenza è un parametro molto importante nel metodo SINTACS ed è definita come la profondità della superficie piezometrica misurata rispetto al piano campagna<sup>10</sup>. Misura, dunque, la profondità alla quale si trova la falda nel sottosuolo. La soggiacenza influenza molto la vulnerabilità intrinseca in quanto da essa dipende il tempo di transito di un qualsiasi inquinante dalla zona dell'insaturo, dove avvengono svariate azioni auto depurative, alla falda, tali processi sono illustrati in figura . Il punteggio relativo alla soggiacenza aumenta al diminuire della profondità della falda, questo perché essendo prossima alla superficie sarà facilmente raggiungibile da inquinanti, di conseguenza più vulnerabile.

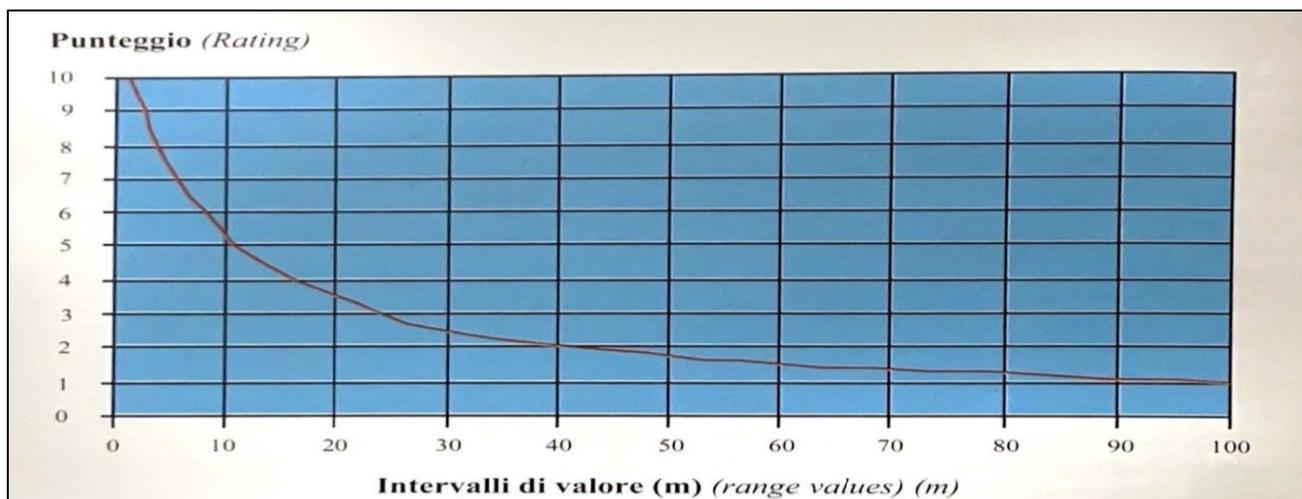


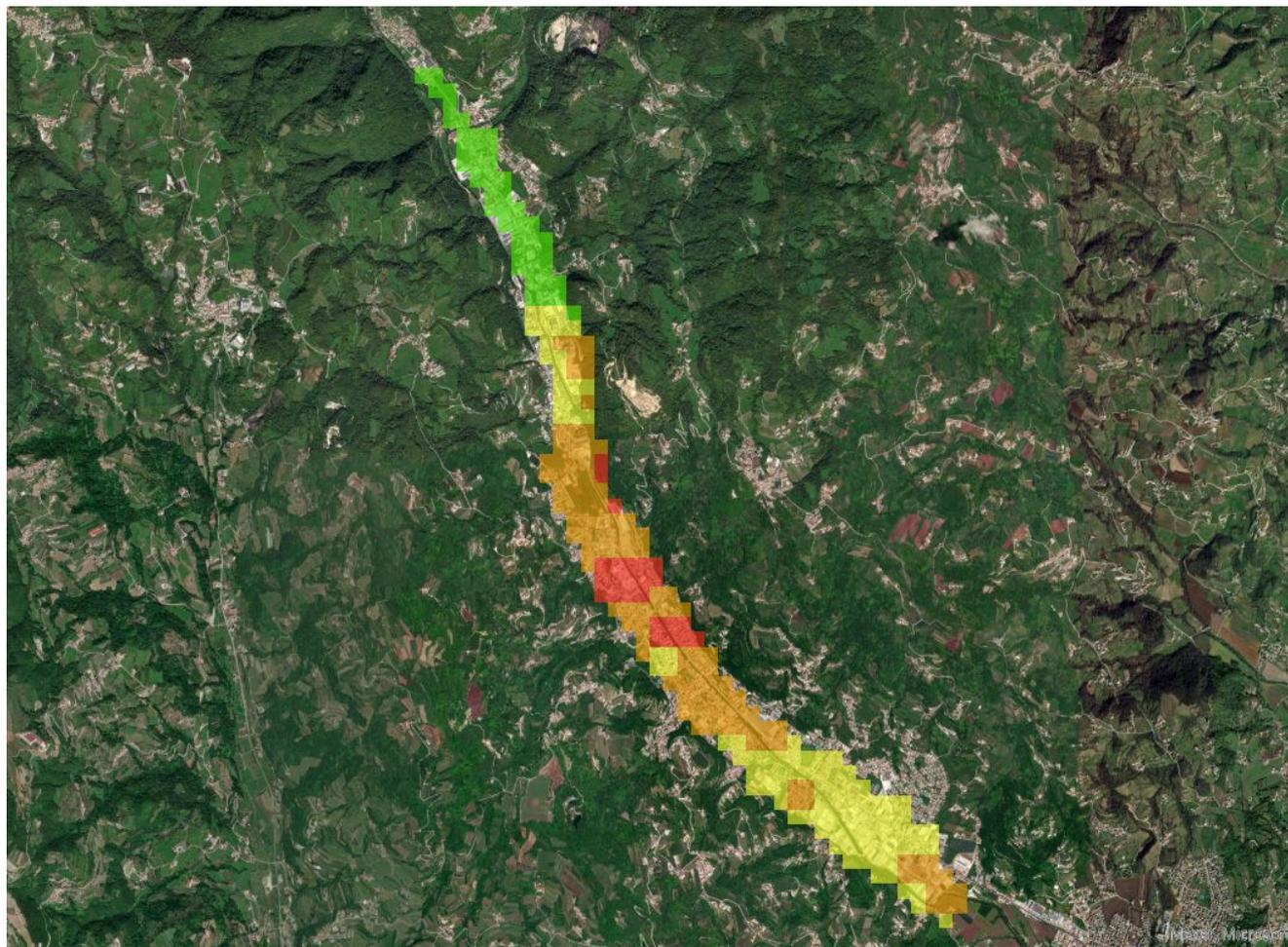
Figura 3: Valori di soggiacenza e relativi punteggi.

Per poter ricavare la soggiacenza del territorio in esame mi sono servito della carta idrogeologica e ho assegnato i rispettivi valori utilizzando il grafico soprastante. Nell'acquifero della Valle del Champo la profondità della falda è elevata nella zona Nord in corrispondenza di S. Pietro Mussolino, mentre scendendo verso Sud la profondità di falda diminuisce arrivando anche a valori inferiori ai due metri in alcune zone. Dal grafico di figura 4 ho ricavato gli intervalli per l'assegnazione dei valori:

Intervallo di Soggiacenza (m)	Punteggio SINTACS
$0 \leq S \leq 2$	10
$2 \leq S \leq 5$	8
$5 \leq S \leq 10$	6
$S > 10$	4

<sup>10</sup> Civita, M.; De Maio, M. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, pg 11, (2000)

# SOGGIACENZA



## INFILTRAZIONE EFFICACE

L'infiltrazione efficace, ossia la porzione di acqua piovana che penetra nel sottosuolo e alimenta la falda, è cruciale nella valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Questo processo non solo permette agli inquinanti di raggiungere profondità maggiori, ma contribuisce anche a diluirli prima nella zona insatura e successivamente nella zona di saturazione, riducendo potenzialmente il loro impatto negativo. Ci sono diversi metodi di valutazione del parametro, come nel caso fossimo in presenza di un acquifero confinato dove spesso l'infiltrazione efficace è nulla, nel nostro caso l'acquifero è libero ed utilizzeremo quindi la procedura apposita che sarà successivamente spiegata. Il valore dell'infiltrazione efficace si ricava partendo dalla tessitura dei suoli nel caso di suoli potenti, mentre in presenza di rocce nude o poco coperte si usa il grafico per i complessi idrogeologici. Nel nostro caso siamo in presenza di suoli potenti e per il calcolo dell'infiltrazione si procede utilizzando la formula:

$$I = P \cdot \chi$$

**I:** infiltrazione media annua (mm/anno)

**P:** precipitazioni medie annue (mm/anno)

**$\chi$ :** indice d'infiltrazione

L'indice d'infiltrazione ( $\chi$ ) si ricava dal tipo di tessitura superficiale del suolo come illustrato in figura 4

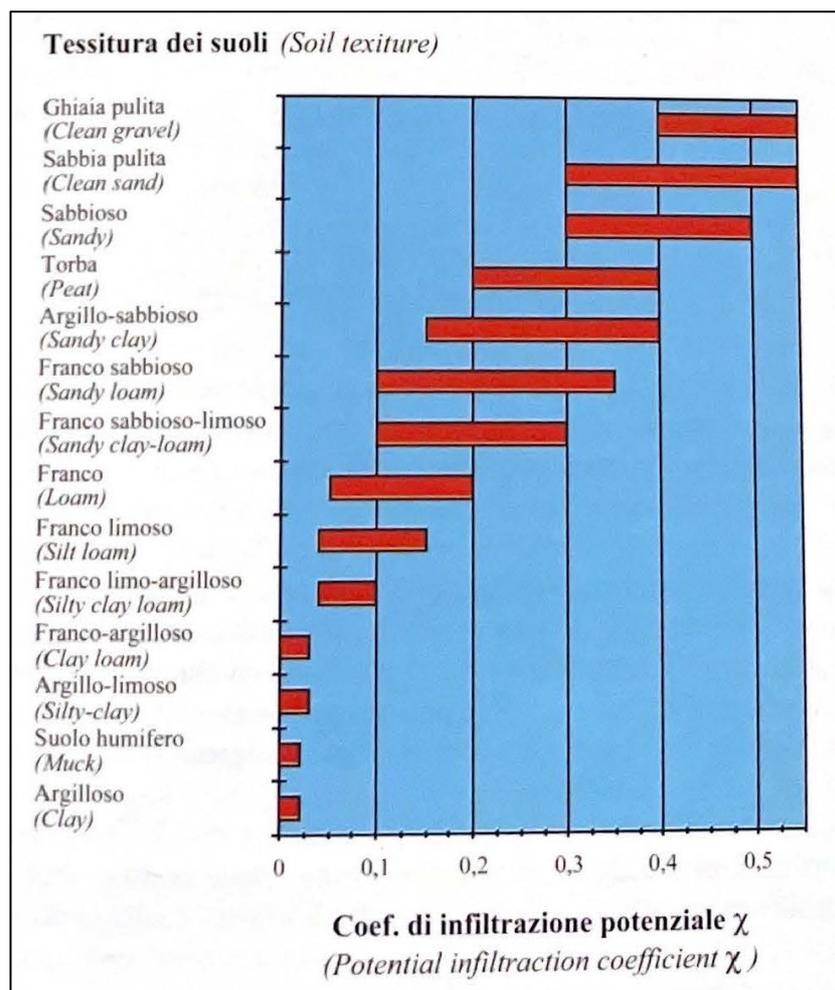


Figura 4: Grafico per la valutazione di  $\chi$  nel caso di suoli spessi.

La tessitura è stata determinata utilizzando le carte dei suoli ARPAV a scala 1:50.000. Il territorio è suddiviso in due aree: la prima include la zona di fondovalle, con suoli prevalentemente argillosi e franco sabbiosi-limosi presenti in egual misura, composti da materiali fini e ghiaiosi con apporti colluviali basaltici. Per questi suoli, si utilizzerà una media dei valori dei due suoli (1). La seconda area comprende superfici colluviali e corpi di frana, costituiti principalmente da argille, limi e sabbie di origine basaltica, con suoli prevalentemente franco-argillosi (2). Le precipitazioni sono state calcolate dai dati ARPAV dalla stazione meteorologica di Chiampo sulla media del periodo 2008/2023 e corrispondono a 1312 mm/a.

Applicando dunque la formula sopra citata per ogni EFQ:

$$I_1 = 1312 \cdot 0,1065 = 140 \text{ mm/a}$$

$$I_2 = 1312 \cdot 0,025 = 32,8 \text{ mm/a}$$

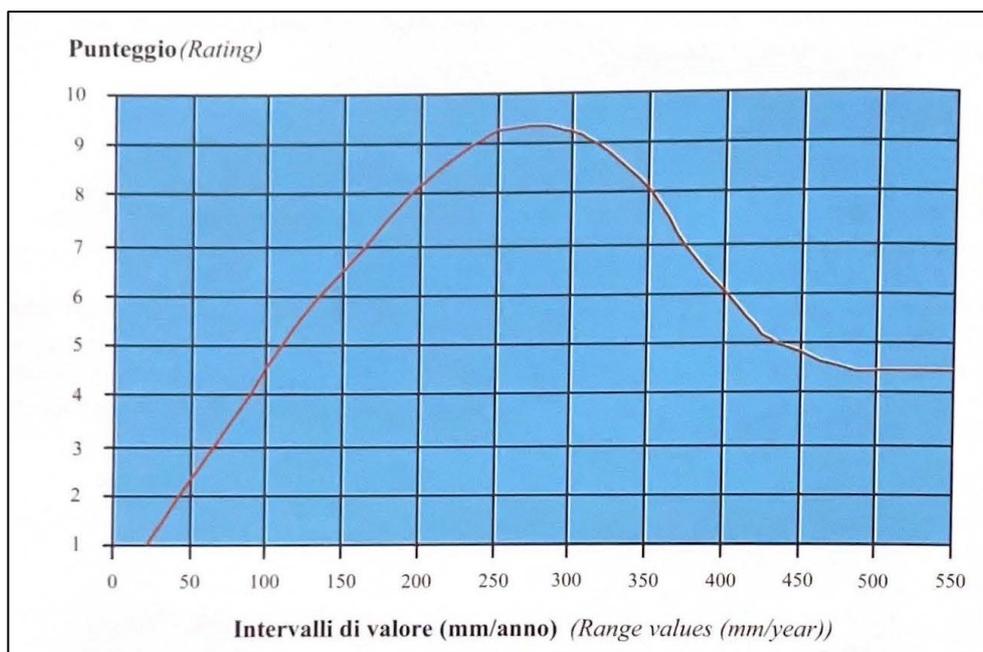
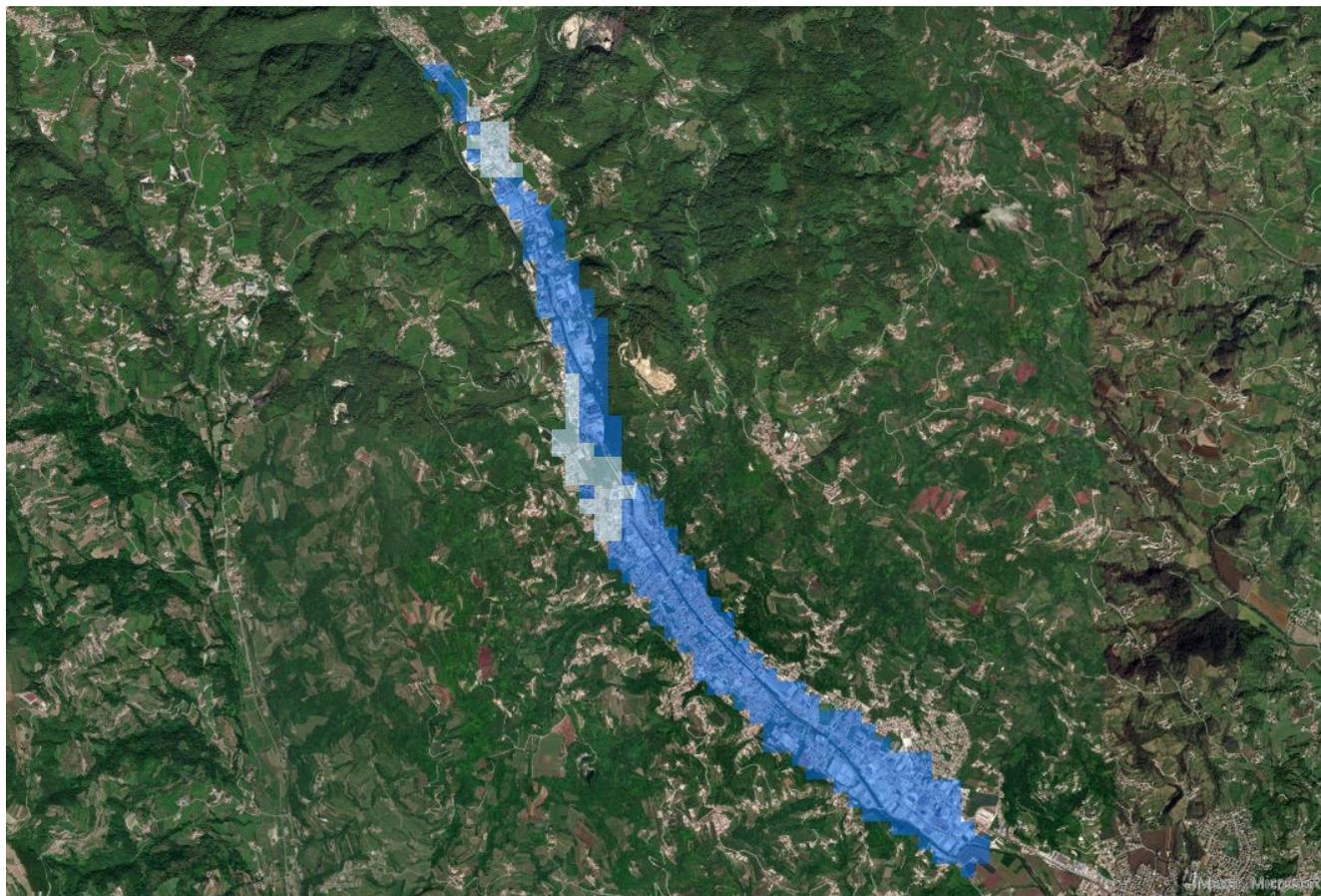


Figura 5: Valori dell'infiltrazione e relativi punteggi.

Partendo da i valori di infiltrazione ottenuti sopra, utilizzando il grafico di figura 5, sono stati ricavati i seguenti punteggi SINTACS presenti in tabella dove notiamo delle sensibili differenze sulla base della tessitura dei suoli descritti prima; come possiamo infatti notare nella zona di S. Pietro Mussolino e in una zona a Nord di Chiampo dove sono presenti principalmente suoli franco-argillosi l'infiltrazione è minore e dunque anche il relativo punteggio assegnato, mentre nel resto della Valle si ha un valore di infiltrazione maggiore.

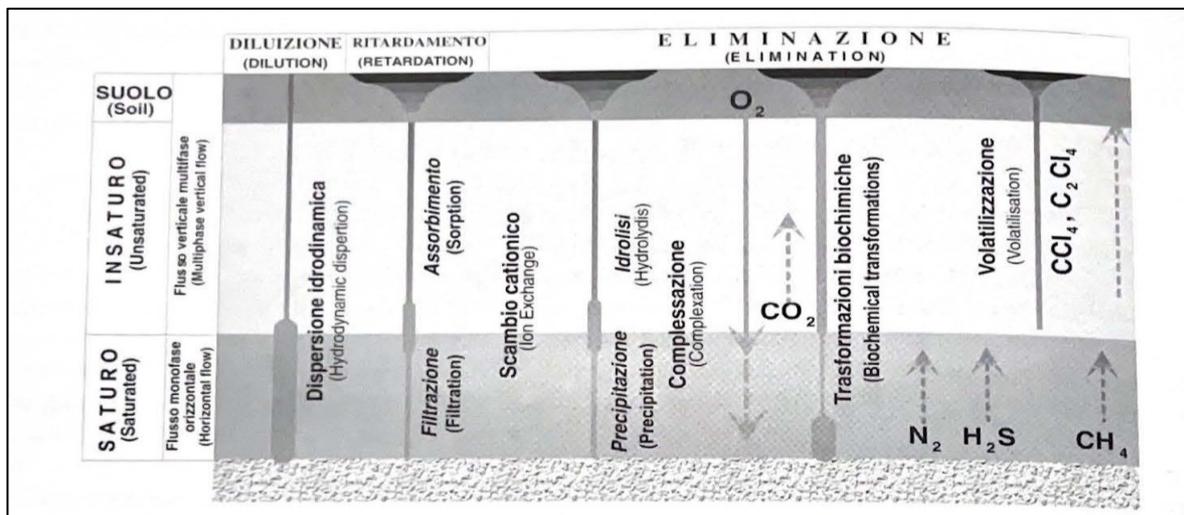
Valore di infiltrazione (mm/a)	Punteggio SINTACS
32,8	1
140	6

## INFILTRAZIONE EFFICACE



## EFFETTO DI AUTODEPURAZIONE DEL NON SATURO

La zona insatura è la parte di sottosuolo compresa tra la base del suolo e la zona saturata dell'acquifero. Tale zona, ove avvengono spostamenti prevalentemente verticali dell'acqua sotterranea, è dunque limitata verso il basso dalla superficie piezometrica di un acquifero libero. Come rappresentato nell'immagine sottostante.



e

Figura 6: Il sistema idrogeologico e i principali processi che causano l'attenuazione degli inquinanti.

l'insaturo rappresenta una linea di difesa dell'acquifero dagli inquinanti, dove fattori chimici e fisici operano in sinergia favorendo processi di attenuazione. Tra questi, troviamo la filtrazione e la dispersione che dipendono dalla granulometria e dallo spessore; la reattività chimica dei minerali componenti che influenza scambio cationico, reazioni acido-base e adsorbimento; i processi di biodegradazione e volatilizzazione che dipendono dallo spessore dell'insaturo.<sup>11</sup>

Il valore SINTACS dell'effetto di autodepurazione del non saturo si ricava dalla tabella sottostante in base ai complessi idrogeologici individuati, grazie alla carta litologica presente nel PATI.

<sup>11</sup> Civita, M.; De Maio, M. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, pg. 17, (2000)

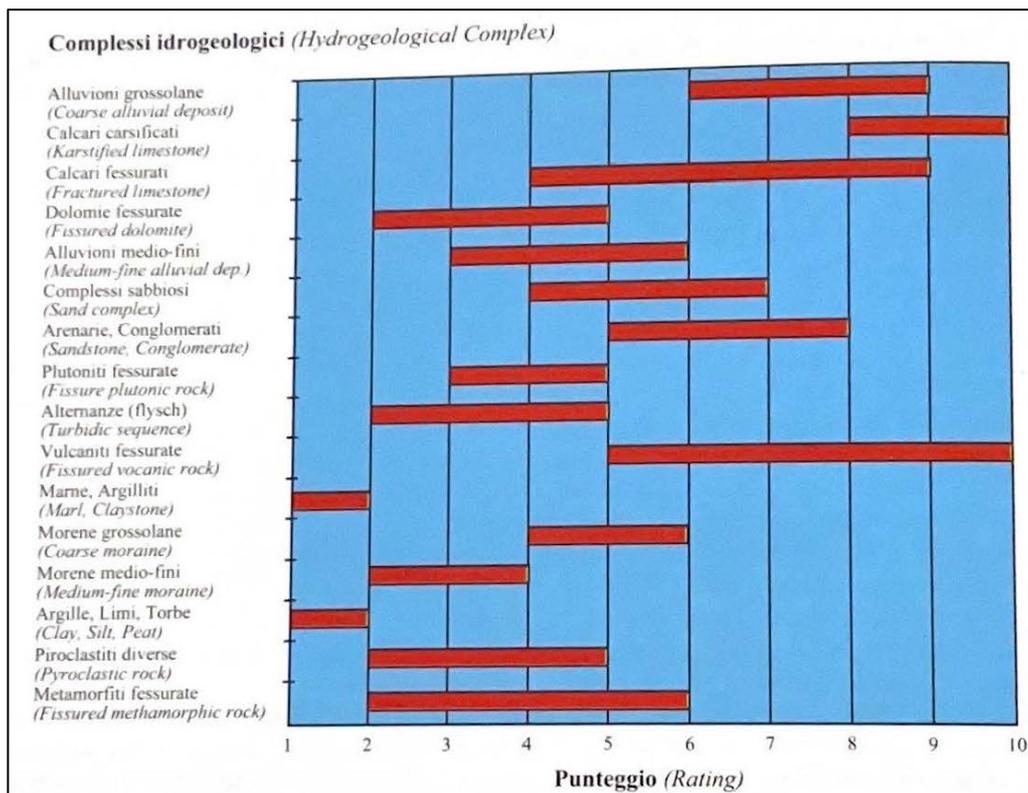


Figura 7: Azione di mitigazione delle rocce componenti l'insaturo e relativi punteggi.

Nel caso della Valle del Chiampo l'insaturo ricade nella categoria delle alluvioni medio-fine, dove si trovano materiali a tessitura eterogenea dei depositi di conoide di deiezione torrentizia ai quali è stato assegnato un valore di 8 e materiali sciolti di alveo fluviale recente stabilizzati dalla vegetazione con un valore pari a 7. Il punteggio in questo caso è più basso perché in queste aree grazie alla stabilizzazione da parte delle radici e la loro granulometria più omogenea aumenta l'azione di autodepurazione, come viene indicato in tabella.

Complessi idrogeologici	Punteggio SINTACS
Alluvioni medio-fine	7
Alluvioni medie	8

## EFFETTO DI AUTODEPURAZIONE DEL NON SATURO



## TIPOLOGIA DELLA COPERTURA

La tipologia dei terreni di copertura e dei suoli riveste un ruolo di primaria importanza nella mitigazione dell'impatto degli inquinanti e nella valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi e, di conseguenza, nella stesura della moderne carte di vulnerabilità.<sup>12</sup>

Questo parametro si riferisce alla natura granulometrica e strutturale dei primi metri di terreno, cioè la parte insatura; il suolo viene indicato come un sistema trifase (solido, liquido, gas), una formazione naturale di spessore variabile, derivante dalla disgregazione fisica, dalla decomposizione chimica e biologica della roccia madre (substrato pedogenetico) e dei residui vegetali e animali.

Il ruolo protettivo del suolo è determinato principalmente da tre fattori:

- **Permeabilità:** rappresenta la velocità con cui l'acqua attraversa il suolo. Viene influenzata dalla granulometria del suolo, ovvero dalla dimensione delle particelle che lo compongono (argilla, limo, sabbia fine, sabbia grossa). I suoli più permeabili (come sabbie e ghiaie) lasciano passare l'acqua più velocemente, riducendo la capacità del terreno di trattenere eventuali contaminanti.
- **Capacità di adsorbimento:** dipende dal pH, capacità di scambio cationico, contenuto di sostanza organica e di argilla. Suoli argillosi o limosi hanno una maggiore capacità di adsorbire particelle inquinanti grazie alle cariche negative presenti sulla superficie delle particelle di argilla e alla superficie specifica.
- **Porosità:** determinata dalla tessitura del suolo, che descrive la combinazione di particelle di diversa dimensione (sabbia, limo, argilla). Suoli con tessitura fine, come le argille, hanno pori piccoli e stretti che rallentano l'infiltrazione. Al contrario, suoli sabbiosi o ghiaiosi hanno pori più grandi che consentono un rapido passaggio dell'acqua e degli inquinanti.

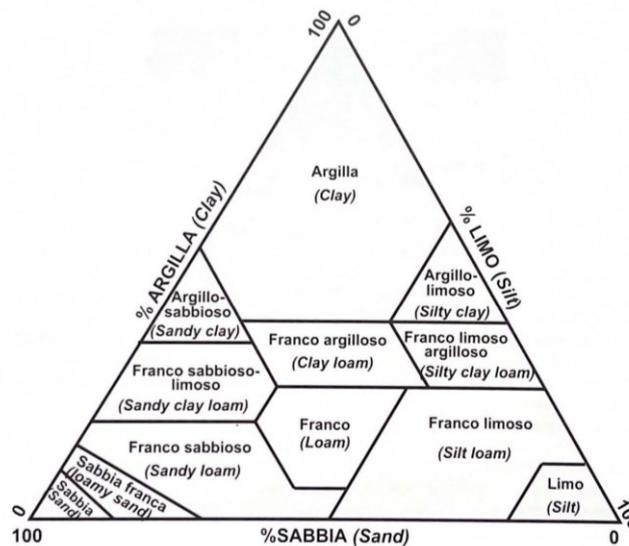


Figura 8: Diagramma triangolare per la classificazione tessiturale del suolo.

Facendo riferimento ai parametri descritti sopra sono stati quantificati gli intervalli di punteggio SINTACS come presentati in figura 9.

<sup>12</sup> Ivi, pg. 120, (2000)

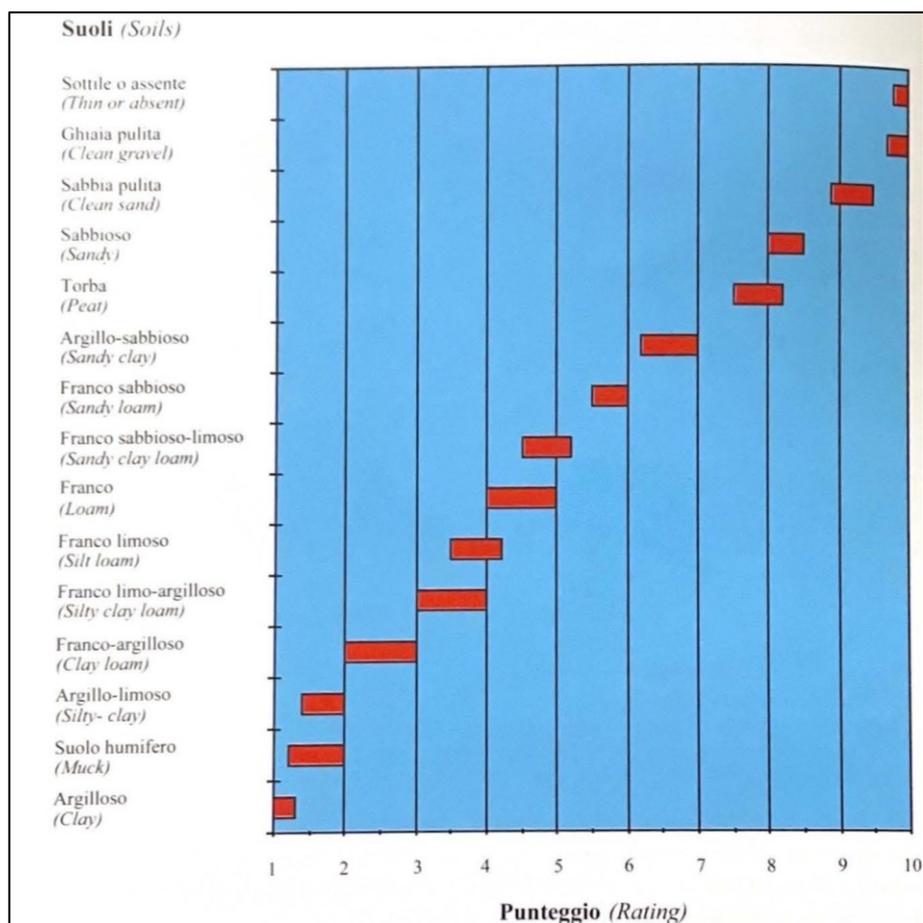


Figura 9: Caratteristiche tessiturali dei suoli e relativi punteggi per la valutazione dell'azione di mitigazione degli inquinanti.

Utilizzando la carta dei suoli in scala 1:50.000 fornita dall' ARPAV ho riconosciuto due zone principali: la prima comprende tutta la zona di pianura del fondovalle, costituita da materiale fino su ghiaia; in questa zona sono però presenti due tipologie di suolo in egual misura, ovvero una zona di suolo *argilloso* ed una zona *franco sabbiosa-limoso*. Ho dunque utilizzato la media dei valori di questi due suoli che corrisponde a 3. La seconda zona comprende le frazioni: Trona, Bevilacqua, Capponi e Fantoni, che si collocano su superfici colluviali e conoidi inclinati e che ricadono nella categoria dei suoli *franco-argillosi*, anch'essa con valore pari a 3.

I punteggi SINTACS assegnati in riferimento al diagramma di figura 9 sono indicati in tabella:

Tipologia della copertura	Punteggio SINTACS
Franco-argilloso e argilloso/franco sabbioso-limoso	3

## TIPOLOGIA DELLA COPERTURA



## CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL'ACQUIFERO

Le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero sono un parametro che descrive i processi che avvengono nella zona satura; ovvero l'acquifero in sé, quando un inquinante idroveicolato giunge a mescolarsi con l'acqua sotterranea dopo aver superato le barriere della copertura e dell'insaturo. Questi processi sono: dispersione, diluizione, assorbimento e reattività chimica del mezzo.

La dispersione dipende dalla lunghezza e tortuosità dei percorsi che il fluido segue nella zona satura, nei mezzi porosi, come in questo caso, dipende dalla granulometria e dal grado di compattazione. La diluizione è collegata alla portata unitaria dell'acquifero e alla ricarica attiva e inoltre, la composizione chimica della roccia potrà interagire in misura maggiore o minore con l'inquinante.

Dalla consultazione della relazione geologica del PATI risulta presente nella Valle del Chiampo un unico acquifero freatico localmente interrotto da letti impermeabili discontinui con una buona permeabilità. La direzione del deflusso sotterraneo coincide con quella principale del deflusso superficiale, ovvero NW-SE lungo la valle del Chiampo.

Nella zona di fondovalle osservando la tabella sottostante e osservando la carta litologica, sono stati assegnate le alluvioni medio-fine, con una differenziazione in base alla quantità di elementi fini presenti.

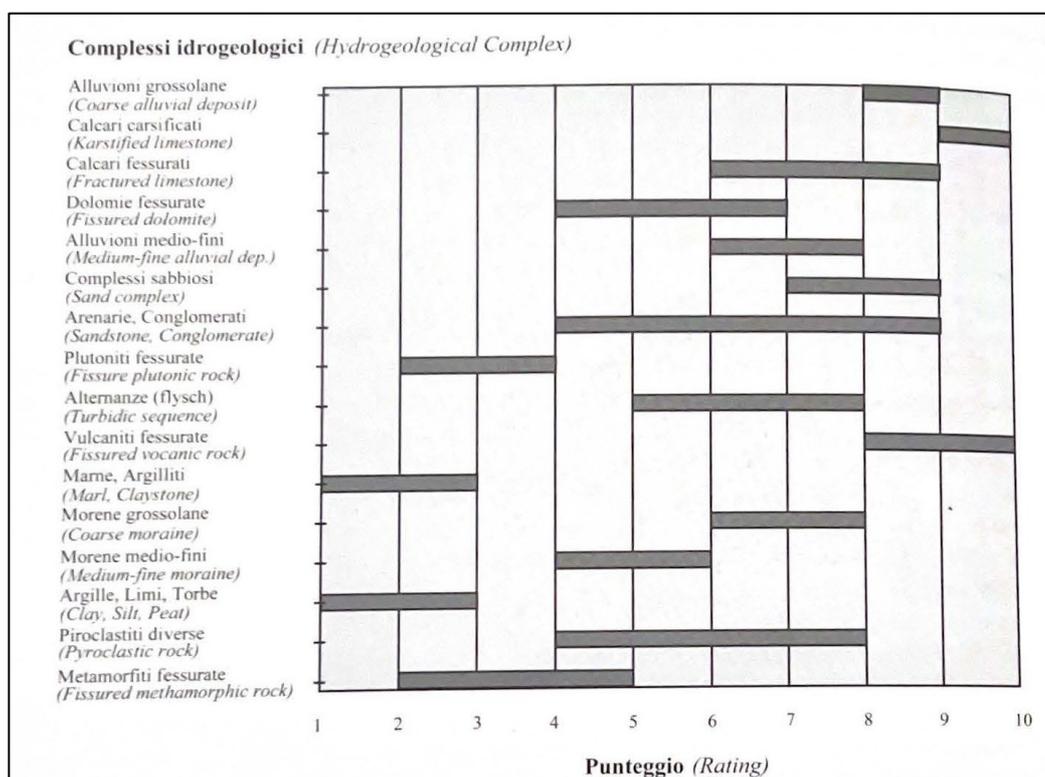


Figura10: Caratteristiche dei complessi rocciosi contenenti la zona satura del sistema acquifero e relativi punteggi.

Sempre osservando la carta litologica, ho assegnato valori pari ad 8 alle zone dove sono presenti materiali a tessitura eterogenea dei depositi di conoide di deiezione torrentizia, mentre nelle aree con materiali sciolti di alveo fluviale recente stabilizzati dalla vegetazione è stato assegnato un valore pari a 7 in quanto sono presenti elementi più fini, infine in alcune ristrette zone dove sono presenti materiali argillosi di alterazione di basalti è stato assegnato un valore di 6.

Tipologia dell' acquifero	Punteggio SINTACS
Alluvioni fine	6
Alluvioni medie	7
Alluvioni grossolane	8

## CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL'ACQUIFERO



## CONDUCIBILITÀ IDRAULICA DELL'ACQUIFERO

La conducibilità idraulica rappresenta la capacità di spostamento dell'acqua sotterranea nel mezzo saturo attraverso pori e fratture, anche nel caso di un inquinante idroportato. Questo parametro assume una rilevanza particolare per stimare la velocità con cui gli inquinanti possono diffondersi all'interno di un acquifero. Valori più alti di conducibilità idraulica indicano che gli acquiferi hanno una maggiore facilità di trasmettere l'acqua (e potenzialmente gli inquinanti), aumentando quindi la vulnerabilità dell'acquifero all'inquinamento. Al contrario, terreni con bassa conducibilità idraulica ostacolano il movimento dell'acqua, limitando anche la diffusione degli inquinanti; la valutazione di questo avviene tramite prove di pompaggio condotte su pozzi di geometria nota ed espressa in m/s.

Nel caso dell'acquifero presente nella valle del Chiampo, i dati ricavati da prove di pompaggio effettuate nei pozzi ad uso acquedottistico nel 2006 risultano valori di conducibilità idraulica medi, variabili tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  m/s.<sup>13</sup>

Il grafico di figura 11 mostra un legame di proporzionalità diretta tra la conducibilità idraulica (K) ed il valore SINTACS.

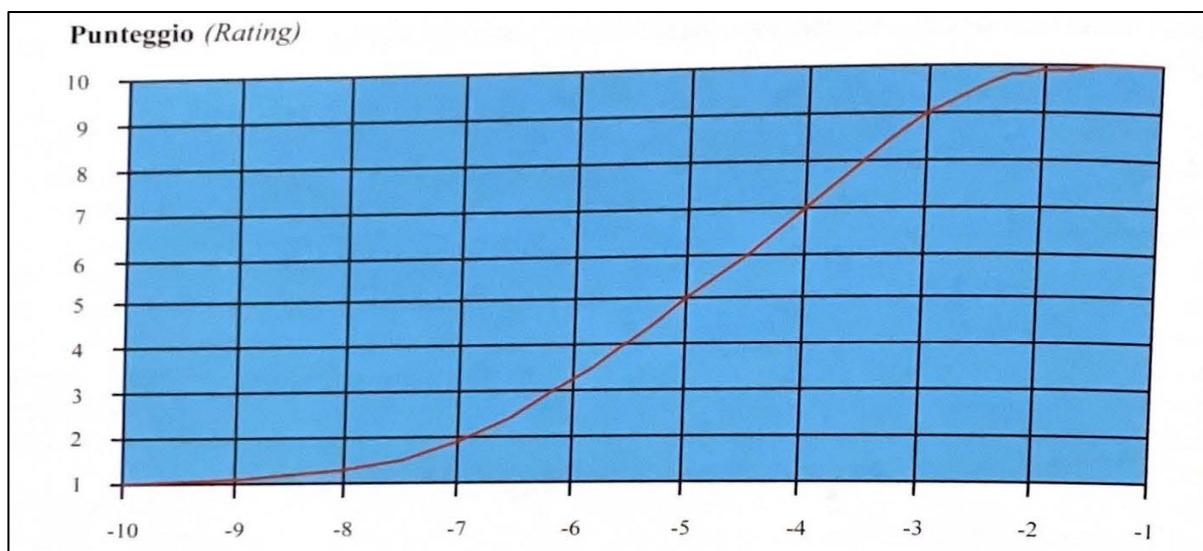


Figura 11: Intervalli di valore della Conducibilità idraulica e relativi punteggi.

Dai dati in mio possesso, visti i valori di conducibilità tra  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  ho deciso di assegnare un valore di conducibilità intermedio in tutta la Valle, poi dal grafico 11 è stato assegnato il valore SINTACS, come viene riportato di seguito in tabella.

Valore di conducibilità K (m/s)	Punteggio SINTACS
$10^{-4,5}$	6

<sup>13</sup> C. Mastella, *Relazione geologica PATI del comune di Chiampo*, Vicenza, 2014

## CONDUCIBILITÀ IDRAULICA DELL'ACQUIFERO



## ACCLIVITÀ DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA

L'acclività della superficie topografica incide significativamente sulla valutazione della vulnerabilità intrinseca, poiché determina la quantità di ruscellamento che si genera a parità di precipitazione e di velocità con cui l'acqua si muove. In pratica, vengono definite diverse classi di pendenza, generalmente tra 0 e 30% come illustrato in figura 12, e si assegna un punteggio più alto alle aree con pendenze più ridotte. Queste corrispondono a zone del territorio in cui un inquinante tende a spostarsi poco sotto l'effetto della gravità o a ristagnare, favorendo così l'infiltrazione.

Mi sono servito della carta delle isoipse per poter ricavare la pendenza della Valle, ho tracciato una linea dall'isoipsa maggiore a quella minore, calcolandone la differenza di altitudine in metri; ho diviso poi la distanza in metri tra le isoipse e applicato questo procedimento alle diverse zone seguendo l'andamento della Valle. Per poter fare ciò, è stato necessario utilizzare la seguente formula:

$$\text{Pendenza}(\%) = (d\Delta/h) \times 100$$

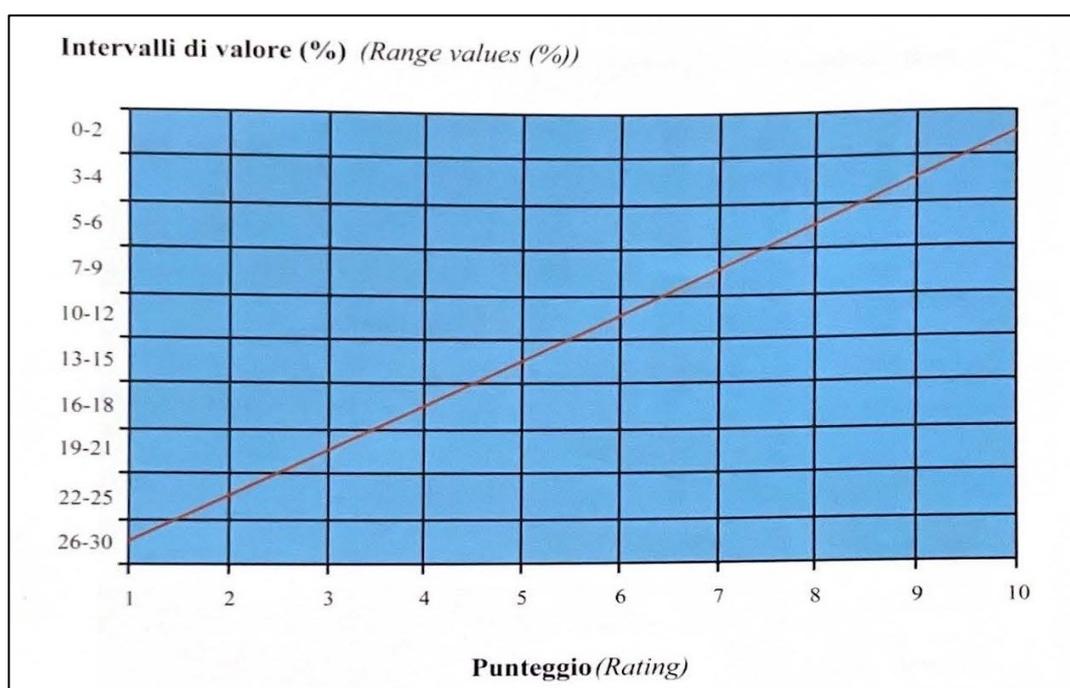
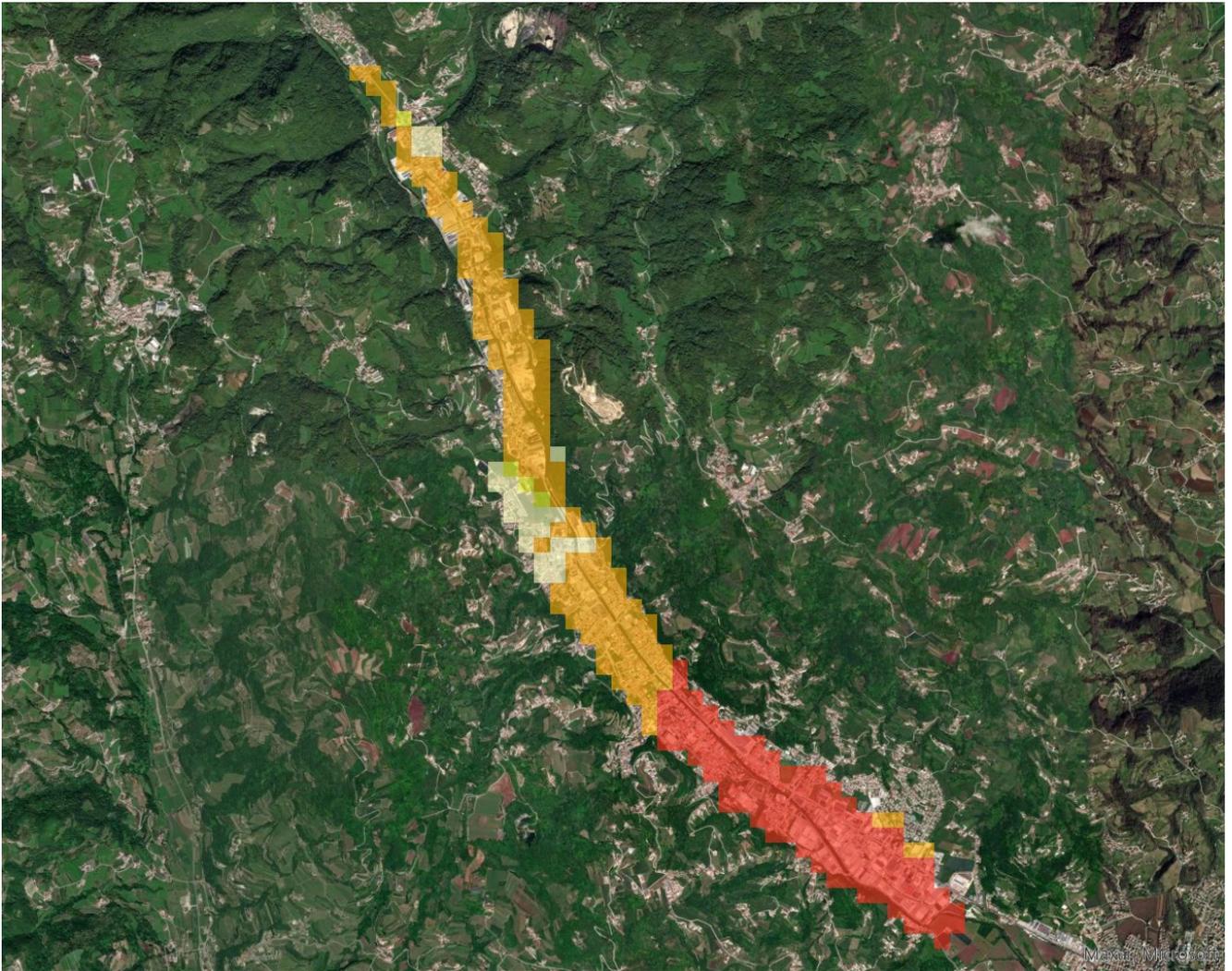


Figura 12: Classi di pendenza e punteggio relativo.

L'area della valle risulta con varie pendenze: in generale, la pendenza media tende a diminuire man mano che scendiamo verso valle dove diventa praticamente pianeggiante, fatta eccezione delle zone dei Fantoni e Bevilacqua dove riscontriamo pendenze maggiore dovute ai rilievi presenti. Una volta calcolata la pendenza, come sopra descritto, mi sono servito del grafico in figura 12 per assegnare i valori che troviamo nella seguente tabella.

Intervalli valore di pendenza %	Punteggio SINTACS
0-2	10
3-4	9
5-6	8
7-9	7

## ACCLIVITÀ DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA



## DESCRIZIONE DELLE SITUAZIONI IDROGEOLOGICHE E DI IMPATTO

Terminata la procedura di assegnazione dei valori per ognuno dei sette parametri, ad ogni EFQ della griglia, si devono ponderare i punteggi assegnati. Questo viene fatto moltiplicandoli per le stringhe dei pesi. Le stringhe sono elaborate in modo da esaltare più o meno i singoli parametri alla base del metodo, per descrivere di fatto il tipo di situazione idrogeologica e di impatto risultante dalla somma dei dati<sup>14</sup>. Le stringhe di pesi rappresentano uno strumento efficace per adattare la metodologia alla realtà specifica di ciascuna area, evidenziando l'importanza relativa di alcuni parametri rispetto ad altri. In ogni stringa, la somma dei pesi attribuiti ai diversi parametri è sempre pari a 26, e il valore massimo che un singolo moltiplicatore può raggiungere è 5, come possiamo vedere in tabella 1.

Parametro (Parameter)	I. normale (Normal I.)	I. rilevante (Severe I.)	Drenaggio (Seepage)	Carsismo (Karst)	Fessurato (Fissured)
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Tabella 1: Stringhe di pesi moltiplicatori previste per SINTACS R5

Le prime due stringhe descrivono scenari caratterizzati da un basso gradiente topografico, come pianure e colline, dove sono presenti condizioni favorevoli a una forte antropizzazione. La terza stringa è stata sviluppata per aree in cui avviene, o potrebbe avvenire, un significativo trasferimento di acqua da corpi idrici superficiali a quelli sotterranei sottostanti, indipendentemente dalla morfologia del terreno. La quarta stringa si riferisce a situazioni dominate da fenomeni carsici rilevanti e completi. La quinta e ultima stringa è stata elaborata per rappresentare condizioni idrogeologiche caratterizzate da rocce fessurate o da fenomeni carsici di minore entità.

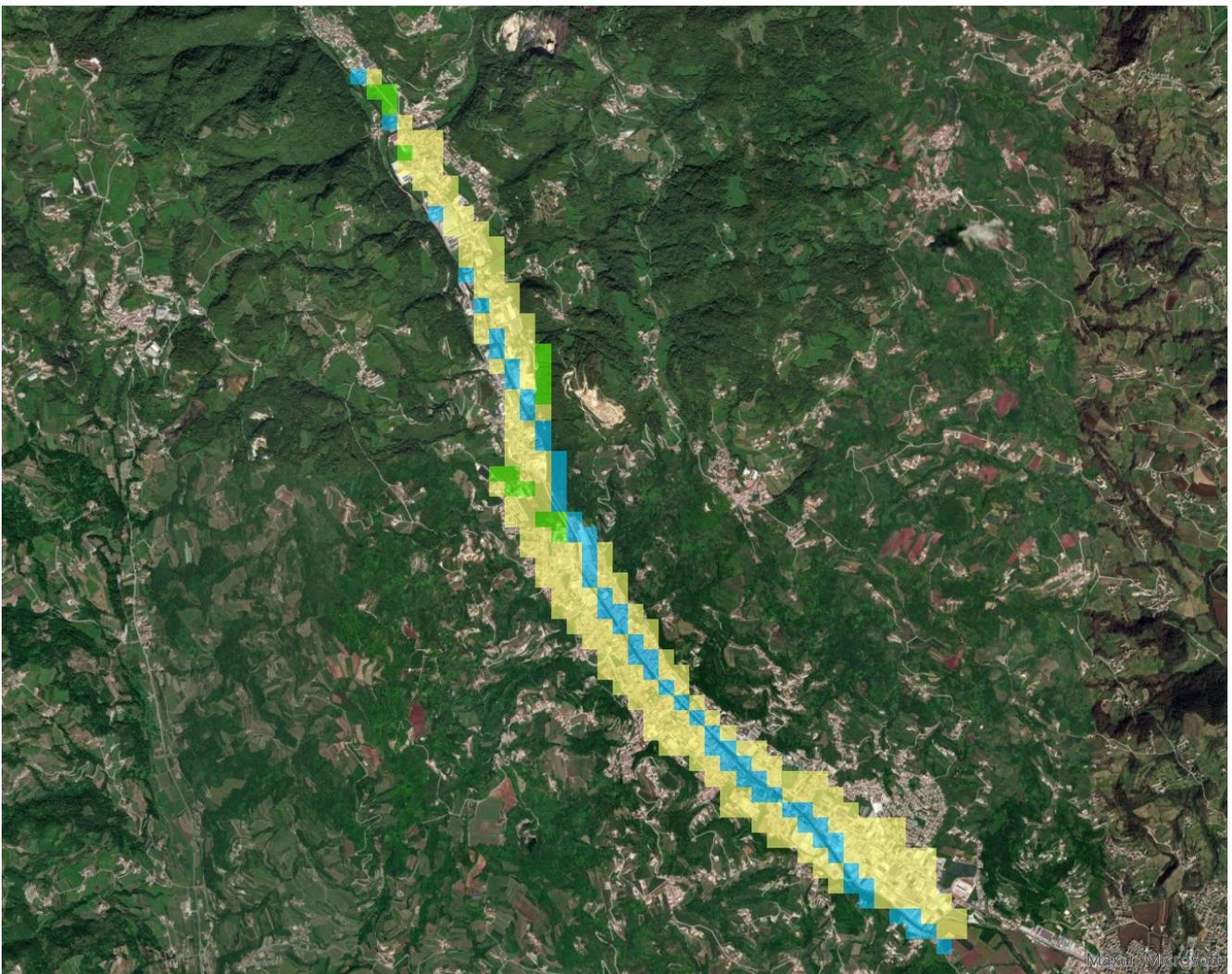
Nel caso della mia area di studio ho individuato tre situazioni di impatto e quindi tre stringhe:

- **Impatto normale:** questa stringa viene utilizzata per quelle situazioni, collegate in genere ad aree a scarso gradiente topografico, dove non sussistono situazioni ad elevato impatto antropico e con un utilizzo del territorio contenuto e scarsamente trasformato. Si tratta o di aree incolte o comunque zone dove non vengono utilizzati fitofarmaci in ambito agricolo; anche gli insediamenti pur essendo limitati non possono essere inclusi in questo scenario. La stringa esalta il peso relativo della soggiacenza e dell'insaturo, collegati alla effettiva penetrabilità del sistema da parte di un inquinante fluido.
- **Impatto rilevante:** questa linea di pesi serve a modellare situazioni territoriali che favoriscono impatti importanti da fonti diffuse di inquinamento potenziale. Sono queste aree morfologicamente adatte ad antropizzazione estensiva, con colture che richiedono l'utilizzo di fitofarmaci, spargimento di liquami, aree a discarica incontrollata, aree industriali e aree urbanizzate. La stringa è stata pensata per esaltare la funzione della soggiacenza e dell'insaturo ma anche quella del suolo come prima importante barriera all'infiltrazione degli inquinanti.

<sup>14</sup> Ivi pg.36 (2000)

- **Drenaggio:** questa stringa serve a descrivere quelle zone dove avviene un continuo o frequente drenaggio da corpi idrici superficiali a quelli sotterranei soggiacenti. Questa linea di pesi è stata calibrata sulla riduzione quasi totale della soggiacenza e può comprendere anche zone abitualmente esondabili dai corsi d'acqua in piena, le aree ad irrigazione con grandi volumi d'acqua e le zone umide. Nel mio caso è stata utilizzata nelle aree di decorso del fiume Chiampo, in quanto in comunicazione con la falda sottostante.

Stringhe di pesi
Drenaggio
Impatto normale
Impatto rilevante



## L'INDICE DI VULNERABILITÀ

Per calcolare l'indice di vulnerabilità intrinseca (SINTACS) per ciascuna cella della griglia, si utilizza la seguente formula:

$$I_{\text{Sintacs}} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j$$

Dove **P** rappresenta il punteggio assegnato a ciascuno dei 7 parametri (*j*) del metodo, e **W** è il peso corrispondente associato alla stringa scelta.

Per ogni cella si ottiene così un valore di vulnerabilità intrinseca che può andare da un minimo di 26 (quando ogni parametro riceve un punteggio di 1) a un massimo di 260 (quando ogni parametro ha un punteggio di 10). Questo intervallo è stato successivamente suddiviso in sei categorie di vulnerabilità (come mostrato in tabella).

Per semplificare la lettura, gli indici grezzi vengono convertiti in percentuale usando la formula:

$$IS_{\text{no}} = \frac{ISGR - IS_{\text{MIN}}}{IS_{\text{MAX}} - IS_{\text{MIN}}} \cdot 100$$

Dove:

- **ISNO** è l'indice SINTACS normalizzato,
- **ISGR** è l'indice SINTACS grezzo,
- **ISMAX** e **ISMIN** sono rispettivamente il valore massimo (260) e minimo (26) dell'indice SINTACS grezzo.

Anche questo nuovo intervallo di punteggi è stato suddiviso in sei categorie di vulnerabilità, che vanno da molto bassa (Bb) a molto elevata (Ee), come illustrato nella figura 13.

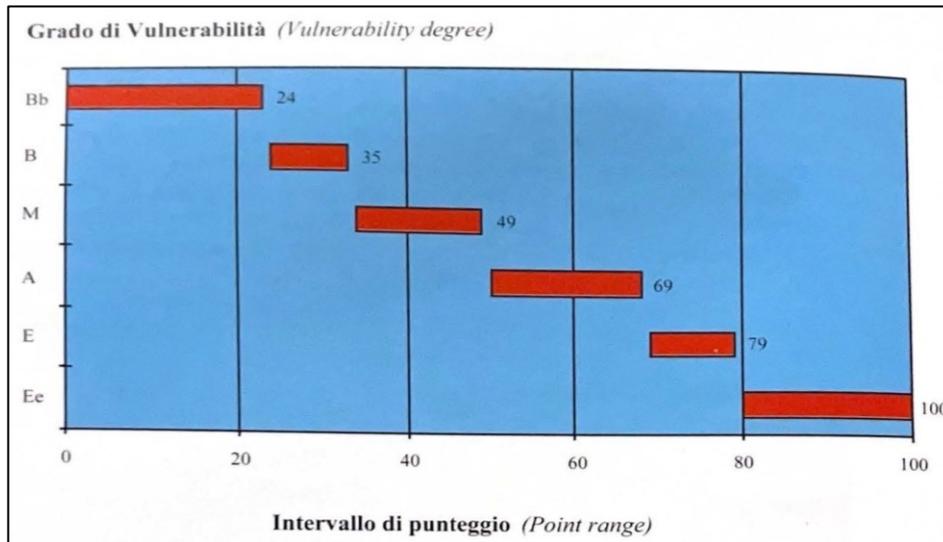


Figura 13: Intervalli/gradì di vulnerabilità intrinseca.

L'applicazione del metodo è del tipo cell by cell con l'esecuzione di calcoli semplici ma ripetitivi. Quindi, è stata messa a punto dai creatori del metodo, una procedura automatizzata che adotta il foglio di calcolo elettronico (Microsoft Excel), coniugando la grande diffusione e semplicità di utilizzo del programma con le esigenze di calcolo richieste. Il software, una volta inserite le coordinate delle celle, i punteggi di ciascun parametro e le stringhe di pesi di tutti gli EFQ, elabora i dati e restituisce come risultato il prodotto tra i punteggi e i pesi di tutte le celle nelle rispettive colonne dei parametri, la sommatoria già normalizzata di tutti i prodotti ottenuti (colonna somma), la lettera corrispondente al grado di vulnerabilità intrinseca nell'ultima colonna (classe), le cartografie, di ciascun parametro, dei

pesi e della vulnerabilità, rappresentate da celle colorate in base ai punteggi.

## PROCEDURA DI GEOREFERENZIAZIONE

Le cartografie in formato numerico, una volta introdotte in un programma di gestione dei dati geografici tipo ArcGIS, dovranno ricostruire le mappe a celle colorate sovrapposte alla cartina topografica della Valle del Chiampo. Per fare in modo che i due tipi di mappe combacino occorre georeferenziarle, ovvero fornire al programma le loro coordinate e le informazioni relative alle dimensioni della mappa. La procedura prevede di salvare i fogli di calcolo in formato testo (\*.txt) e di inserire poi in questi files, nella parte superiore, una testata di georeferenziazione costituita da sei righe e altrettante informazioni che sono:

- ncols “n”: numero di colonne della griglia che si vogliono importare.
- nrows “n”: di righe della griglia che si vogliono importare.
- xllcorner “n”: coordinata in ascissa (in coordinate reali) dell’angolo in basso a sinistra della cella in basso a sinistra.
- yllcorner “n”: coordinata in ordinata (in coordinate reali) dell’angolo in basso a sinistra della cella in basso a sinistra.
- cellsize “n”: lunghezza del lato cella (nell’unità impostata nel programma).
- nodata\_value “n”: valore assunto dalle celle prive di valore (nel nostro caso sempre zero).

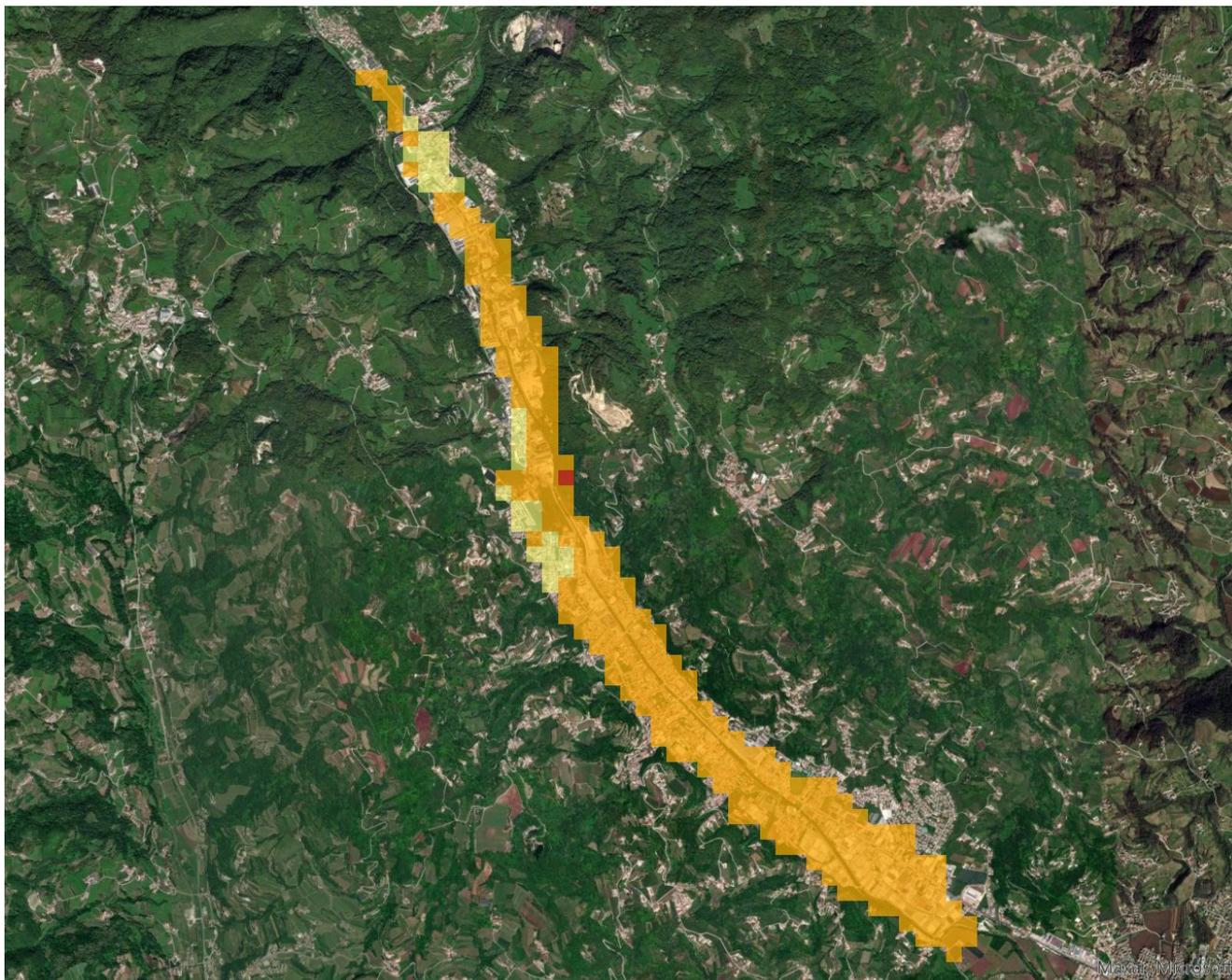
Questi files, così modificati, devono essere trasformati in formato “asc” e poi possono essere caricati nel software ArcView Gis, ottenendo così le carte tematiche georeferenziate.

## CARTA DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA DELLA VALLE DEL CHIAMPO

Il calcolo dell’indice SINTACS tramite la procedura sopra descritta ha prodotto per l’acquifero della Valle del Chiampo i valori riportati nella seguente carta della vulnerabilità.

Sulla base dei dati inseriti e delle stringhe utilizzate sono state individuati tre diversi gradi di vulnerabilità: Alto, Medio e Elevato. Il grado Alto prevale fortemente in tutta la vallata, solamente in delle aree ristrette del comune di S. Pietro Mussolino e della zona Nord di Chiampo risulta presente il grado medio; nel primo caso la classe di vulnerabilità inferiore è dovuta soprattutto ai valori di soggiacenza minori rispetto al resto della Valle, dati da una profondità dell’acquifero superiore ai 10 metri, oltre che da una lieve pendenza presente ed un valore basso di infiltrazione efficace; nel caso della zona Nord di Chiampo, invece, è dovuto soprattutto a valori bassi di infiltrazione efficace e alla pendenza della superficie topografica che porta a dei valori minori dell’acclività topografica, solamente in un EFQ risulta presente il grado Elevato. Come ci si poteva aspettare non vi è una grande differenza di vulnerabilità nelle diverse aree della valle, data la discreta uniformità del territorio e dei suoi parametri analizzati.

CARTA DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA DELLA VALLE DEL CHIAMPO



## CONCLUSIONI

La protezione delle falde acquifere richiede un approccio integrato e una cooperazione tra governi, industrie, agricoltori e cittadini. Questo include regolamenti più rigidi sull'uso delle sostanze chimiche, pratiche agricole sostenibili, monitoraggio delle attività industriali, nonché strategie efficaci di gestione delle acque reflue e dei rifiuti. Solo attraverso un impegno condiviso per proteggere e preservare le falde acquifere possiamo garantire la sicurezza idrica per le generazioni future. Inoltre, è fondamentale promuovere la consapevolezza sull'importanza di un uso responsabile delle risorse idriche, incoraggiando la partecipazione attiva della comunità e l'adozione di tecnologie innovative che favoriscano il risparmio e la qualità dell'acqua.

A tale scopo, i due principali decreti legislativi che definiscono la qualità delle acque sono di fondamentale importanza. Il D. Lgs 02/02/2001 n° 31 disciplina la qualità delle acque destinate al consumo umano, con l'obiettivo di proteggere la salute umana dagli effetti negativi derivanti dalla contaminazione, garantendo salubrità e pulizia delle risorse idriche (art. 1). Parallelamente, il D. Lgs n° 152/2006, noto come Testo Unico Sulle Acque, adotta un approccio più ampio alla tutela delle risorse idriche, includendo disposizioni per la gestione delle acque reflue urbane e per l'inquinamento da nitrati di origine agricola. Questo decreto stabilisce criteri per individuare le zone vulnerabili all'inquinamento e introduce il concetto di vulnerabilità intrinseca come fattore chiave per comprendere lo stato di contaminazione degli acquiferi.

La normativa evidenzia la necessità di una solida base di dati che consideri le caratteristiche chimiche e ambientali delle risorse idriche e dei terreni circostanti. In questo contesto, il metodo SINTACS, si presenta come uno strumento parametrico essenziale per la mappatura della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Questo metodo permette di valutare i meccanismi di vulnerabilità intrinseca degli acquiferi, fornendo un quadro dettagliato del grado di vulnerabilità e delle aree a maggior rischio. I risultati ottenuti non solo consentono di individuare le zone più esposte, ma offrono anche spunti utili per sviluppare interventi mirati alla riduzione dell'inquinamento e alla gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee.

Questo studio, quindi, si propone di contribuire in maniera significativa alla protezione delle falde acquifere, esaminando in dettaglio i fattori di vulnerabilità e fornendo strumenti pratici per una gestione responsabile e sostenibile delle risorse idriche, nell'ottica di preservare tali risorse per le generazioni future.

## BIBLIOGRAFIA

Civita M. ; De Maio M. *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*; Pitagora Editrice Bologna (2000).

Mastella C. ; Relazione geologica relativa al Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (P.A.T.I.) (2014).

Mastella C. ; Relazione di Valutazione di Incidenza Ambientale relativa al Piano di Assetto Intercomunale (P.A.T.I.) (2015).

Appunti e dispense di lezione del corso di “Elementi di Idrogeologia” tenuto dal Prof. Paolo Fabbri.

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/conoscenza-dei-suoli/carte-1-50.000/carta-dei-suoli-in-scala-1-50.000>; accesso in rete 13/10/24

## RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il mio relatore Paolo Fabbri per l'aiuto nella ricerca e nella realizzazione della tesi in questi mesi.

Grazie ai miei genitori perché mi hanno sempre sostenuto, mi hanno sopportato in tutti questi anni anche quando ero insopportabile; questo giorno è anche merito vostro perché mi avete insegnato cosa significa la parola sacrificio.

Grazie a mio fratello che per me è sempre stato un esempio e un amico, e per aumentarmi l'autostima quando giochiamo a Ping Pong.

Grazie a Sofia per aver sempre creduto in me, perché forse senza di te non sarei qui ora a scrivere questi ringraziamenti, per non avermi mai fatto annoiare anche nelle giornate più lunghe, per farmi ridere, per le altre mille cose che abbiamo fatto e perché so che per sempre ci sarai se ne avrò bisogno.

Grazie ai miei amici di una vita perché hanno reso divertente anche le cose più semplici, grazie perché con voi ho sempre potuto essere me stesso, siete come una famiglia.