

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
Sede Amministrativa del Dottorato di Ricerca

XXI CICLO DEL
DOTTORATO DI RICERCA IN
GEOMATICA E SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI

**STUDI PER LA MESSA A PUNTO DI UN SIT GEOLOGICO STRATIGRAFICO
E GEOLOGICO APPLICATO – IL SIT DELLE AREE CARSICHE**

(Settore scientifico-disciplinare: GEO/04 Geografia fisica e geomorfologia)

DOTTORANDO
WALTER BOSCHIN

COORDINATORE DEL COLLEGIO DOCENTI
CHIAR.MO PROF. FRANCO CUCCHI
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TRIESTE

RELATORE
DOTT. LUCA ZINI
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TRIESTE

CORRELATORE
CHIAR.MO PROF. FRANCO CUCCHI
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TRIESTE

ANNO ACCADEMICO 2008/2009

1 INTRODUZIONE

Il dottorato è stato svolto presso il Gruppo di Geomorfologia, Geologia Applicata e Cartografia Informatica (GGACI) del dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine che da anni si occupa di problematiche correlate ai fenomeni carsici dato anche l'ambito territoriale (la Regione Friuli Venezia Giulia) entro il quale esso principalmente opera. Questo territorio è infatti ricco di fenomeni carsici data la notevole estensione delle aree dove affiorano rocce carsificabili. Tali zone ricoprono notevole importanza sia da un punto di vista paesaggistico, date le peculiari caratteristiche geomorfologiche che si riflettono su tutti gli aspetti naturalistici in genere, ma anche dal punto di vista delle risorse idriche perché, per le loro caratteristiche intrinseche sono in grado di immagazzinare e restituire notevoli volumi d'acqua. Per questi motivi la loro salvaguardia è una questione che coinvolge gli interessi di tutta la comunità e non solo di studiosi e appassionati.

La gestione del territorio nell'ottica della salvaguardia non può prescindere da un'adeguata conoscenza dello stesso che necessariamente si fonda su approfonditi studi di settore. Per quanto riguarda l'ambito geologico in senso lato attualmente sono disponibili dei potenti software in grado di gestire tutti i dati spaziali afferenti al territorio considerando sia la parte geometrica che quella alfanumerica ad essa associata.

Dati questi presupposti l'obiettivo principale del lavoro è stato la creazione di un Geodatabase per raccogliere ed elaborare dati relativi agli aspetti geologici, geomorfologici ed idrogeologici delle aree carsiche che ricadono nel territorio della Regione Friuli Venezia Giulia. Lo scopo è quindi stato quello di creare una base dati che raccogliesse ed omogeneizzasse tali informazioni in un'ottica di tipo interdisciplinare creando un valido punto di partenza per diverse applicazioni che spaziano dall'ambito puramente scientifico a quello di gestione e salvaguardia di queste peculiari zone. Per facilitare la consultazione del Sistema Informativo Geografico creato sono stati gettati i presupposti per la creazione di un Catasto Aree Carsiche rappresentato da schede catastali afferenti ad ognuna delle aree carsiche individuate. Si tratta di un valido strumento per riassumere le caratteristiche peculiari di ogni singola area carsica.

Per la realizzazione di questo progetto è stato necessario un primo lavoro di raccolta dati facendo riferimento sia a banche dati esistenti, sia effettuando talvolta rilevamenti mirati sul territorio, alla quale è seguita una fase di elaborazione e standardizzazione.

Solo dopo aver strutturato il Sistema Informativo Geografico, è stato possibile ricercare un metodo di classificazione e suddivisione delle aree carsiche presenti.

Tutto il lavoro è stato eseguito utilizzando i software: Auto CAD Map® 2005, Arc View® 9.1, MS Access ® e MS Excel®.

In particolare il software AutoCAD MAP 2005 è ideato proprio per gestire dati spaziali georiferiti tra i quali carte topografiche in formato vettoriale ed anche raster (applicativo Raster Design); è stato utilizzato nell'ambito di questo lavoro sia per la grande versatilità nell'ambito della digitalizzazione sia perché il GGACI si serve di questo software nell'ambito di numerosi progetti di studio. I file di AutoCAD utilizzati o creati sono stati comunque strutturati in maniera tale da facilitarne la successiva importazione nel geodatabase.

Per la creazione del geodatabase è stato invece utilizzato il software ArcGIS 9.1, strumento potentissimo per l'archivio, l'analisi e l'elaborazione di dati spaziali. I GIS sono tra gli strumenti più utilizzati per la gestione e la tutela del territorio in quanto sono in grado di gestire dati georiferiti legandoli attraverso mutue relazioni spaziali attribuendo ai singoli dati inseriti elementi descrittivi di varia natura. Sulla base delle caratteristiche spaziali degli elementi che li compongono e delle loro proprietà alfanumeriche (attributi) un GIS consente poi di effettuare analisi ed elaborazioni dei dati ricavando ulteriori dati che consentono di descrivere con ancora maggiore accuratezza l'oggetto stesso del GIS.

Riassumendo brevemente il lavoro di tesi, esso, a parte l'iniziale ricerca bibliografica è consistito nel reperimento dei dati geologici che successivamente dopo le opportune correzioni sono stati importati in ambiente GIS. Grazie alla cartografia così ottenuta è stata possibile una prima sommaria individuazione degli areali carsificabili sulla base delle caratteristiche litologiche dei terreni affioranti. Al fine di caratterizzare il più possibile le aree e di consentire un migliore riconoscimento delle stesse, sono state individuate e georeferenziate le principali forme carsiche presenti (doline, grotte, e forme carsiche minori) le caratteristiche delle quali sono state estrapolate in parte da archivi informatici in parte mediante rilevamenti mirati sul campo.

Una volta ottenuto il quadro generale riguardante l'esatta distribuzione degli areali carsici sul territorio della regione Friuli Venezia Giulia, questi ultimi sono stati suddivisi in Aree che possedessero caratteristiche il più omogenee possibili.

Per ogni Area sono stati individuati diversi livelli tematici all'interno del GIS tra i quali la geologia del territorio, le principali forme carsiche presenti, le caratteristiche topografiche del territorio desunte mediante la creazione di appositi DEM ecc.

Le diverse Aree così individuate sono state catalogate tramite delle schede appositamente create e strutturate.

I risultati finali ottenuti sono stati essenzialmente due:

- la creazione di un catasto delle aree carsiche del Friuli Venezia Giulia.
- la creazione di un Sistema Informativo Geografico a carattere geologico che per sua natura si presta ad essere interdisciplinare.

2 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE DEL FRIULI VENEZIA GIULIA

Il territorio montano e collinare del Friuli Venezia Giulia è suddivisibile in unità orografiche che hanno, in concordanza con le caratteristiche geologiche, una loro individualità geografica. Si riconosce a settentrione la Catena Carnica, estesa in senso Est - Ovest e sviluppata dalla Linea della Gail in Austria all'allineamento quasi rettilineo delle valli Pesarina, Calda, Pontaiba, Pontebbana, alto Fella. Queste valli, impostate su linee tettoniche, sono un'espressione morfologica che collega il Tarvisiano con il Cadore e sono costituite quasi esclusivamente da rocce di età paleozoica. Più a Sud si hanno le Alpi Tolmezzine (anche Alpi Carniche Meridionali) con i rilievi costituiti da rocce prevalentemente mesozoiche e con i fondovalle in cui affiorano i sottostanti termini paleozoici, e le Alpi Giulie, con i rilievi dominati dalle rocce triassiche. Le Prealpi Carniche sono sviluppate a Sud del percorso montano del Tagliamento fino ai rilievi affacciati sulla Pianura Friulana occidentale. Sono qui dominanti le rocce mesozoiche e cenozoiche, con un assetto strutturale che forma un arco concavo verso la pianura. Verso Est, ad arco verso la Pianura Friulana orientale, si trovano le Prealpi Giulie, prosecuzione delle Prealpi Carniche in cui sono particolarmente sviluppate le successioni in facies di Flysch e di molassa di età mesozoica. Parte a sé fa il Carso, costituito quasi esclusivamente da calcari cretacici e paleocenici. Dal punto di vista strutturale, va tenuto presente che nella nostra Regione si saldano tre catene geologiche: la Catena Paleocarnica, la Catena Subalpina, la Catena delle Dinaridi che sono costituite da una successione litostratigrafica potente complessivamente quasi 30.000 metri e rappresentativa di 450 milioni di anni di storia geologica.

2.1 La sequenza stratigrafica

2.1.1 La sequenza permocarbonifera

I termini della Catena Carnica affiorano nella zona più settentrionale della Regione lungo una fascia di larghezza variabile da 10 a 20 km, delimitata verso Nord dal confine

italo-austriaco e sepolta verso Sud sotto una pila di accavallamenti formati dalle successioni mesozoiche. Lo schema stratigrafico consta di due sequenze fondamentali, quella ercinica e quella permo-carbonifera. Nella sequenza ercinica, sulle siltiti e sulle marne della Formazione della Val Visdende e della Formazione dell'Uqua, giacciono i

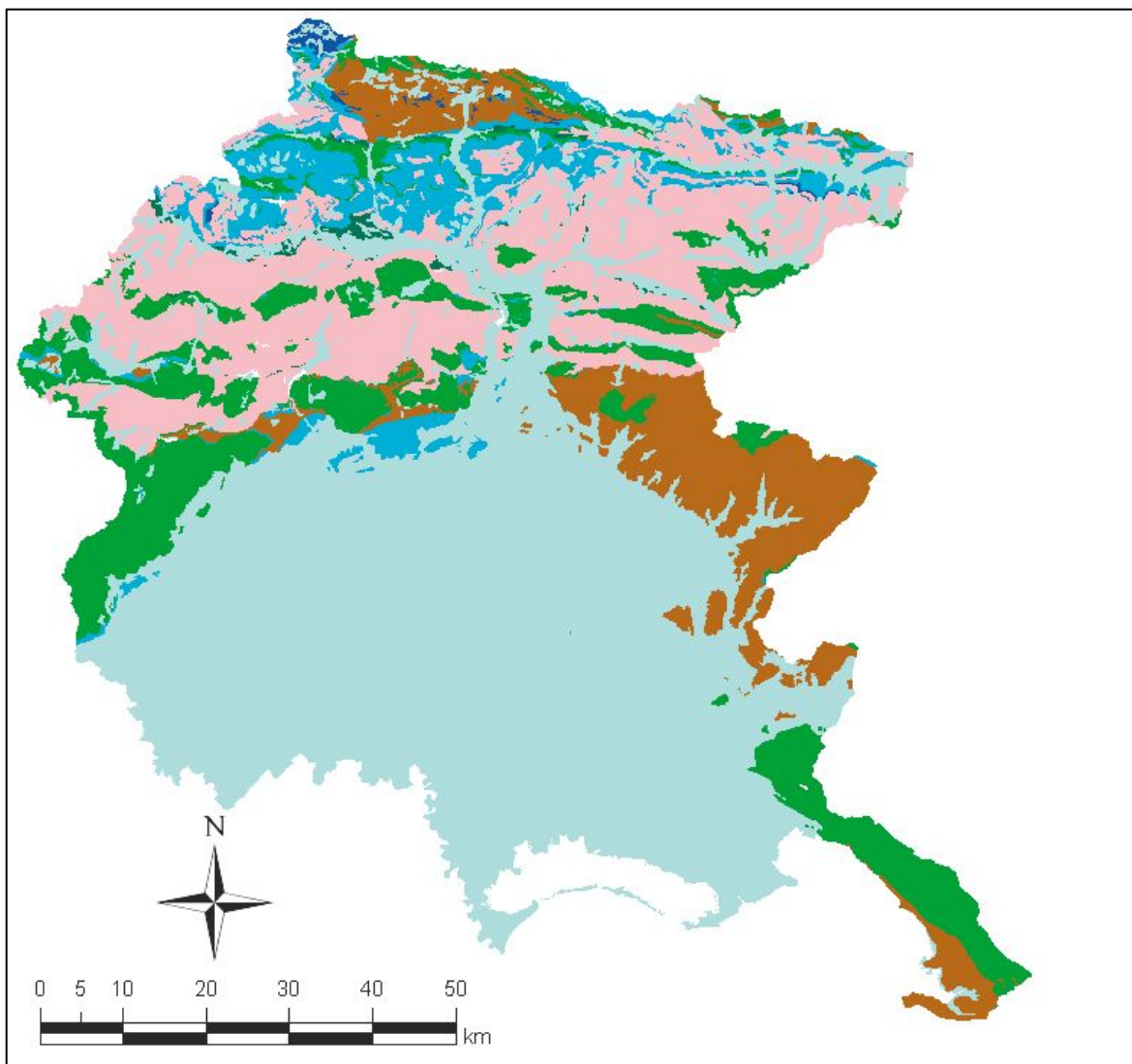


Figura 2.1: Carta geologica semplificata, tratta dalla Carta geologica del Friuli Venezia Giulia alla scala 1:150.000, elaborata da G.B. Carulli nel 2006 per conto del Servizio Geologico della Regione Friuli Venezia Giulia

calcari stratificati ad *Orthoceras* della Formazione di Monte Lodin (Siluriano) e i calcari massivi di scogliera a coralli, stromatopore e climenie del Devoniano. I calcari, potenti da 200 a 300 metri, sono spesso intensamente carsificati. Nella sequenza permo-carbonifera, denominata anche Permocarboneo Pontebano o Supergruppo di Pontebba, si

riconoscono numerose formazioni (Formazione di Hochwipfel, Formazione di Dimon, Gruppo dell’Auernig, Gruppo di Rattendorf, Formazione del Trogkofel, Arenarie di Val Gardena, Formazione a Bellerophon) che consistono essenzialmente in alternanze di depositi continentali e deltizie di mare poco profondo in facies terrigene o carbonatiche complessivamente potenti fino a 3000 metri, nelle quali il carsismo praticamente non si è sviluppato. Ad essere precisi, tuttavia, nei gessi saccaroidi del Bellerophon possono svilupparsi fenomeni di paracarsismo con formazione di doline e di cavità.

2.1.2 La sequenza triassica inferiore e media

I termini che costituiscono la sequenza tipica delle Alpi Carniche sono pertinenti non solo a quest’area, ma anche a quella delle Alpi Giulie Settentrionali. Le formazioni appartengono al Triassico ed in particolare si riconosce una successione di calcari, dolomie, siltiti, arenarie, nelle quali fenomeni importanti di carsismo non sono noti. Ricordiamo la Formazione di Werfen (con le sue subunità: Orizzonte di Tesero, Membro di Mazzin, Orizzonte di Andraz, Membro di Siusi, Oolite a Gasteropodi, Membro di Campil, Membro di Cencenighe), la Formazione di Lusnizza, la Dolomia del Serla inferiore e superiore, le Formazioni del Monte Dont e del Monte Bivera, la Formazione dell’Ambata, la Formazione del Monte Tiarfin, la Formazione di Buchenstein, gli Strati di Wengen, la Dolomia Cassiana o Formazione dello Schlern, il Gruppo di Raibl.

2.1.3 Le sequenze triassico – terziarie

Le sequenze delle Prealpi Carniche e delle Prealpi Giulie interessano la fascia di territorio compresa tra il corso dell’Alto Tagliamento, la Val Resia e la pianura. Possono essere distinte due successioni rappresentative, una di sedimentazione bacinale e l’altra di piattaforma e peri-piattaforma. Dal Triassico superiore, infatti, anche l’area attualmente occupata dalla nostra Regione risente dell’apertura del Mare della Tetide e della conseguente strutturazione di ambienti marini diversi. Sarà solo nell’Eocene che i prodotti di smantellamento della catena alpina in via di sollevamento creeranno depositi, di tipo torbiditico, che uniformano la sedimentazione regionale. La sequenza di piattaforma prevede una successione in cui numerosi sono gli intervalli calcarei, anche potenti, oggi intensamente carsificati. Ricordiamo al proposito che sulla Formazione del Monticello

(calcarei scuri marnosi e selciferi) giace la Dolomia Principale del Norico, data da dolomie massicce e calcari dolomitici stratificati con potenza massima di 2000 metri e media di

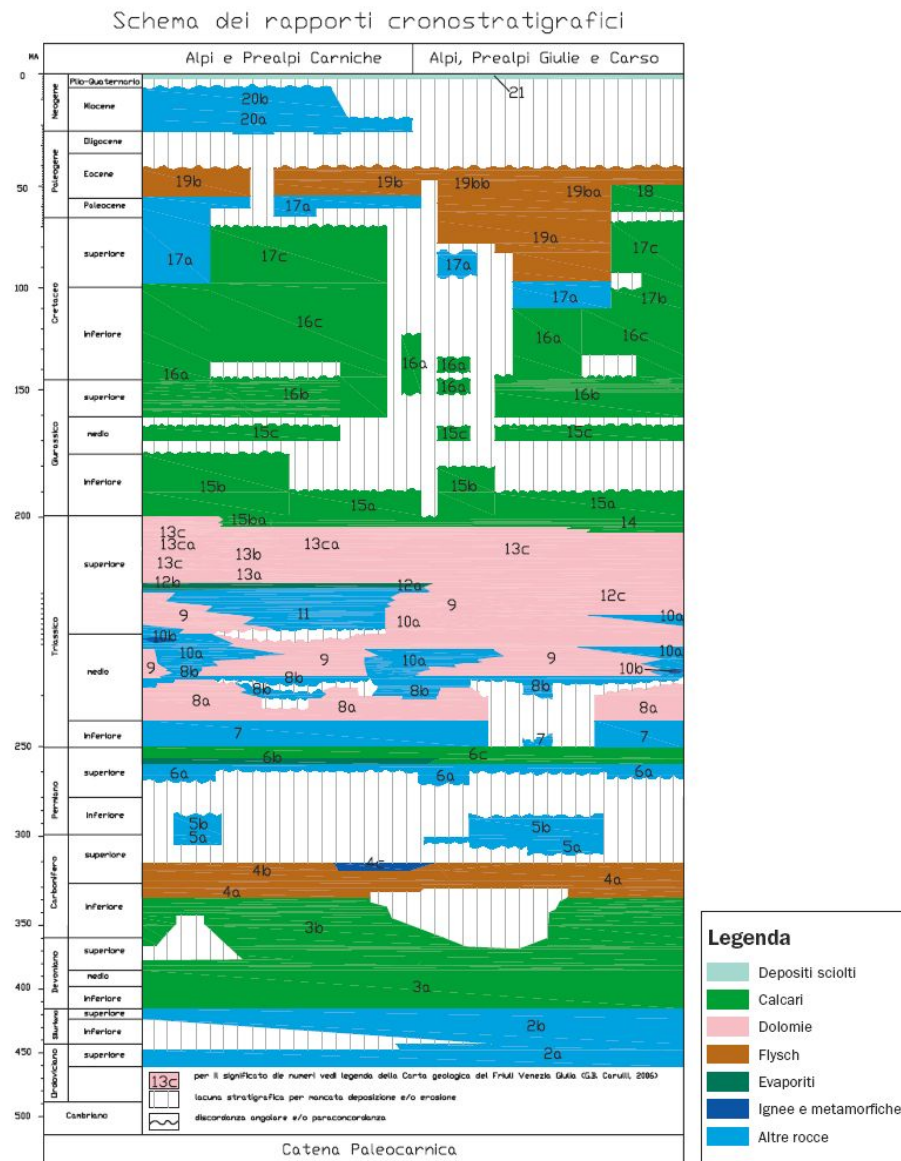


Figura 2.2 - Schema dei rapporti stratigrafici, modificato dalla Carta Geologica del Friuli Venezia Giulia (G.B. Carulli 2006)

circa 500 metri, che occasionalmente ospita cavità. Ma è nei calcari grigi a Megalodon, ben stratificati con spessore anche di 800 metri della formazione del Calcarea del Dachstein (Retico) e nei sovrastanti calcari grigi ben stratificati, talvolta oolitici, con potenza di circa 200 metri della formazione dei Calcarei grigi del Friuli (Lias) che si sviluppa un intenso e diffuso carsismo, presente anche nei calcari selciferi ad ooliti e crinoidi (Calcarea del Vajont

e Calcarea del Cellina), e nei calcari fittamente stratificati con potenza di circa 360 metri della Formazione del Calcarea di Soccher (Dogger-Malm). E sono infine del Cretacico le formazioni più carsificabili e carsificate della Regione, con un carsismo diffuso ed intenso. Ne sono espressione il Calcarea di Aurisina, il Calcarea a rudiste, calcari biocostruiti a Rudiste, massicci, tipico deposito di scogliera la cui potenza nel settore del Carso raggiunge il migliaio di metri. Intensamente carsificati sono anche i calcari di età cenozoica: i calcari del Gruppo Liburnico, i Calcari a Nummuliti ed Alveoline nei quali sul Carso si aprono interessantissime cavità. Così come con un carsismo altrettanto interessante si presentano le intercalazioni calcaree, arenacee e conglomeratiche, che si trovano nelle complesse successioni prevalentemente silicoclastiche dei vari Flysch paleocenici ed eocenici. Questi, in specie i Flysch di Grivò, di Ucea, di Clodig, contengono livelli calcarei in cui il carsismo ha creato numerose cavità.

2.2 Cenni generali di carsismo nella regione

Su 7.978 Km² competenti l'intero territorio della regione Friuli – Venezia Giulia circa 1.900 Km² sono costituiti da affioramenti di rocce carbonatiche. Queste interessano i 5.050 Km² di aree montuose e collinari e si può quindi in prima battuta affermare che quasi il 40 % dei rilievi della Regione sono potenzialmente carsificabili ed in vario modo carsificati.

In tutto il territorio regionale sono infatti presenti diverse facies calcaree che consentono molteplici manifestazioni del fenomeno carsico che raggiunge spesso forme eclatanti anche grazie all'elevatissima piovosità tipica soprattutto delle aree prealpine.

Lo sviluppo del fenomeno carsico è indicato anche dalle oltre 7000 cavità finora scoperte ed esplorate e dalla diffusione delle forme carsiche epigee, quali doline, campi solcati, grize, che spesso raggiungono dimensioni e tipologia veramente notevoli.

I territori carsici presenti manifestano inoltre anche caratteristiche molto diverse l'uno dall'altro derivanti da differenti condizioni di esposizione, diversa storia evolutiva e dalla presenza di litologie con differenti caratteristiche di carsificabilità.

3 REPERIMENTO E MODIFICA DEI DATI UTILIZZATI

L'individuazione delle aree carsiche della regione Friuli Venezia Giulia è passata attraverso la raccolta e l'analisi integrata e interdisciplinare di numerose informazioni.

Per poter procedere alla creazione di un archivio delle aree carsiche sottoforma di schede è stato necessario un lungo lavoro di acquisizione dei dati e strutturazione degli archivi al fine di standardizzare ed utilizzare le informazioni raccolte. Successivamente per migliorarne l'usabilità sono state inserite all'interno di un geodatabase sviluppato in ArcGIS poi utilizzato appunto per la definizione degli areali carsificati della Regione Friuli Venezia Giulia.

3.1 Omogeneizzazione dei dati geologici

Sono state innanzitutto reperite le informazioni geologiche. A questo scopo si è fatto uso della carta geologica elaborata da G.B. Carulli nel 2007 per conto del Servizio Geologico della Regione Friuli Venezia Giulia.

I contenuti della carta, inizialmente disponibile in formato CAD, sono rappresentati da polilinee chiuse e tratteggi che identificano gli areali di affioramento delle diverse unità cronostratigrafiche, da polilinee che rappresentano le principali lineazioni tettoniche, da blocchi che identificano la giacitura dei piani di strato e da altri blocchi che rappresentano alcuni punti notevoli. Per le finalità del progetto si è resa necessaria l'importazione in ArcGIS della suddetta carta, fondamentale per l'individuazione degli areali carsici. Per raggiungere tale finalità ci si è però dovuti confrontare con problematiche derivanti principalmente da errori di digitalizzazione. La creazione del modello in CAD non era infatti avvenuta tenendo conto delle linee guida da rispettare al fine di una successiva e corretta importazione in ambiente GIS. Per questo motivo si sono rese necessarie un insieme di operazioni che hanno richiesto diverso tempo per preparare il supporto informatico sviluppato in ambiente CAD all'esportazione in ambiente GIS.

Il principale problema constatato era causato da difetti nella digitalizzazione delle polilinee che contornano i poligoni rappresentanti le diverse unità affioranti. I contorni di poligoni contigui infatti spesso non risultavano combacianti dando origine a spazi vuoti o

sovrapposizioni. In altri casi ancora i retini in CAD, rappresentanti l'estensione delle diverse litologie non erano contornati da polilinee chiuse ma spezzate, e talvolta non esattamente combacianti con i contorni del retino. Ciò rappresentava un serio problema perché l'importazione in GIS di elementi così definiti può comportare diverse problematiche quando il supporto viene poi utilizzato per esempio per eseguire interrogazioni spaziali sulla base di regole topologiche.

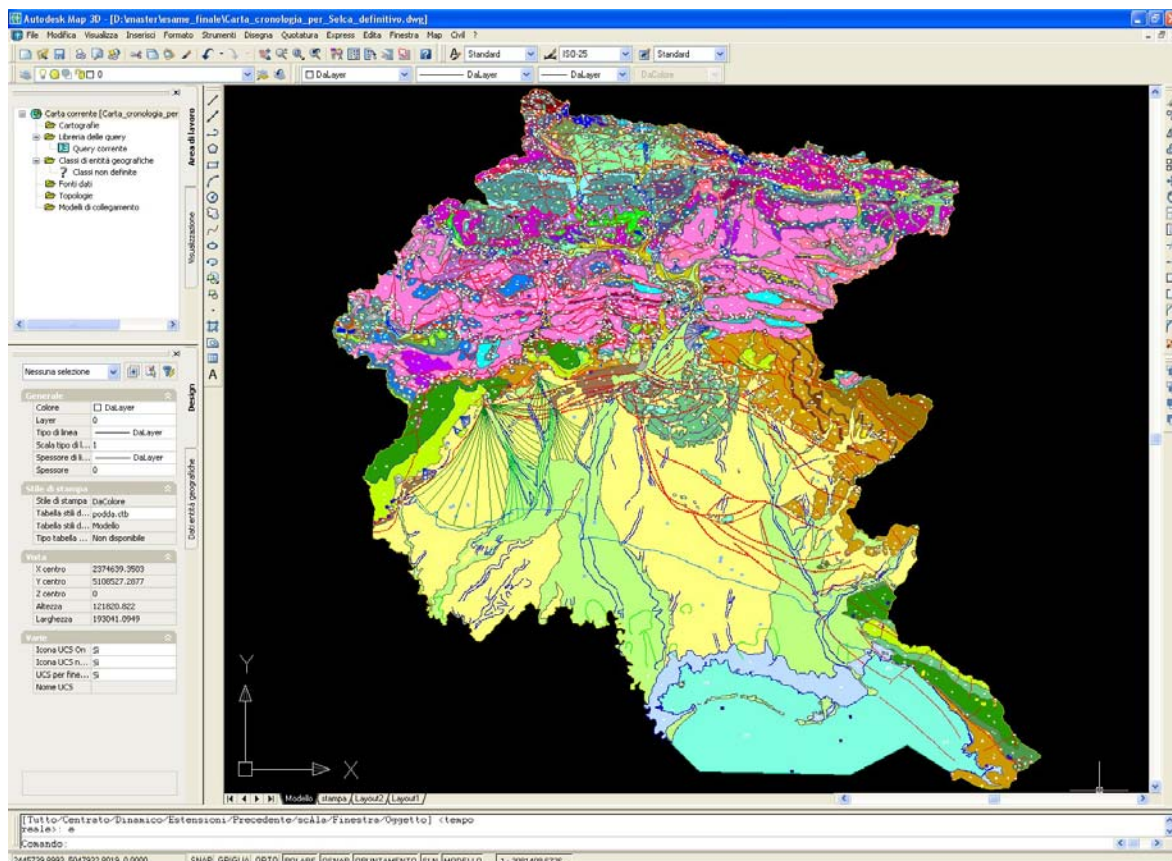


Figura 3.1: La cartografia geologica utilizzata in formato dwg

Il lungo lavoro di correzione è avvenuto utilizzando inizialmente gli strumenti disponibili in AutoCAD e successivamente quelli propri di ArcGIS.

La correzione degli errori di digitalizzazione è inizialmente avvenuta in ambiente CAD. Il primo passo è stato infatti quello di ricreare, a partire dai tratteggi in CAD, il contorno dei tratteggi stessi, in maniera tale che ogni tratteggio, rappresentante l'area di affioramento di una particolare litologia, sia perfettamente contornato da un poligono chiuso. A questo scopo è stato utilizzato il comando `genera contorno` a partire da retino

creando così un poligono AEC successivamente trasformato in una polilinea chiusa. A questo punto tutte le polilinee chiuse che rappresentano il contorno dei retini sono state esportate tramite gli strumenti di AutoCAD map in file shape (figura 3.2). Gli attributi di esportazione sono stati un codice ID identificativo del layer, e l'area della superficie

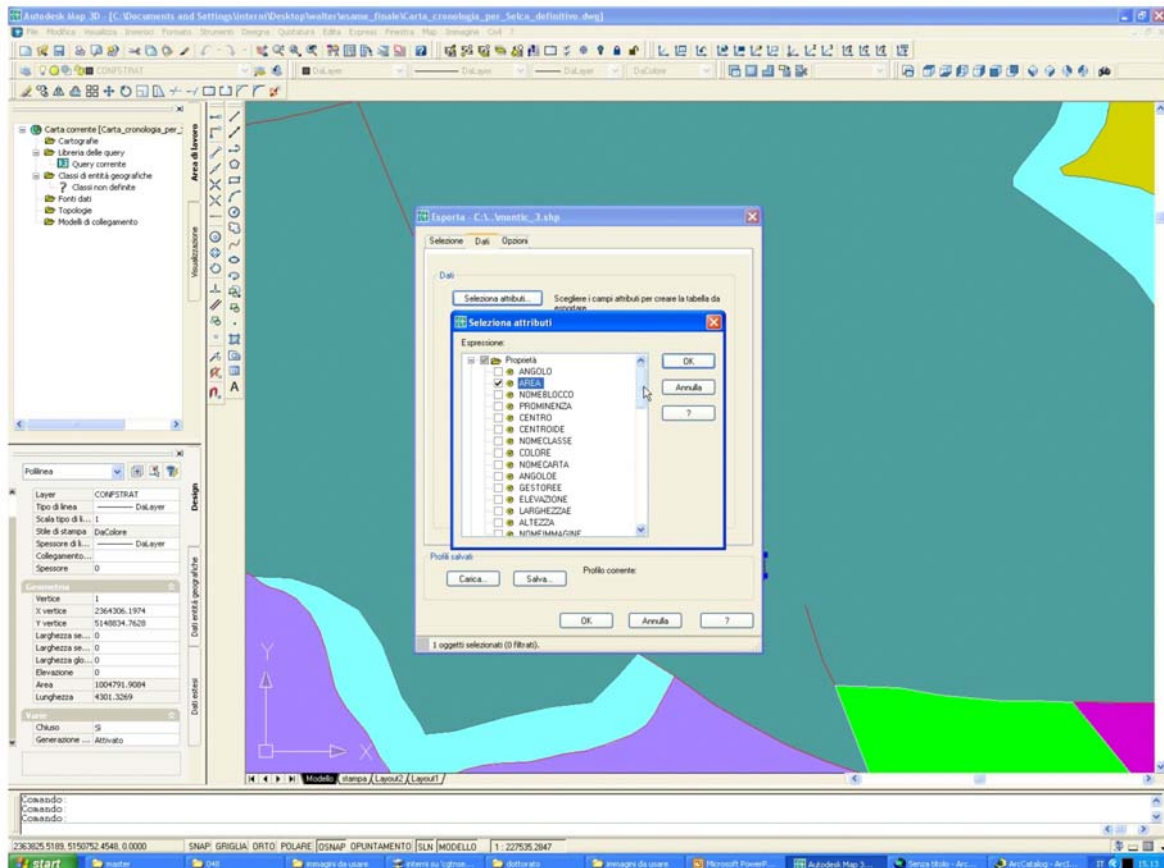


Figura 3.2: interfaccia in AutoCAD Map per l'esportazione di uno shapefile

coperta.

Una volta completata l'esportazione si è passati alla correzione degli errori rimasti mediante un'analisi spaziale tramite regole topologiche effettuata in ArcMAP. In particolare le regole topologiche utilizzate nella correzione della posizione reciproca dei poligoni sono state due:

- Must not have gaps
- Must not overlap

Entrambe le regole topologiche sono state utilizzate al fine di assicurare che vi sia una perfetta coincidenza tra i bordi di poligoni contigui.

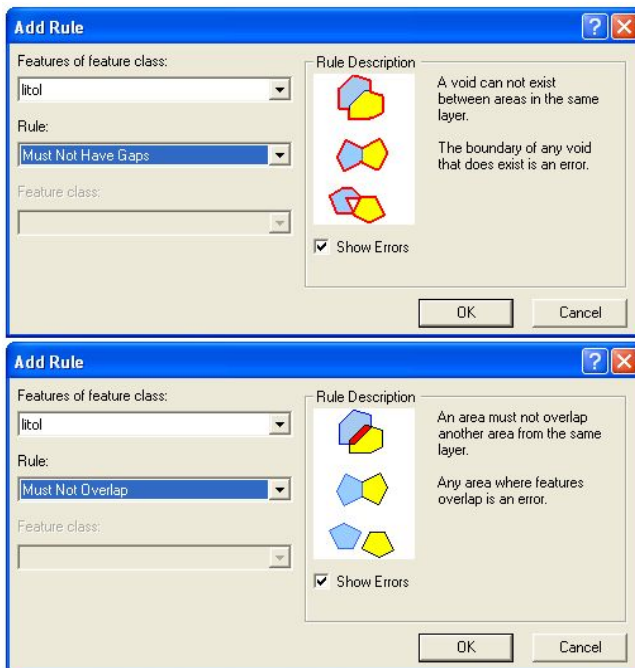


Figura 3.3: le due regole topologiche utilizzate

che rappresenta la litologia “B” detta anche ISOLA. L’informazione che ricaviamo da questo disegno è che nell’area più piccola coesistono entrambe le litologie “A” e “B”. Non essendo questo ciò che si voleva comunicare, bisogna apportare delle modifiche. Infatti

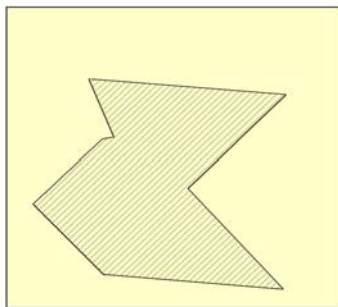


Figura 3.4: Esempio di coesistenza di due informazioni nello stesso areale. ISOLA da correggere

volendo comunicare che la litologia “B” è presente in un areale minore contenuto in A è necessario eliminare la presenza della litologia “A” all’interno dell’areale minore. In figura 3.5 possiamo osservare l’esatta struttura: la litologia “A” ricopre

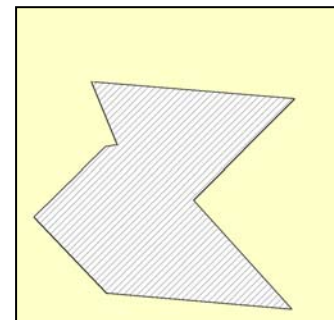


Figura 3.5: Esempio di ISOLA corretta.

solamente la zona esterna mentre la litologia “B” è circondata dalla prima ed è appunto quella che definiremo

“isola”.

Per risolvere tutte le problematiche esposte in ArcCatalog sono state create le due topologie, la validazione delle quali ha portato all’individuazione degli errori e della presenza delle isole. Successivamente mediante gli strumenti di editing di ArcMap è stata

La seconda regola topologica è stata inoltra impiegata anche per ovviare al problema delle cosiddette “isole” che si crea dopo l’importazione in ArcMAP qualora un poligono presenta all’interno del suo contorno un ulteriore poligono.

Osservando la figura 3.4 si può notare che la litologia rappresentata dal colore uniforme giallo, rappresentante la litologia “A”, si estende su tutto l’areale, e ricopre anche la superficie posta dentro l’area più piccola, (individuata dal tratteggio)

eseguita la correzione tenendo conto anche dei rapporti tra i diversi feature nel modello CAD di origine.

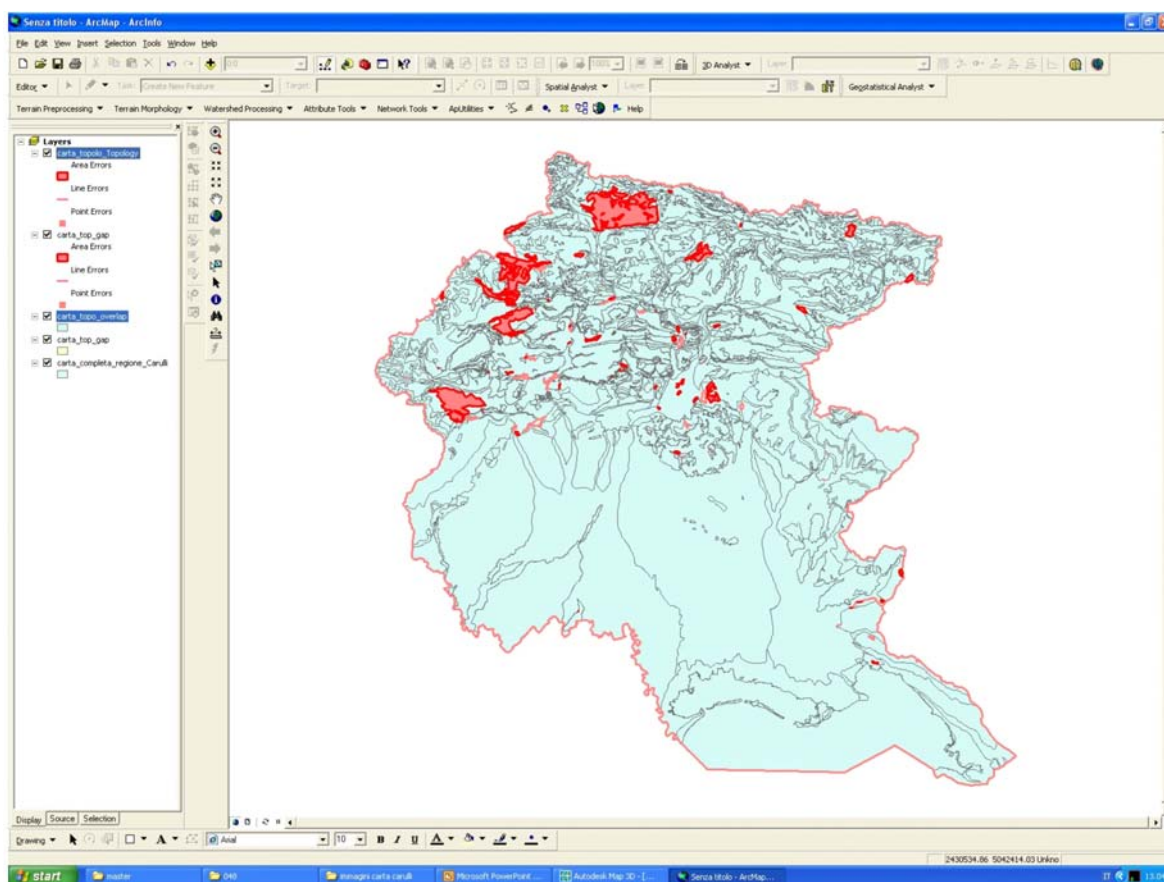


Figura 3.6: individuazione degli errori mediante analisi topologica

Una volta creato lo shapefile delle litologie ed importate in GIS anche le polilinee rappresentanti le lineazioni tettoniche si è passati alla definizione degli attributi alfanumerici delle future class considerate. Allo scopo sono state create due tabelle in Microsoft Access, (una per ogni future class), contenenti le informazioni afferenti ad ogni litologia ed alle diverse linee tettoniche. La tabella è stata importata in ArcGIS e successivamente è stata collegata alle future class mediante un join utilizzando il codice ID di ogni singolo elemento. Quindi, tramite il comando “Export Data” è stato creato un nuovo shapefile con gli attributi completi pronto per essere importato nel Geodb.

In particolare la tabella degli attributi relativa alla future class “litologie” contiene i seguenti campi:

- Id_lito: numero identificativo dell’unità cronostratigrafica;

- Litologie: qui sono contenute le informazioni relative alle caratteristiche litologiche e tessiturali delle unità dalle quali si può in prima battuta risalire alla potenziale carsificabilità delle stesse;
- Età: il campo riporta l'età delle diverse unità;
- Potenza: riporta la potenza della stratificazione laddove le unità non hanno aspetto massiccio.

Ogni poligono rappresentante una particolare litologia riporta quindi nella relativa tabella degli attributi tutte le informazioni necessarie per definire se si tratta di un'unità potenzialmente carsificabile.

Il risultato finale ottenuto è riportato in figura 3.7. dove oltre alle unità cronostratigrafiche sono riportate le principali lineazioni tettoniche.

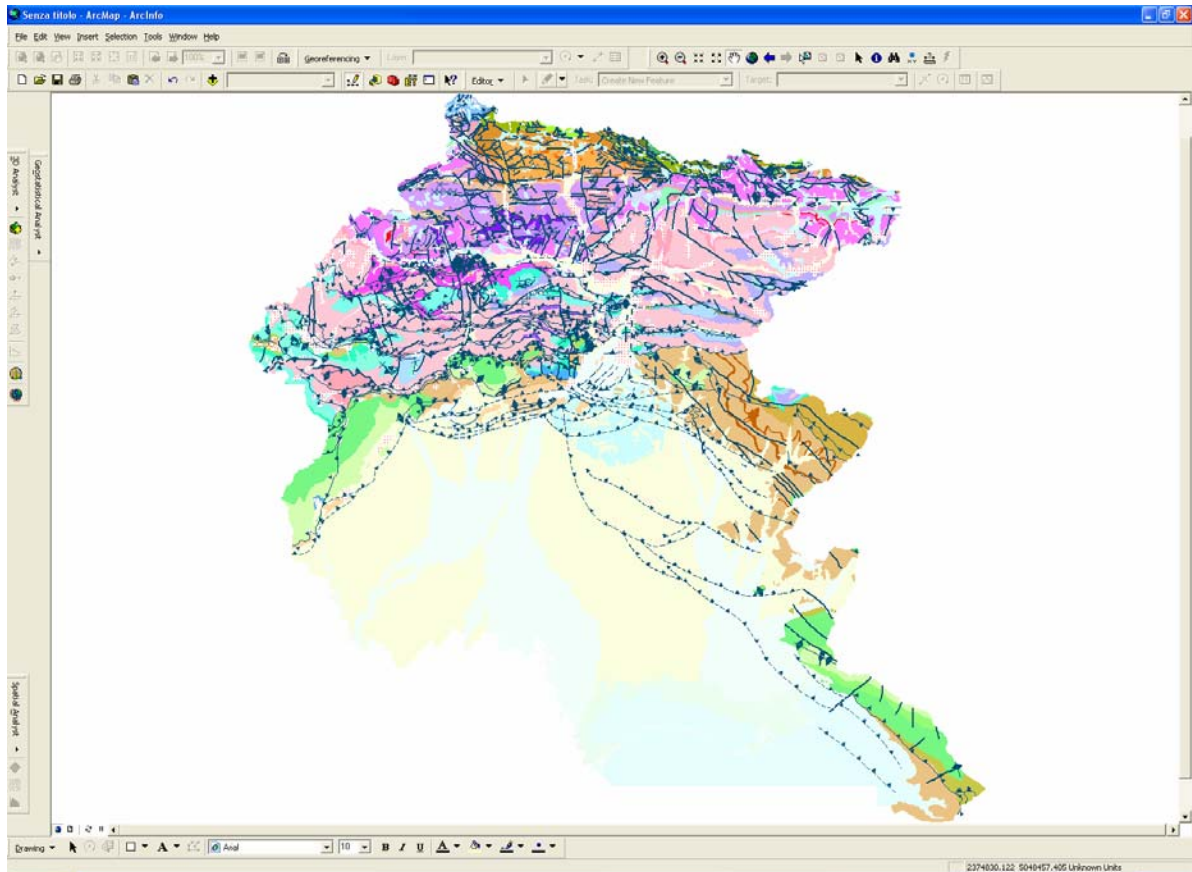


Figura 3.7: la carta geologica corretta importata in ArcGIS.

3.2 Grotte

La Regione Friuli Venezia Giulia dispone dal 1966 di un Catasto Regionale delle Grotte, dal 2002 anche in formato informatico (Access), facilmente consultabile, in cui sono archiviati i dati descrittivi generali delle cavità rilevati dagli speleologi (tra cui: le quote dell'ingresso e del fondo, la profondità, lo sviluppo planimetrico, note varie, ecc). Ad oggi risultano schedate nel catasto oltre 7.000 cavità.



Figura 3.8: menù principale del Catasto regionale delle grotte utilizzato

Per evitare un inutile appesantimento del geodb, con conseguente aumento della probabilità di errore, è stata effettuata un 'analisi dell'intero database al fine di scegliere quali tra i numerosi attributi presenti in catasto potessero risultare utili per le finalità proposte.

Fra tutti i dati disponibili è stato deciso di limitarsi alle caratteristiche geodetiche e topografiche delle posizioni delle cavità (sistema di riferimento, tipo di coordinate e

metodo utilizzato dagli speleologi nel posizionamento), in quanto indicative della loro affidabilità. Essa infatti varia da pochi metri nel caso dell'utilizzo di un GPS differenziale, a diverse centinaia di metri, nel caso di triangolazioni (non professionali) e utilizzo di coordinate geografiche. Quindi le cavità inserite nel geodb presentano i seguenti attributi:

- **Numero regionale:** Identificativo della cavità;
- **Numero dell'ingresso:** gli ingressi appartenenti ad un'unica cavità vengono identificati nel catasto da un numero progressivo. Si tratta di un dato fondamentale di cui poter disporre quando è necessaria l'individuazione di un unico ingresso per cavità, come nel caso del calcolo della densità degli ingressi, o per l'analisi della distribuzione geografica delle grotte in base alla loro tipologia, in modo da non ottenere risultati fuorvianti (una grotta con tre ingressi può partecipare all'elaborazione per tre volte!);
- **Numero identificativo:** indice appositamente creato per poter indicare con un unico valore il numero regionale ed il numero d'ingresso di una cavità;
- **Nome della cavità;**
- **Tipo di coordinate - affidabilità:** le posizioni delle cavità catastate presentano sistemi di riferimento e tipologia di coordinate differenti, a seconda del momento storico ed alla metodologia impiegata nel rilevamento. Si tratta di un dato molto importante, che quindi viene inserito nel geodb per il suo significato di affidabilità; in base alla situazione riscontrata da un'analisi della situazione delle posizioni del catasto, per il campo in questione sono state decise le seguenti possibilità:
 - ◆ WGS84 - GPS differenziale: posizione rilevata con un GPS differenziale; affidabilità metrica;
 - ◆ Roma40 - Gauss-Boaga: posizione rilevata con metodi topografici strumentali non professionali (bussola, inclinometro, cordella metrica); base cartografica Elementi CTRN 1:5000; affidabilità metrica;
 - ◆ Roma40 - coordinate geografiche: si tratta delle prime cavità rilevate (fine 1800) e probabilmente posizionate con triangolazioni non professionali; affidabilità: diverse centinaia di metri;

- ◆ ED50 - coordinate geografiche: posizione rilevata probabilmente attraverso triangolazione non professionale, con base cartografica Elementi CTR 1:5000 (anni '70); affidabilità: diverse centinaia di metri;
- ◆ Bibliografia 1 :5000: posizione rilevata "a mano" su base cartografica Elementi CTRN 1:5000; affidabilità: decine di metri.
- **Coordinate convertite e software utilizzato:** tutte le posizioni delle cavità devono essere espresse in Roma40 - Gauss-Boaga; di conseguenza è stato necessario effettuare una conversione tra sistemi differenti (ED50 - Roma40) o tra tipi di coordinate (da geografiche a piane), a seconda del dato presente in catasto. In base ai software attualmente disponibili per la conversione di coordinate è possibile scegliere tra:
 - ◆ Verto2 (programma dell'IGM, attualmente il più affidabile);
 - ◆ CartLab;
 - ◆ ArcGIS;
 - ◆ MapInfo.

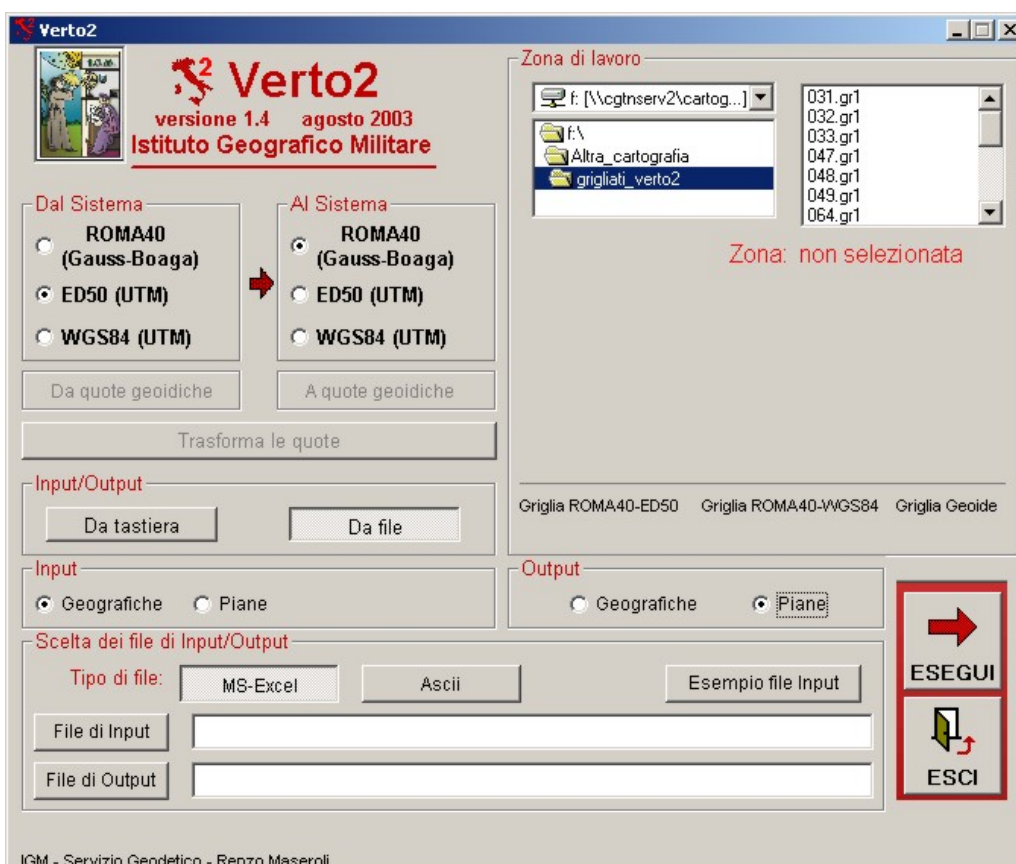


Figura 3.9: interfaccia del software Verto utilizzato all'occorrenza per la conversione delle coordinate

- **Quota ingresso;**
- **Quota fondo;**
- **Sviluppo planimetrico:** rappresenta lo sviluppo della cavità misurato sulla rappresentazione in pianta che riporta le parti orizzontali e le proiezioni delle parti più o meno inclinate della cavità;
- **Profondità:** corrisponde al dislivello totale della cavità e cioè alla differenza di quota tra il punto con altitudine più elevata (che non necessariamente corrisponde con la quota dell'ingresso o di uno degli ingressi) ed il punto più profondo esplorato (fondo).
- **Indice di sviluppo:** è un indice morfometrico dato dal rapporto tra sviluppo planimetrico e profondità. Sulla base di questo valore che può variare tra 0 e $+\infty$ le cavità possono essere distinte in tre principali tipologie che si differenziano appunto

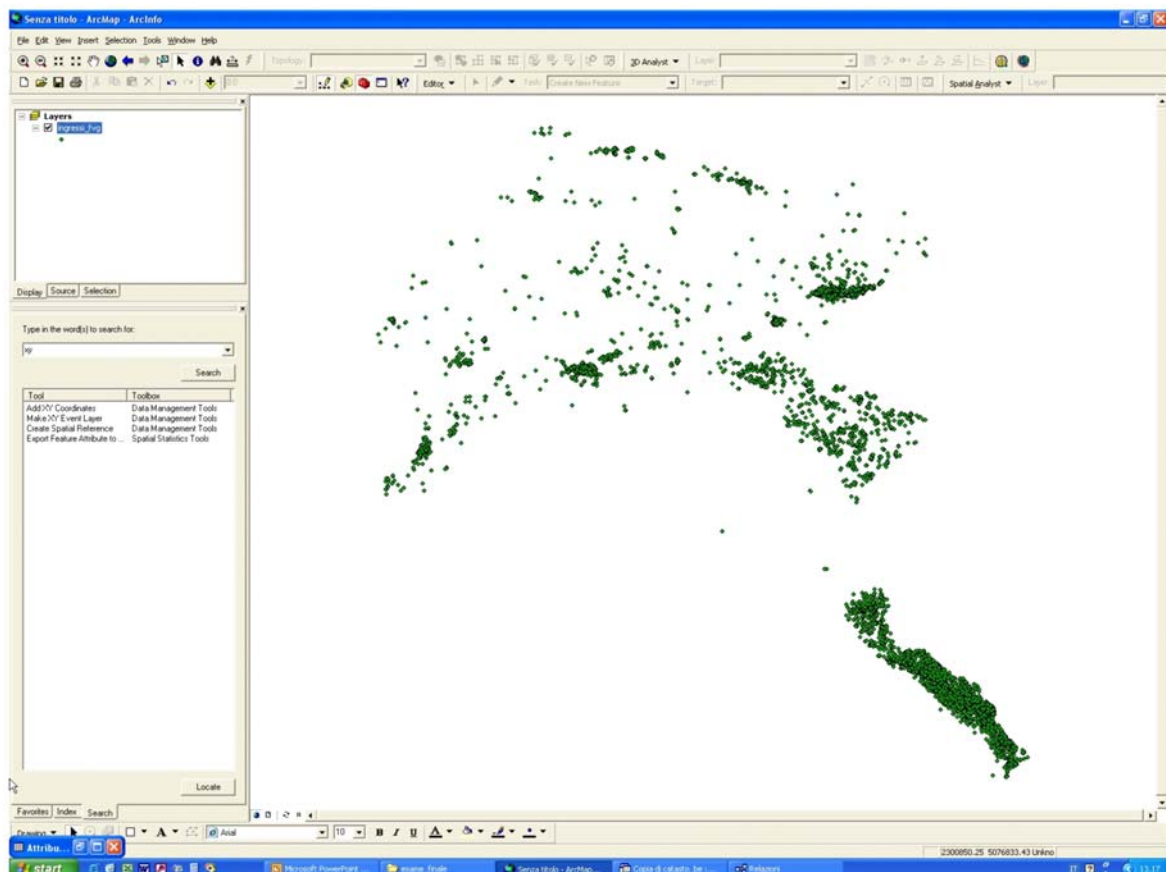


Figura 10: lo shapefile grotte; ogni punto rappresenta una cavità

per le caratteristiche di sviluppo le quali possono fornire anche delle indicazioni genetiche:

- ◆ Cavit  prevalentemente verticale: l'indice di sviluppo   minore di 0,7
- ◆ Cavit  prevalentemente orizzontale: l'indice di sviluppo   maggiore a 1,3
- ◆ Cavit  complessa: l'indice di sviluppo   compreso tra 0,7 e 1,3.

I valori che consentono di identificare le diverse classi sono stati definiti effettuando un'attenta disamina di numerosi rilievi di cavit  afferenti alle diverse tipologie morfometriche individuate.

Una volta estratti i dati di interesse dal Catasto Regionale delle Grotte mediante la creazione di una tabella di access, la tabella stessa   stata importata in ArcGis e mediante il comando "Display xy data" sono stati creati i punti che rappresentano gli ingressi delle cavit . Quindi l'evento temporaneo di ArcGis   stato esportato creando il nuovo shapefile "grotte" caratterizzato dagli attributi scelti pronto per essere importato nel geodb.

3.3 Idrografia superficiale

Si   scelto di inserire nel Geodb anche questo tematismo poich  esso risulta utile innanzitutto per individuare con maggior definizione le aree carsiche partendo dal presupposto che territori che ospitano fenomenologie carsiche sono caratterizzati nella maggior parte dei casi dalla totale assenza di corsi d'acqua superficiali. In secondo luogo tale tematismo pu  consentire di estrapolare delle informazioni riguardanti le caratteristiche di permeabilit  di particolari litologie sede di fenomeni carsici.

In questo caso i dati di interesse per le finalit  del lavoro sono stati estratti da alcuni file shape gentilmente forniti dal Servizio Idraulica della Direzione Centrale Ambiente e Lavori Pubblici della Regione Friuli Venezia Giulia. L'estrazione   avvenuta semplicemente estrapolando i dati relativi a corsi d'acqua naturali e tralasciando quelli artificiali ed inoltre eliminando alcuni campi della tabella degli attributi non reputati utili per le finalit  del lavoro.

Gli attributi dello shapefile cos  creato sono:

- **Denominazione:** denominazione del corso d'acqua

- **Codice_FVG:** si tratta di un codice identificativo univoco per ogni singola asta fluviale.

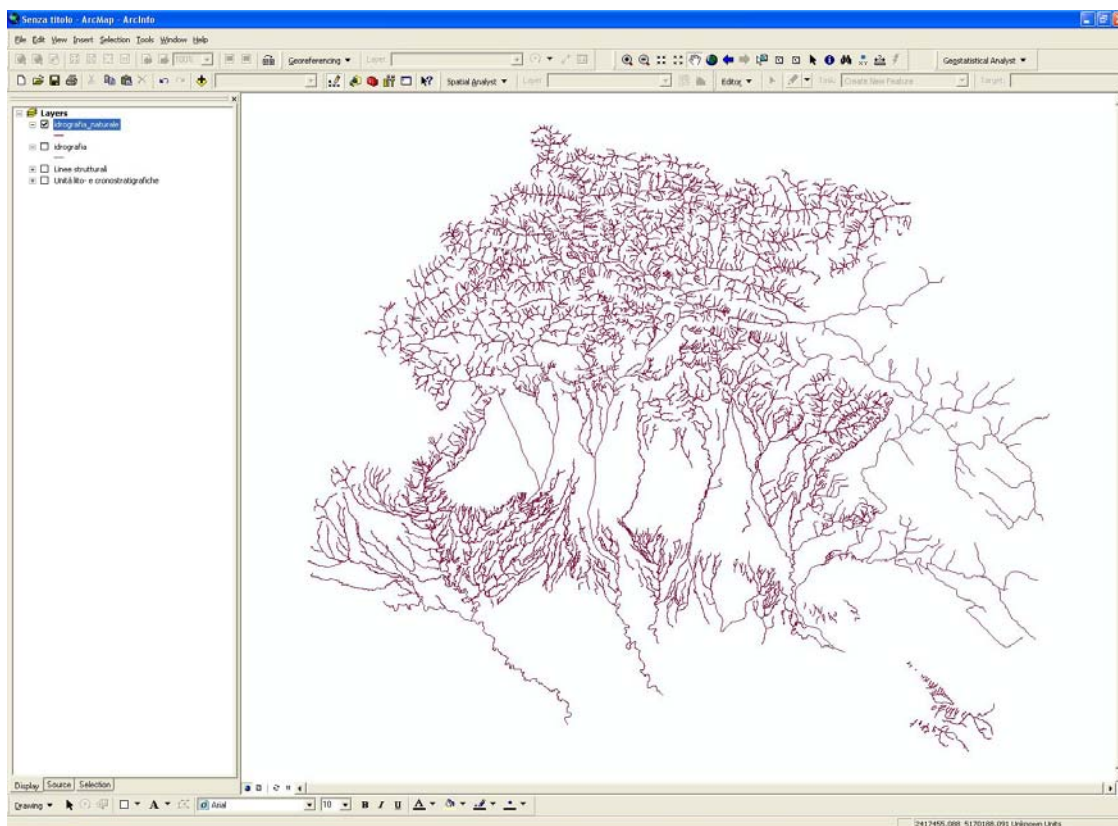


Figura 3.11: lo shapefile idrografia superficiale

3.4 Doline

Rappresentano uno degli aspetti più caratteristici di un paesaggio carsico. L'individuazione delle doline è stata effettuata grazie alla Carta Tecnica Regionale Numerica della Regione Friuli Venezia Giulia disponibile anche in formato CAD. Tra i vari tematismi presenti esiste infatti un blocco riferito al layer "1P000DE" alias depressione, che indica appunto la parte più profonda di tutte le depressioni della superficie topografica dislocate nel territorio regionale. In particolare i punti corrispondenti alle depressioni sono stati estrapolati dalla CTRN mediante una query in ambiente CAD effettuate sulle "carte associate" rappresentate dai singoli elementi della CTRN stessa.

La query di estrazione è stata scritta come segue:

```
(setq ade_cmddia_before_qry (getvar "cmddia"))
(setvar "cmddia" 0)
(ade_qryclear)
(ade_qrysettype "draw")
(ade_qrydefine '(" "" "" "" "Property" ("layer" "=" "1P000DE"))')
(setvar "cmddia" ade_cmddia_before_qry)
```

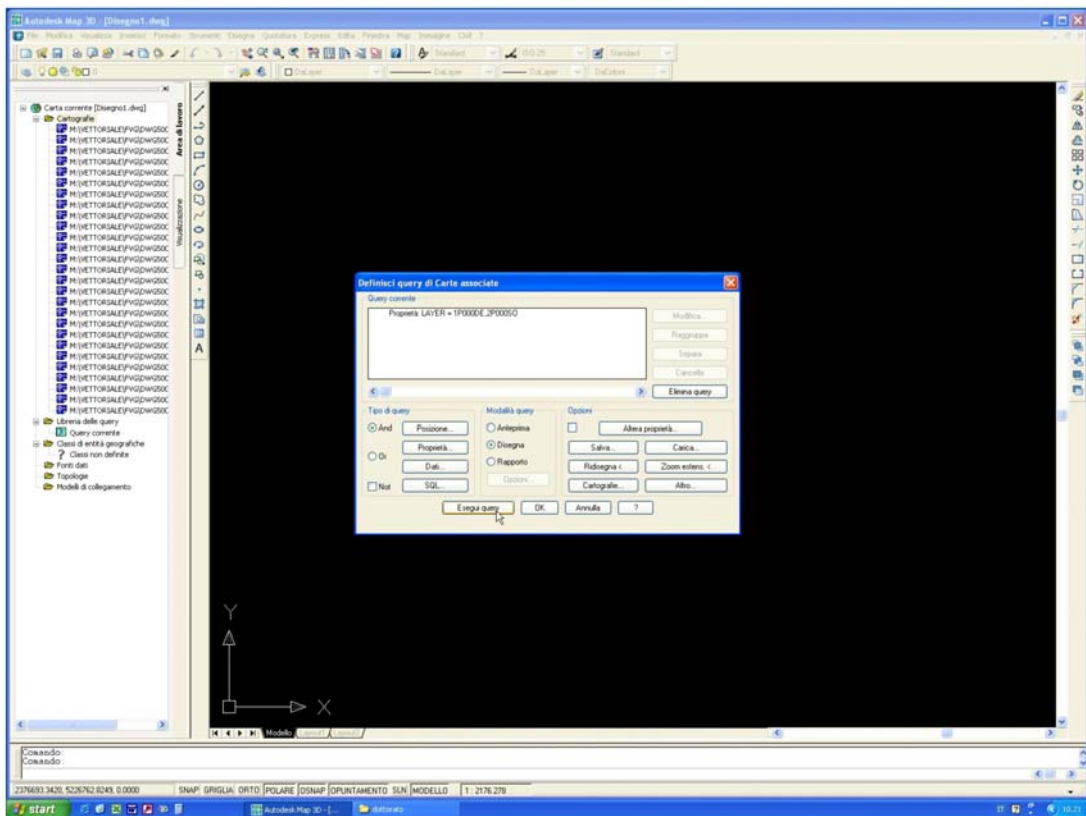


Figura 3.12: esecuzione della query in CAD per l'estrazione dei blocchi depressione

In tutto sono stati così analizzati oltre 700 elementi cartografici ed estratti in totale 13546 punti. Ovviamente non tutti i punti estrapolati rappresentano delle doline, perché una depressione della superficie topografica può avere anche un altro significato geomorfologico.

Le zone a maggiore densità di depressioni indicano con grande probabilità l'esistenza di un'area carsica.

Una volta estratti i punti corrispondenti alle depressioni sono stati definiti gli attributi del tematismo “doline”. In particolare oltre al codice ID sono stati scelti i seguenti campi:

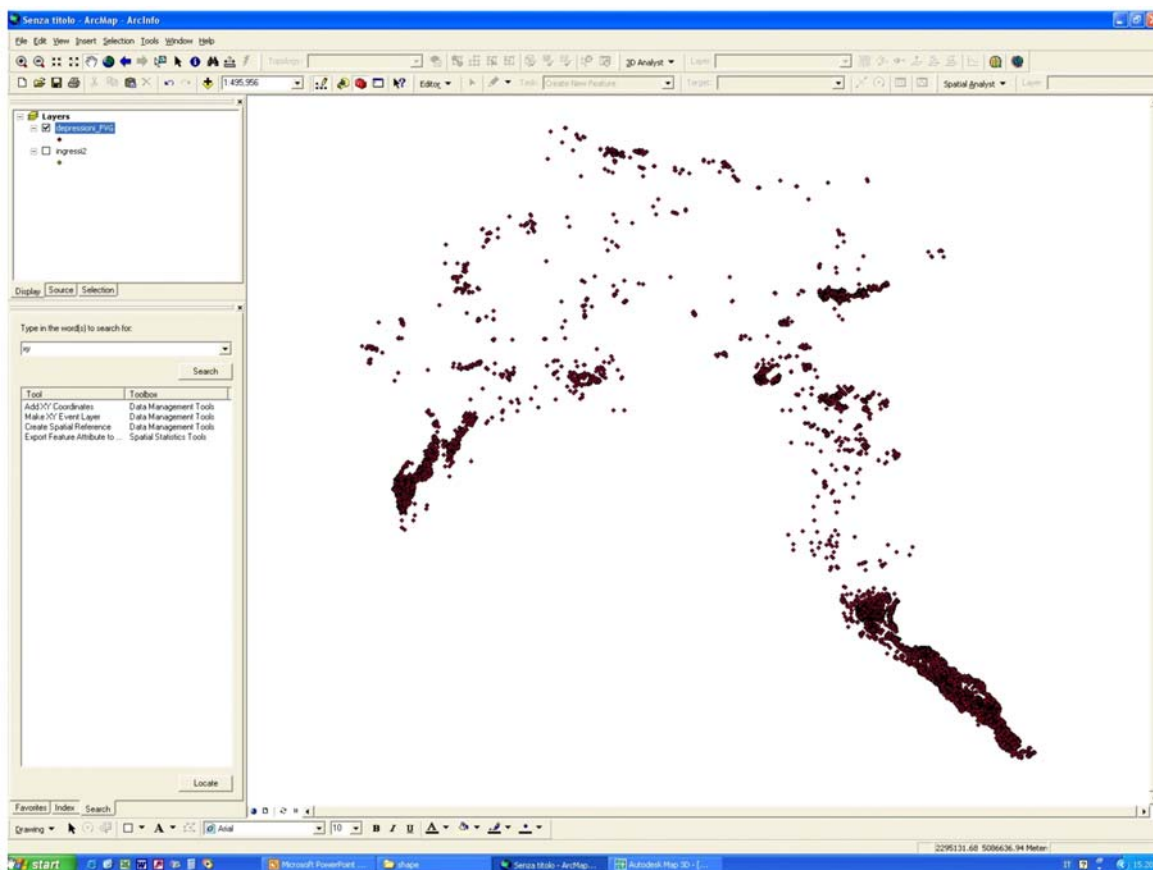


Figura 3.13: distribuzione delle depressioni nel territorio regionale

- **Perimetro**
- **Area**
- **Genesi:** in base alla morfologia della dolina è possibile ipotizzarne la genesi che può essere dissoluzione oppure crollo.
- **Profondità:** differenza di quota tra la quota media del bordo e la quota del fondo
- **Asse maggiore**
- **Asse minore**

In questo caso i campi del database non sono sempre compilati, anche perché sarebbe risultato molto oneroso ricavare per tutte le doline esistenti sul territorio i parametri considerati. Per alcune doline i campi sono stati compilati tramite opportuni rilevamenti in

campagna effettuati ad hoc, in altri casi le informazioni sono state estrapolate da banche dati in possesso del DiSGAM; in altri casi ancora (la maggior parte) i campi sono rimasti vuoti per cui sussiste solamente un'informazione di esistenza e posizione della dolina, che per quanto semplice sia risulta comunque un'informazione importante.

Anche in questo caso il tematismo è stato importato in ArcGIS creando lo shapefile doline approntato per essere importato nel geodatabase.

3.5 Sorgenti

Un area carsica spesso alimenta sorgenti caratterizzate da portate cospicue e caratterizzate da un preciso comportamento idrodinamico e da precise caratteristiche geochimiche delle acque. Le peculiarità di una determinata sorgente possono quindi consentire di capire se essa fa capo ad un'area carsica e per contro l'ubicazione della sorgente può consentire di definire l'estensione dell'area carsica ed i suoi confini idrologici.

Per questi motivi, ed anche perché uno degli scopi del lavoro è quello di fornire un supporto informatico che consenta una migliore gestione delle aree carsiche del Friuli Venezia Giulia anche in termini di protezione delle risorse idriche si è deciso di inserire nel geodatabase anche questo tematismo.

Allo scopo si è fatto riferimento a diversi archivi informatici in possesso del DiSGAM ed in particolare al database creato dal dott. Francesco Treu nell'ambito della sua Tesi di Dottorato al quale si rivolgono sentiti ringraziamenti.

In particolare il tematismo in questione contiene i seguenti attributi:

- **Denominazione:** nome della sorgente;
- **Coordinate:** ubicazione della sorgente espressa in coordinate metriche Gauss-Boaga Roma40;
- **Quota:** quota della sorgente;
- **Tipo di sorgente:** viene indicata la tipologia di sorgente sulla base della classificazione di Civita;
- **Portata media della sorgente;**
- **Temperatura media**
- **Conducibilità media**

- **Chimismo:** viene riportata la formula ionica al fine di individuare in prima battuta il chimismo della sorgente.

Anche in questo caso è stato creato in ArcGis lo shapefile (“sorgenti”) approntato per essere importato nel geodatabase.

3.6 Limiti amministrativi

Si è reputato utile definire anche gli ambiti amministrativi nei quali ricadono le aree carsiche che verranno successivamente individuate. A tale fine è stato creato uno shapefile apposito i cui attributi sono rappresentati dai seguenti campi:

- **Codice Istat del Comune**
- **Nome del Comune**

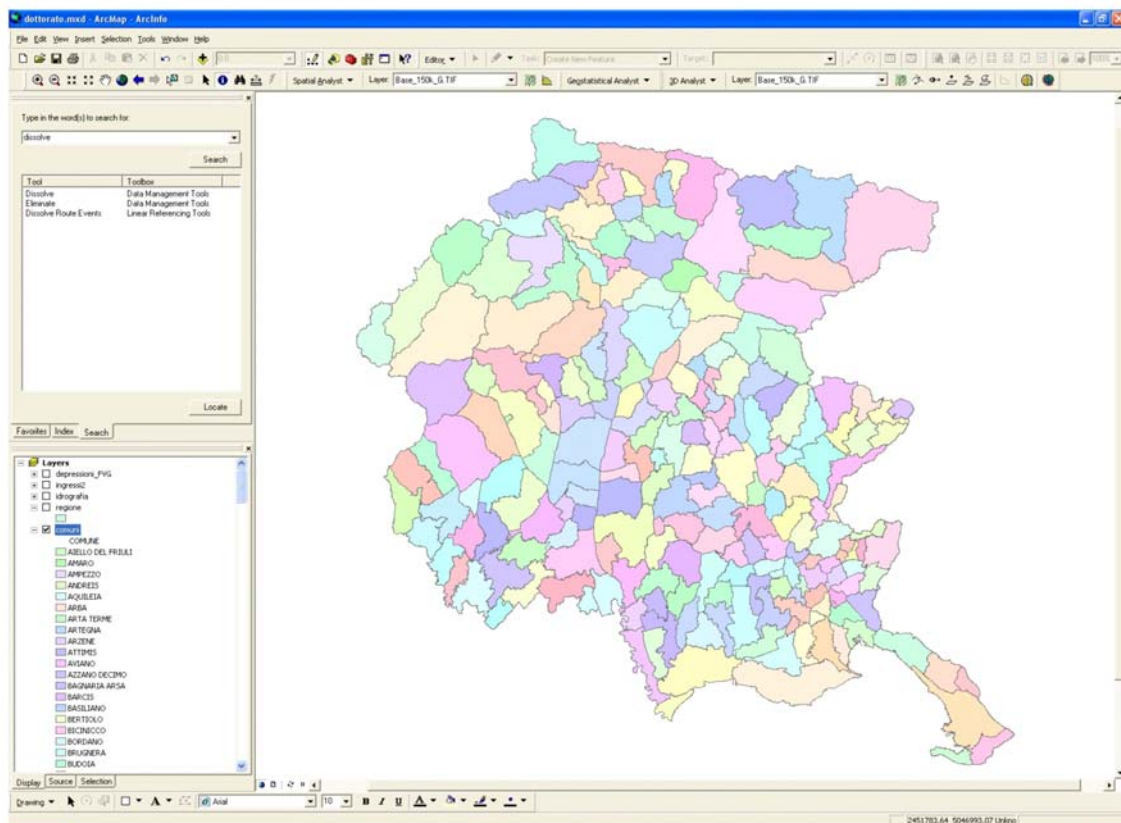


Figura 3.14: shapefile limiti amministrativi

3.7 Cartografia

Ai fini di successive elaborazioni si è reputato utile definire in maniera semplice e veloce quali sono gli elementi cartografici della Carta Tecnica Regionale Numerica che riguardano le aree che verranno successivamente individuate. A tale fine è stato creato uno shapefile apposito i cui attributi sono rappresentati dai seguenti campi:

- **Codice elemento**
- **Nome elemento**
- **Codice foglio**

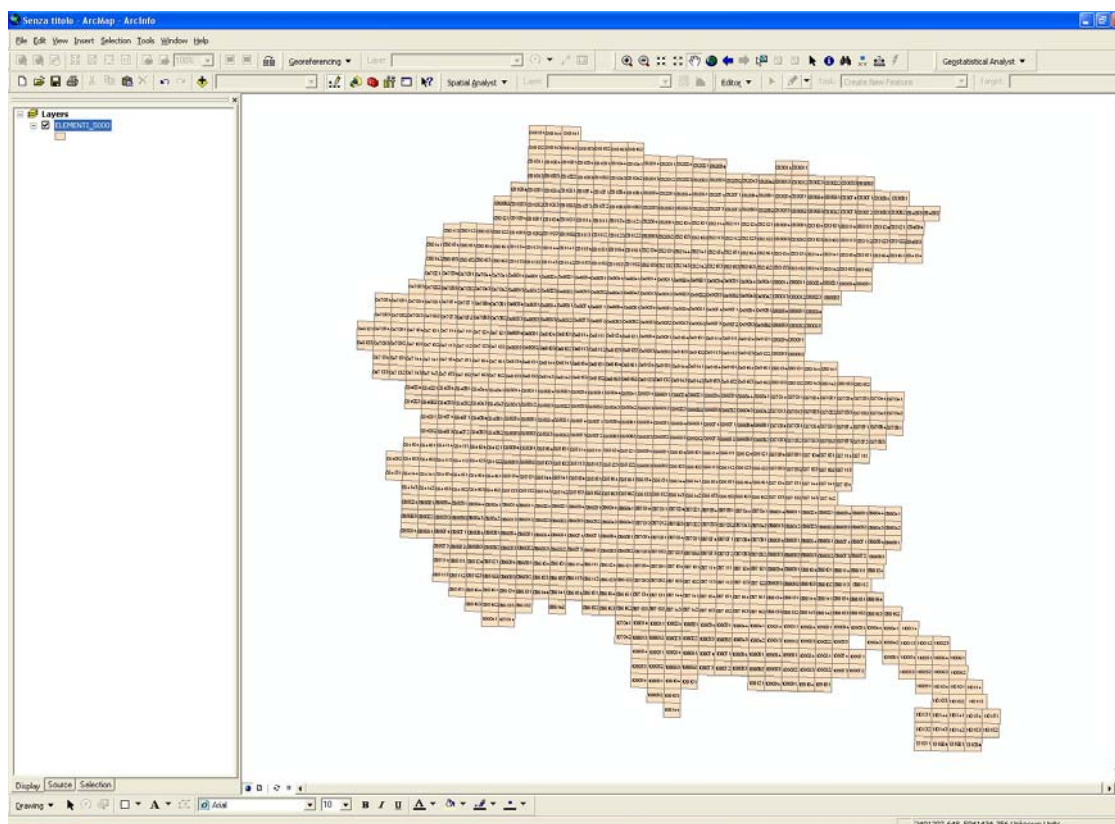


Figura 3.15: shapefile cartografia

3.8 Forme carsiche minori

Per dare maggior completezza alle informazioni riguardanti le aree carsiche che verranno individuate si è scelto di inserire un ulteriore livello tematico che riporta sottoforma di punti l'ubicazione di forme carsiche minori la cui presenza è determinabile solamente da rilevamenti appositi in situ.

Gli attributi dello shapefile che verrà creato ed importato del GDB definiscono semplicemente la tipologia di forma carsica come per esempio doline non visibili da cartografia, campi solcati, vaschette di dissoluzione ecc.

4 CREAZIONE DEL GEODATABASE

Un geodatabase è un database relazionale che contiene dati spaziali – geometrici e tabellari – alfanumerici ad essi associati. I dati geometrici possono essere di tipo vettoriale o raster e presentano sempre almeno una tabella di attributi associata.

In particolare un GDB può contenere:

- Tabelle: con dati alfanumerici, non di tipo spaziale, come la profondità di una cavità;
- Feature classes: dati geometrici che possono essere punti, linee o poligoni. Sono la rappresentazione geometrica del dato spaziale memorizzato: l'ingresso di una cavità può essere rappresentato e trattato nel GDB con un punto mentre una litologia con un poligono ed una linea tettonica con una linea;
- Feature datasets: sono dei contenitori di feature class (mai di tabelle) che condividono lo stesso sistema di riferimento e proiezione cartografica. Sono necessari per le topologie;
- Relationship classes: gestiscono relazioni tematiche tra le feature class e le tabelle;
- Topologies: relazioni spaziali all'interno o tra le feature class, utilizzate per verificare la correttezza spaziale dei dati e trovare eventuali errori, come ad esempio cavità in mare o all'esterno del confine di stato.
- Behaviour rules: possono essere create per definire i valori ammissibili per gli attributi degli oggetti (domini), o le relazioni tematiche e topologiche tra gli oggetti.

Il geodatabase creato, Friuli_karst.mdb è formato da alcune aree tematiche principali (feature dataset) in cui sono contenuti i dati geometrici (le feature class) relativi alle aree carsiche (litologie, doline, cavità, etc.).

Tutti i feature dataset presentano le proprietà riportate in figura ad eccezione di “Grotte”, per cui è stato impostato un Dominio Z differente che permette l'inserimento di dati di quota inferiore al livello del mare; ciò è da ricercare nel fatto che in regione sono presenti

diverse cavità che si sviluppano sotto il livello marino, come per esempio il Complesso delle Risorgive del Timavo, che raggiunge i -70 m s.l.m.

Il sistema di riferimento scelto per il progetto è “Monte_Mario_Italy_2” di ArcGIS, che corrisponde al sistema Roma 40 – Gauss-Boaga; il Dominio X/Y è stato scelto in modo da consentire l’inserimento di dati nel dominio territoriale della regione Friuli Venezia Giulia.

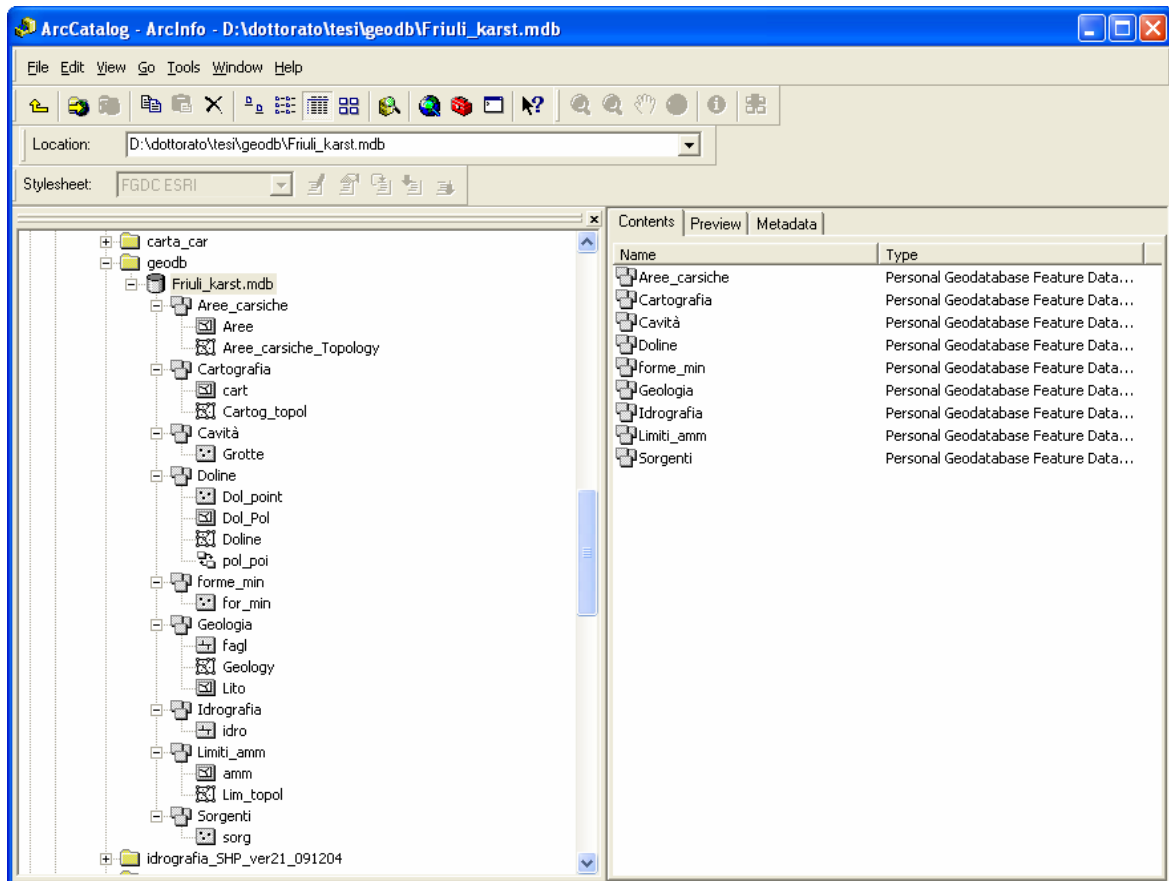


Figura 4.1: il geodatabase “Friuli_karst”

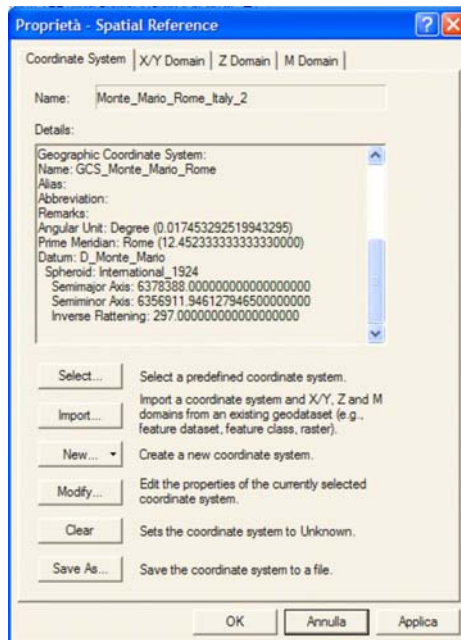


Figura 4.2: Sistema di riferimento dei feature dataset

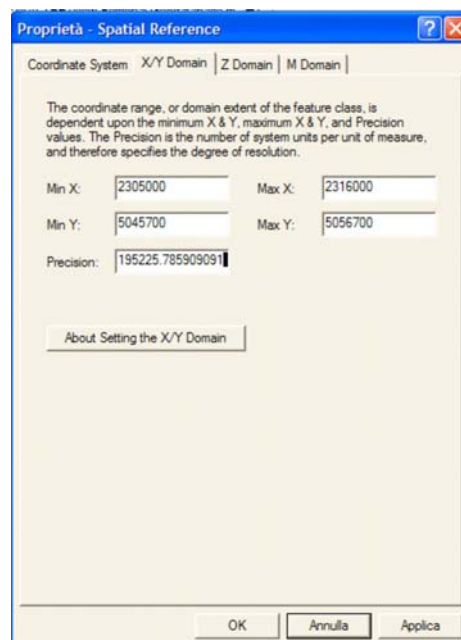


Figura 4.3. Dominio X/Y dei feature dataset

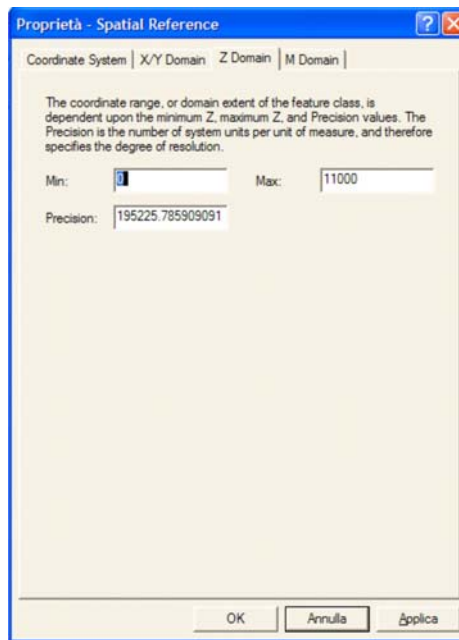


Figura 4.4: Dominio Z dei feature dataset

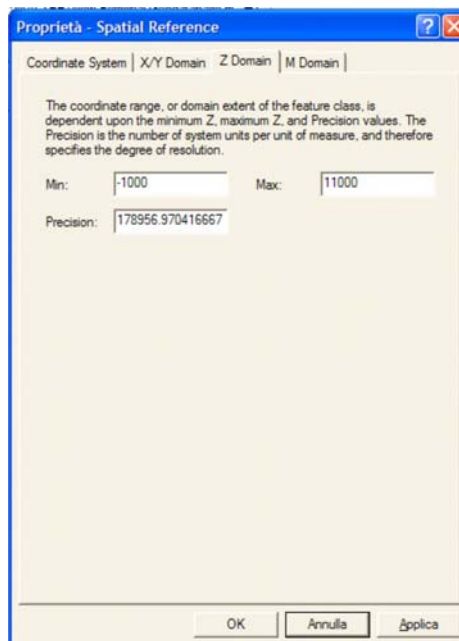


Figura 4.5: Dominio Z del feature dataset Cavità

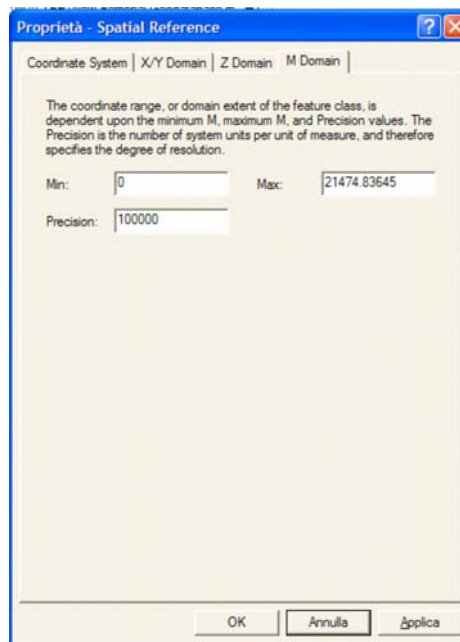


Figura 4.6: Dominio M dei feature dataset

4.1 Dati geologici

Per contenere i dati relativi alla geologia è stato creato il feature dataset “Geologia”. Esso contiene due feature class:

- **feature class “Lito”**
- **feature class “fagl”**

La prima feature class contiene dati poligonali che corrispondono alle aree di affioramento delle diverse litologie presenti. I dati contenuti da questa feature class sono stati importati dallo shapefile di cui al paragrafo 3.1.

La feature class “fagl” contiene invece dati lineari che corrispondono alle discontinuità tettoniche presenti. Anche in questo caso i dati presenti nella feature class sono stati importati dallo shapefile di cui al paragrafo 3.1.

Per assicurare l’integrità spaziale tra gli elementi appartenenti alla feature class Lito è stata creata una topology denominata “Geology”. Le topology rule inserite sono “Must Not

Overlap” e Must Not Have Gap” per assicurare che vi sia piena coincidenza tra i bordi dei poligoni contigui all’interno della feature class “Lito”.

4.2 Cavità

Per l’archiviazione dei dati inerenti le cavità è stato creato il feature dataset “Cavità” che contiene solamente la feature class “Grotte”. Essa è caratterizzata dagli stessi campi riportati nel paragrafo 4.2. I dati della feature class sono stati importati dallo shapefile “grotte” di cui al medesimo paragrafo.

4.3 Idrografia

Per l’archiviazione dei dati inerenti l’idrografia superficiale è stato creato il feature dataset “Idrografia” che contiene solamente la feature class “idro”. Essa è caratterizzata dagli stessi campi riportati nel paragrafo 3.3. I dati della feature class sono stati importati dallo shapefile “idrografia_superficiale” di cui al medesimo paragrafo.

4.4 Doline

Per l’archiviazione dei dati geometrici e per la definizione delle regole topologiche riguardanti le doline è stato creato il feature dataset “Doline”.

Per la rappresentazione geometrica dei dati spaziali delle doline sono state utilizzate 2 feature class:

- “Dol_pol”: contiene tutti i dati relativi alla dolina
- “Dol_point”: punti che rappresentano la localizzazione delle doline attraverso una feature class puntuale, che risulta comunque indispensabile per alcune elaborazioni come per esempio il calcolo della densità.

La feature class “Dol_Pol” oltre ai campi creati automaticamente da ArcGIS (Objectid, Shape, Shape_Lenght e Shape_Area) presenta i campi riportati nel paragrafo 3.4. Ogni campo in realtà è contraddistinto da un nome sintetico perché durante alcune elaborazioni e per esempio in concomitanza di join, nomi troppo lunghi non vengono visualizzati e quindi non è sempre possibile riconoscerlo e procedere con le elaborazioni. Il campo idol è il numero identificativo delle doline e viene utilizzato come campo

chiave per le relazioni con le altre features. I dati contenuti in questa feature class sono stati importati dal shapefile di cui al capitolo 3.4.

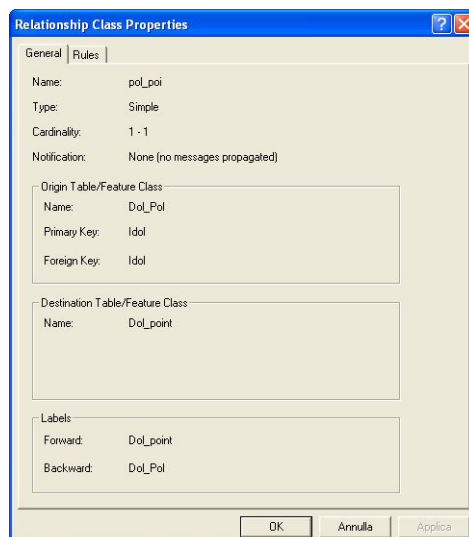


Figura 4.7 Proprietà delle relazioni tra le feature class del feature dataset “Doline”.

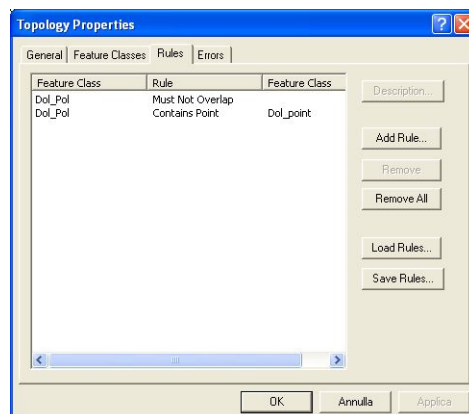


Figura 4.8: Regole topologiche della topologia “doline”

La feature class “Dol_point” riporta con punti la posizione delle doline in modo da poter usufruire degli strumenti di analisi spaziale di ArcMap che necessitano di questa entità geometrica (come ad esempio la densità). Contiene il campo “idol” che è l’identificativo della dolina e viene utilizzato come campo chiave per i collegamenti con le altre feature del GDB. I dati contenuti in questa feature class sono stati importati dallo shapefile di cui al capitolo 3.4.

Nel feature dataset “Doline” è stata inoltre creata la relationship class “pol_poi” al fine di collegare, tramite il campo chiave “idol” le due feature class “dol_point” e “dol_pol”. Nel feature dataset doline è stata creata anche una topology denominata “Doline” alla quale partecipano entrambe le feature class create. La topology è stata creata per verificare e ottenere l’integrità tra le feature class. Con la rule “Must not Overlap” si impone che gli elementi di “dol_pol” non devono sovrapporsi. Con la rule “Contains Point” si impone che i poligoni che rappresentano quelle doline delle quali si possiede il dato di sviluppo areale debbano contenere un punto, che rappresenta la dolina stessa.

4.5 Sorgenti

Per l’archiviazione dei dati inerenti le sorgenti è stato creato il feature dataset “Sorgenti” che contiene solamente la feature class “sorg”. Essa è caratterizzata dagli stessi campi riportati nel paragrafo 3.5. I dati della future class sono stati importati dallo shapefile “sorgenti” di cui al medesimo paragrafo.

4.6 Limiti amministrativi

Per l’archiviazione dei dati inerenti i limiti amministrativi è stato creato il feature dataset “limiti_amm” che contiene la feature class “amm”. Essa è caratterizzata dagli stessi campi riportati nel paragrafo 3.6. I dati della future class sono stati importati dallo shapefile “limiti_amministrativi” di cui al medesimo paragrafo.

Per verificare e ottenere l’integrità della feature class è stata creata la topology “Lim_topol” contraddistinta dalle rule “Must not Overlap” e “Must not have gap”.

4.7 Cartografia

Per l'archiviazione dei dati inerenti la cartografia è stato creato il feature dataset "Cartografia" che contiene la feature class "cart". Essa è caratterizzata dagli stessi campi riportati nel paragrafo 3.7. I dati della future class sono stati importati dallo shapefile "Cartografia" di cui al medesimo paragrafo.

Per verificare e ottenere l'integrità della feature class è stata creata la topology "Cartog_topol" contraddistinta dalle rule "Must not Overlap" e "Must not have gap".

4.8 Forme carsiche minori

Per l'archiviazione dei dati inerenti le forme carsiche minori è stato creato il feature dataset "forme_min" che contiene solamente la feature class "for_min". I dati della future class sono stati importati dallo shapefile "sorgenti" di cui al medesimo paragrafo.

4.9 Aree carsiche

Per contenere i dati spaziali e non solo pertinenti alle aree carsiche individuate (vedi capitolo successivo) è stato creato il feature dataset "aree_carsiche" che contiene la feature class "aree". I dati relativi a questa feature class sono stati digitalizzati direttamente in ArcGIS mediante i consueti strumenti di editing.

La feature class contiene i seguenti campi:

- Id_area: numero identificativo di ogni singola area carsica individuata.
- Nome_area: il nome dell'area carsica individuata.

Per assicurare l'integrità spaziale tra gli elementi appartenenti alla feature class è stata creata una topology denominata "aree_cars". La topology rule inserita è "Must Not Overlap" per assicurare che vi sia piena coincidenza tra i bordi dei poligoni contigui.

5 INDIVIDUAZIONE DELLE AREE CARSIFICATE

Al fine di predisporre gli elementi per la creazione di un catasto delle aree carsiche della Regione Friuli Venezia Giulia si è innanzitutto cercato un criterio di individuazione e classificazione delle aree carsiche stesse. La definizione dei confini delle aree come vedremo è avvenuta tenendo conto principalmente di fattori di ordine idrogeologico e solamente in secondo luogo di ordine geomorfologico. Alcune aree carsiche però, pur risultando delle entità separate dal punto di vista idrogeologico costituiscono un unicum dal punto di vista geomorfologico trovandosi nel medesimo contesto geologico – strutturale e nel medesimo contesto geografico, elementi che hanno portato allo sviluppo di fenomenologie carsiche di aspetto e caratteristiche molto simili. Per questo motivo si è pensato di creare un'entità poi denominata “superarea” che raggruppasse aree con caratteristiche simili. Nei criteri di classificazione delle aree carsiche è inoltre sembrato corretto tenere conto anche di aspetti di natura più prettamente geografica.

Sulla base di questi presupposti è stata utilizzata la metodologia di seguito esposta per classificare le aree carsiche individuate.

5.1 Metodologia di suddivisione delle aree carsiche

Definendo quali sono i parametri che caratterizzano un'area carsica, è stata progettata una procedura che attraverso successive fasi andasse sempre più a fondo nelle caratteristiche della zona.

Sono state così create quattro “classi” di dettaglio.

- Provincia geografica
- Sottoprovincia Geografica
- Superarea
- Area

Le “classi” possono essere espresse graficamente con un diagramma a piramide, dalla seguente struttura.

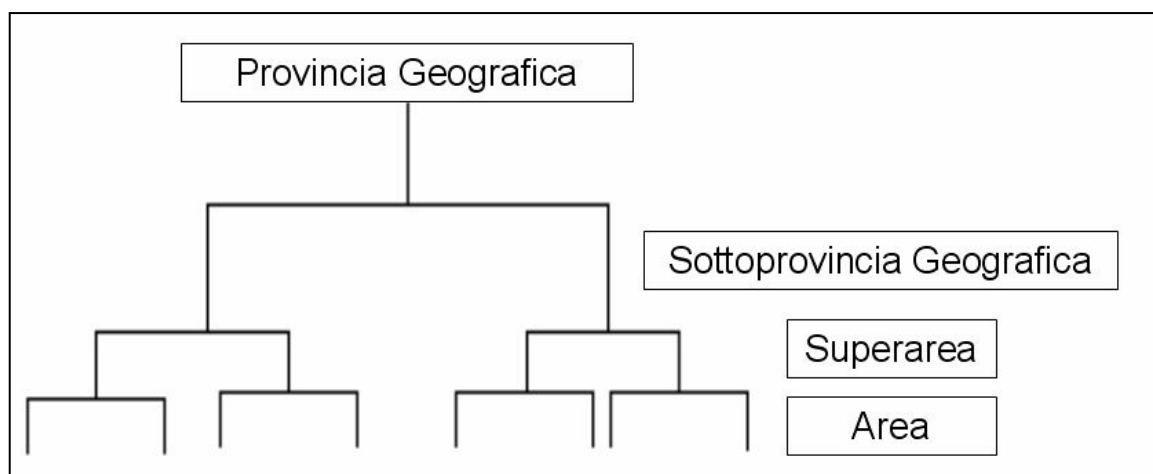


Figura 5.1 Diagramma a piramide che descrive il criterio di classificazione e suddivisione adottato

La procedura sintetizzata da questo diagramma è stata elaborata per consentire di raggiungere il livello di conoscenza il più possibile dettagliato ed approfondito senza perdere di vista la visione d'insieme.

Tutto questo conservando la maggiore flessibilità possibile, essendo stato concepito come una struttura aperta che lascia la possibilità di ulteriori approfondimenti.

5.1.1 Provincia Geografica

Per Provincia Geografica si intende il nome, solitamente di natura storica, con il quale viene identificata un'ampia superficie. In particolare sono state individuate le seguenti province geografiche:

- Prealpi Carniche
- Prealpi Giulie
- Alpi Carniche
- Alpi Giulie
- Carso

5.1.2 Sottoprovincia geografica

Suddivisione basata sulle diversità a grandi linee della litologia e dell'idrogeologia presenti. Con questo principio nel nostro caso sono state ottenute 10 entità identificabili

attraverso la loro posizione geografica nel Friuli Venezia Giulia. Queste entità possono anche essere distinte per la differente età delle formazioni considerate.

- **Prealpi Carniche:** Settentrionali, Centro Orientali e Centro Occidentali
- **Prealpi Giulie:** Meridionali e settentrionali
- **Alpi Carniche:** Orientali e occidentali
- **Alpi Giulie:** Settentrionali e meridionali
- **Carso**

5.1.3 Superarea

L'ulteriore suddivisione delle Sottoprovince va a creare delle ulteriori unità caratterizzate da una certa uniformità dal punto di vista geomorfologico, identificando così delle zone molto simili per quanto riguarda lo sviluppo del fenomeno carsico.

Le Sottoprovince Geografiche sono in questo caso state suddivise sulla base di limiti identificati da:

- ampie variazioni litologiche.
- consistenti cambiamenti nel numero e nella tipologia delle forme carsiche.
- presenza di forme tettoniche.

Oltre a questi elementi deve ritenersi peculiare il fatto che le Superaree non sono generalmente in stretto contatto tra di loro, cioè non presentano lunghi tratti di confine in comune.

5.1.4 Area

L'ultima suddivisione effettuata va a creare le unità fondamentali del lavoro e cioè le Aree. In questo caso sono stati presi in considerazione fattori di omogeneità dal punto di vista geologico dal punto di vista geomorfologico e dal punto di vista idrogeologico. Così facendo le Aree rappresentano degli elementi i cui confini rappresentano un limite alla circolazione idrica sotterranea.

I limiti delle Aree sono definiti dai seguenti fattori:

- Litologici per i quali si intende il contatto tra litologie caratterizzate da caratteristiche di permeabilità molto diverse.

- Tettonici la presenza di faglie sia orizzontali che verticali ma che abbiano un ampio rigetto, interagendo così con la circolazione idrica sotterranea.
- Morfologici per i quali si intendono ampie valli fluviali, spartiacque superficiali ecc.

5.2 Identificazione delle aree carsiche

Una volta approntato il geodatabase di cui si è discusso nel capitolo 4 ed una volta definiti i criteri di valutazione e classificazione proposti nei paragrafi precedenti si è potuto procedere all'individuazione delle aree carsiche nel territorio del Friuli Venezia Giulia. Per questa finalità sono stati digitalizzati i confini delle aree stesse mediante gli strumenti di editing disponibili in ArcGIS andando a compilare la feature class "aree" appartenente al GDB "Friuli_karst".

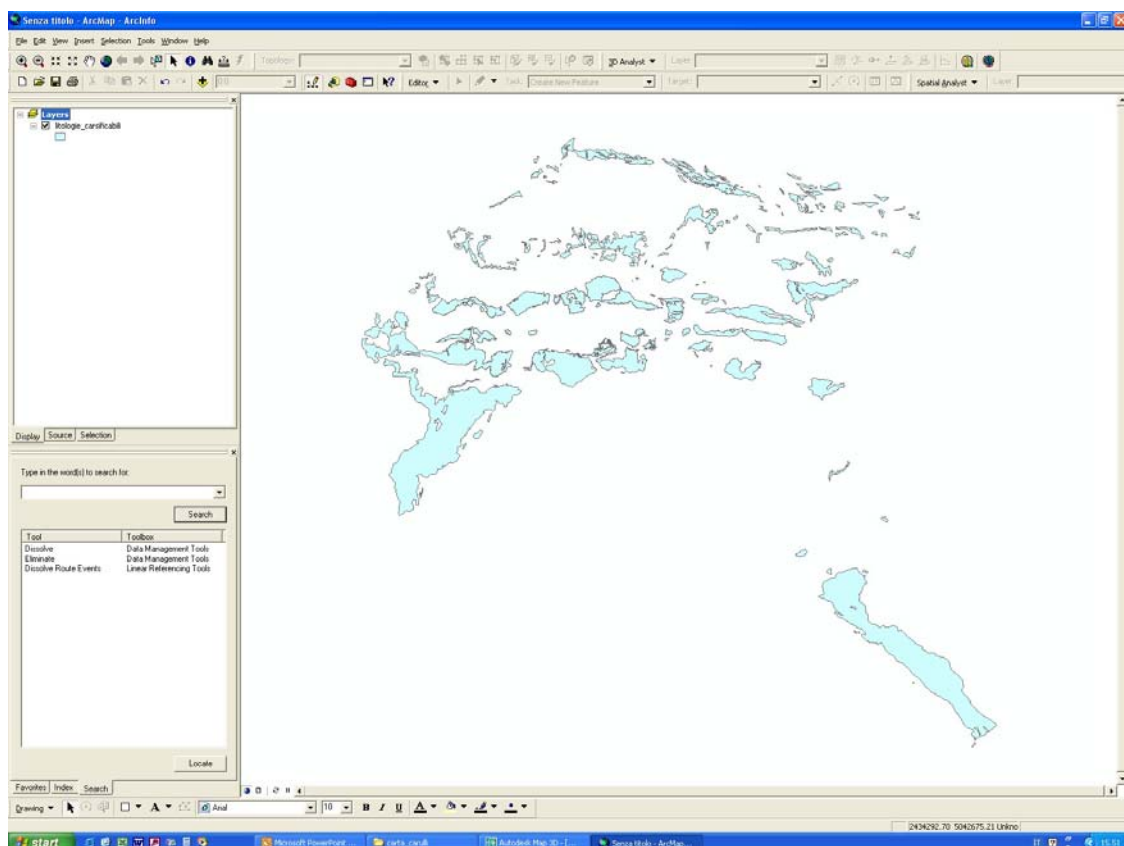


Figura 5.2: diffusione delle litologie calcaree nell'ambito del territorio regionale

Il riconoscimento delle aree carsiche e quindi la digitalizzazione dei loro confini è avvenuta secondo un preciso criterio secondo il quale un'area carsica viene considerata come una zona caratterizzata da peculiarità geomorfologiche omogenee ed è inoltre esprimibile come un'idrostruttura, cioè un insieme di più unità o formazioni geologiche aventi una certa unità spaziale e giaciturale ove si verificano le condizioni sufficienti per il deflusso e l'accumulo di acque sotterranee. I limiti dell'idrostruttura sono dati dai rapporti stratigrafici e/o tettonici con unità aventi un minore grado di permeabilità o diverse caratteristiche di permeabilità.

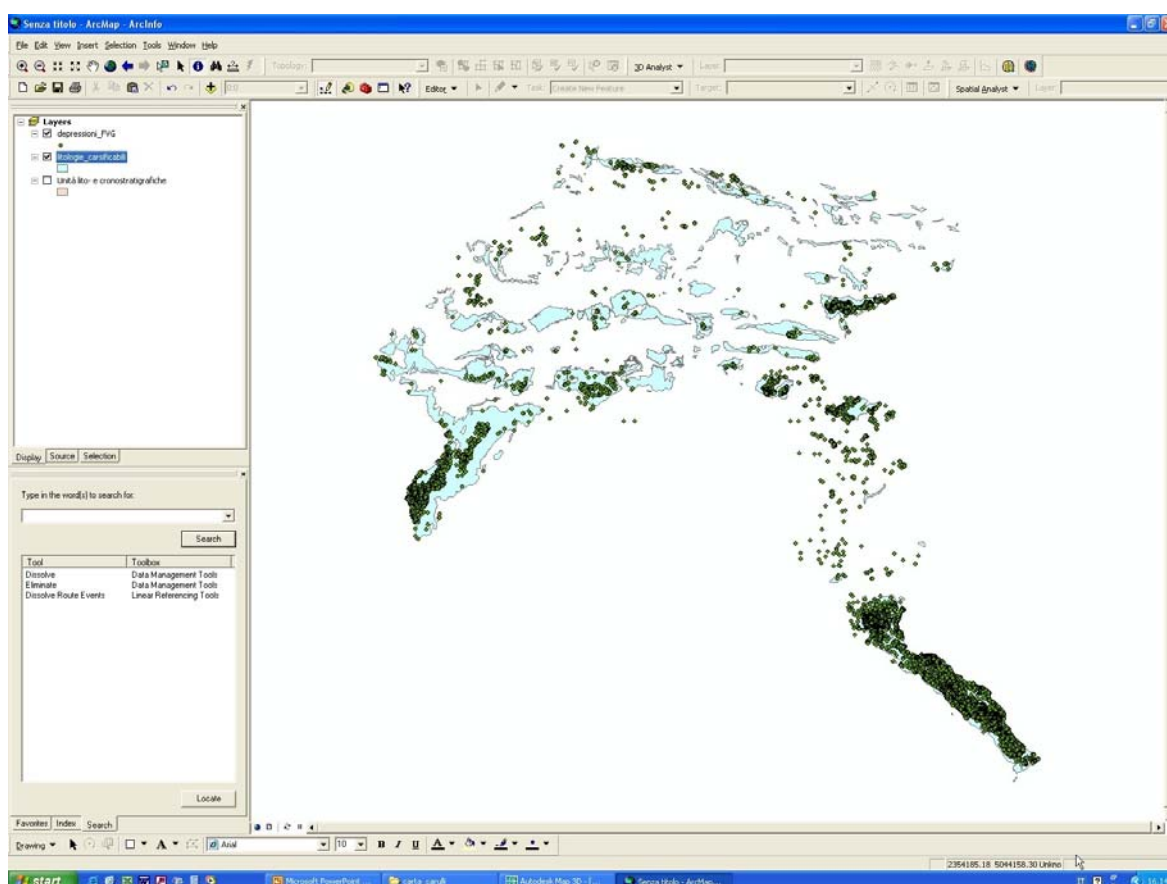


Figura 5.3: zone di affioramento delle litologie calcaree a confronto con l'ubicazione delle doline (depressioni)

Ai fini dell'individuazione dei confini delle aree carsiche sono stati utilizzati tutti i livelli disponibili del GDB creato.

Per individuare in prima battuta gli areali carsificati sono innanzitutto state definite le litologie carsificabili sulla base degli attributi alfanumerici della feature class "lito". A tale

fine è stato innanzitutto effettuato un dissolve dei poligoni della feature class “lito” secondo il campo Id_lito in modo tale da diminuire il numero di record della tabella degli attributi ed ottenendo così solamente un record per litologia. Inoltre è stato creato un nuovo campo per indicare se la formazione in questione è carsificabile o meno. Quindi sono state marcate come potenzialmente carsificabili tutte le unità cronostratigrafiche rappresentate da calcari. La scelta è avvenuta pur sapendo che fenomeni carsici possono sussistere anche in litologie dolomitiche. Le litologie dolomitiche nella Regione FVG presentano però una grandissima diffusione e solamente in minima parte sono caratterizzate dalla presenza di fenomeni carsici, che nella maggior parte dei casi sono comunque dovuti al fatto che le dolomie sono poste in contatto con calcari carsificati grazie ai quali si sono create le condizioni adatte anche alla carsificazione delle dolomie stesse. Su un totale di 7.978 km² di territorio regionale si è potuto comunque constatare che poco più di 1.000 km² sono coperti da rocce calcaree.

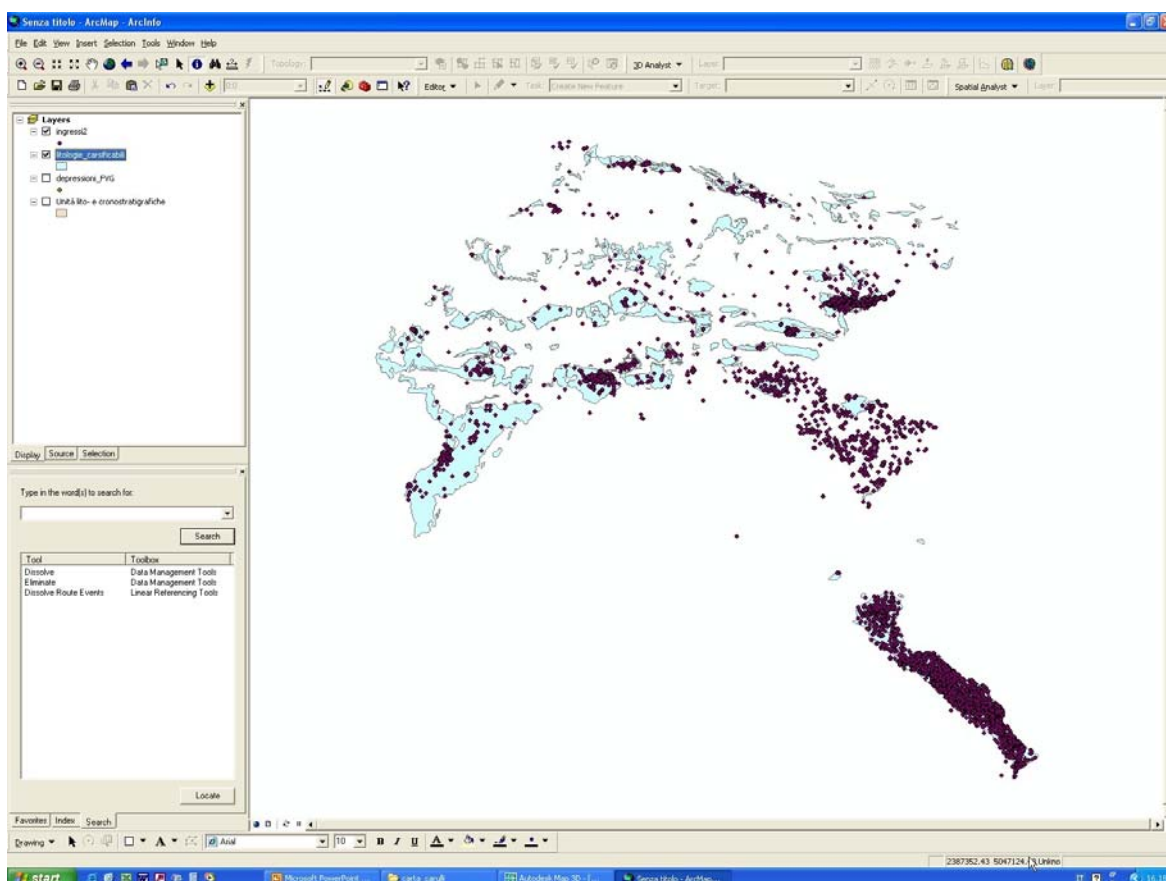


Figura 5.4 zone di affioramento delle litologie calcaree a confronto con l'ubicazione delle cavità

Sono state quindi visualizzate in ArcGIS solamente le litologie carsificabili della feature class “lito” e mediante tecnica di overlay nella visualizzazione sono state aggiunte anche altre feature class del geodatabase ed in particolare quelle relative alla distribuzione delle doline e delle cavità. A questo punto risultavano quindi ben visibili le principali zone carsificate. È apparsa però una forte incongruenza nell’area orientale dei rilievi prealpini. Qui la distribuzione di doline e cavità non trovava riscontro con la presenza di litologie identificate come carsificabili. Si tratta infatti di una zona peculiare sotto il profilo del carsismo perché caratterizzata dal prevalente affioramento di rocce in facies di flysch, quindi prevalentemente silicoclastiche, ma contenenti alcuni livelli più o meno potenti di sedimenti terrigeni di natura calcarea, che risultano proprio i responsabili dell’esistenza del fenomeno carsico in queste aree, caratterizzate anche dalla presenza di alcune delle cavità più estese di tutta la regione.

Effettuata una prima individuazione delle zone di diffusione del fenomeno carsico si è passati alla perimetrazione delle Aree. Allo scopo sono state sfruttate tutte le potenzialità del software ArcGIS che permette appunto di visualizzare con tecnica di overlay più tematiche contemporaneamente, ed inoltre consente di interrogare “a schermo” in maniera molto semplice gli elementi visualizzati per verificarne gli attributi alfanumerici sfruttando appieno la dinamicità del supporto informatico costruito.

Per la determinazione dei limiti della maggior parte delle aree carsiche oltre a considerare le aree di affioramento delle litologie carsificate sono stati considerati i limiti idrogeologici dati da contatti stratigrafici e tettonici tra litologie a diversa permeabilità e le caratteristiche topografiche del territorio desunte dagli elementi della CTRN visualizzati all’occorrenza. In questo frangente è risultato molto utile disporre anche dei dati relativi alle sorgenti nonché della geometria del reticolo idrografico.

In alcuni casi la stesura dei confini delle aree carsiche è risultata semplice per l’evidenza di indubbi limiti idrogeologici. Ciò si è verificato soprattutto per quei massicci carbonatici carsificati che per la loro costituzione topografica si trovano isolati dai rilievi contermini (per esempio il Massiccio del Monte Verzegnis o quello del Monte San Simeone). In altri casi invece la definizione dei confini è risultata più difficoltosa. Ciò è avvenuto in particolare per tutta l’area delle prealpi orientali, in particolare nella zona delle valli del Torrente Torre e del Fiume Natisone, dove il carsismo si sviluppa nelle serie flyscioidi

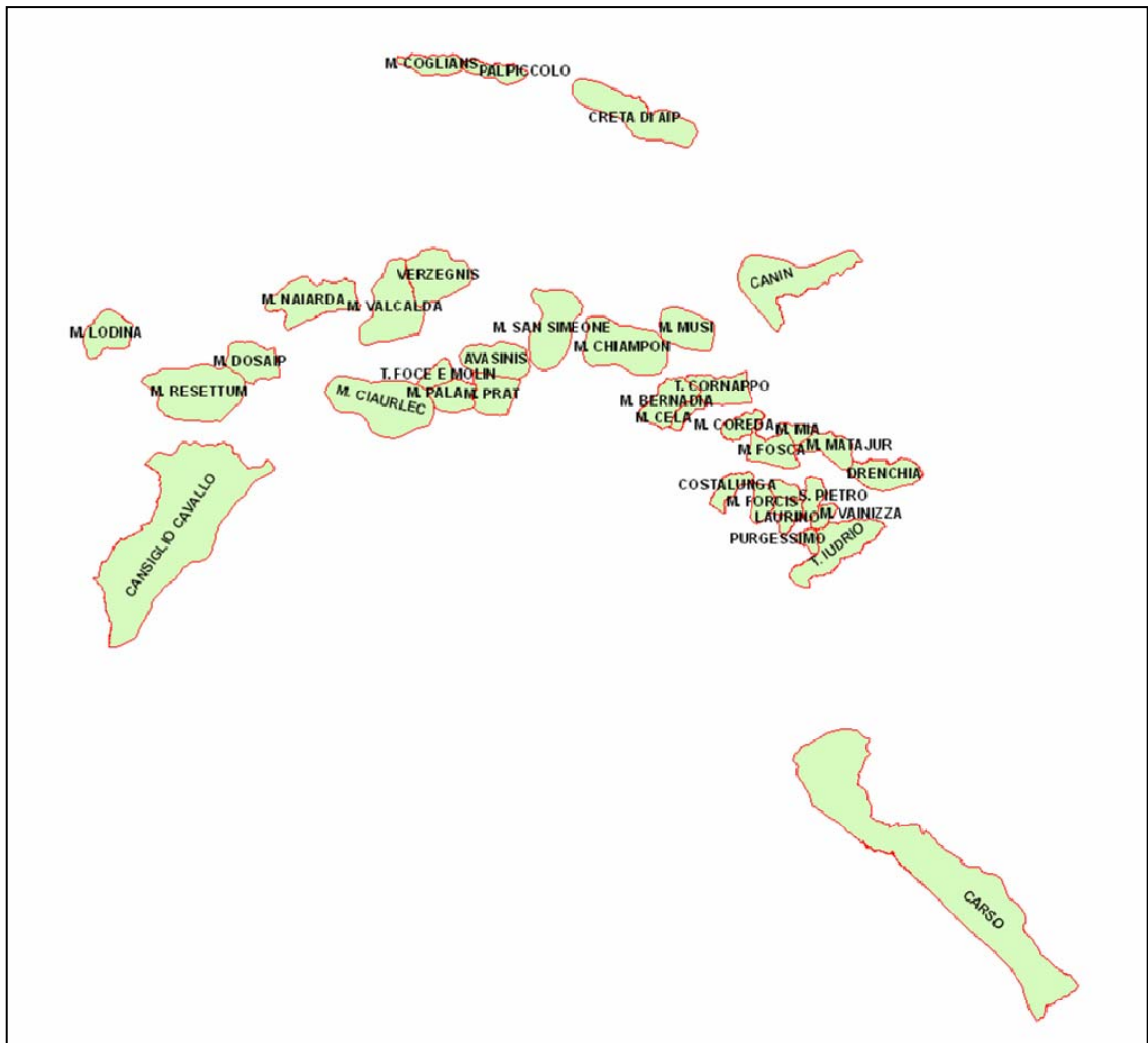


Figura 5.5: le Aree carsiche individuate

caratterizzate dalla presenza di banconi carbonatici. In questo caso la tracciatura dei limiti è avvenuta tenendo conto principalmente del fattore topografico ed in particolare dell'andamento dei fondovalle. In taluni casi sono state fatte anche delle verifiche direttamente sul campo.

Come risultato finale di questa complessa operazione è stato quindi ottenuto un unico livello tematico contenente tutte le Aree Carsiche presenti nella Regione Friuli Venezia Giulia. In tutto le aree carsificate così identificate sono 36 e coprono una superficie totale di quasi 1300 km².

6 CREAZIONE DEI DEM

Una volta individuati gli areali carsici con lo scopo di implementare il numero di informazioni ad esse afferenti, sono stati creati per ogni area carsica dei DEM a partire dalla CTRN. L'operazione è stata eseguita per dare maggior completezza di tutto il lavoro ben sapendo che questa tipologia di oggetti risultano molto utili per diverse finalità.

6.1 Procedura di creazione

Il primo passo è stato quello di individuare per ogni area gli elementi della CTRN di interesse. Allo scopo è stata eseguita in ArcGIS un'interrogazione mediante un join spaziale tra la feature class "aree" e la feature class "cart". Il risultato del join è stato esportato in excel in maniera tale da avere una lista indicante per ogni area gli elementi di interesse.

A questo punto gli elementi CTRN pertinenti ad ognuna delle aree sono stati di volta in volta associati in AutoCAD map tramite il quale è stata eseguita una query per estrarre le tematiche cartografiche che riportano informazioni di quota.

In particolare la query è stata scritta come segue:

```
(setq ade_cmddia_before_qry (getvar "cmddia"))
(setvar "cmddia" 0)
(ade_qryclear)
(ade_qrysettype "draw")
(ade_qrydefine '("" "" "" "Property" ("layer" "="
"1L000CD,1L000CI,1L000II,1L000DI,1L000CA")""))
(ade_qrydefine '("OR" "" "" "Property" ("layer" "=" "1P000PQ,1P000DE")""))
(setvar "cmddia" ade_cmddia_before_qry)
```

Una volta estratte, le tematiche cartografiche di interesse sono state sottoposte ad un semplice controllo per verificare la presenza di errori di digitalizzazione. In particolare il

modello di CAD è stato semplicemente osservato con una vista laterale per verificare che i vertici di ogni singolo elemento del disegno siano posti alla stessa quota.

A questo punto i feature estratti (punti e polilinee 2D) sono stati importati in ArcGIS, dove tramite i comandi dell'estensione 3D analyst sono stati creati tanti TIN quante erano le aree individuate.

Successivamente ogni singolo TIN, per una gestione più leggera e veloce, è stato trasformato in un raster con pixel di 5m dove ogni pixel reca l'informazione di quota.

Il raster quindi può essere importato in ArcScene, applicativo di ArcGIS, tramite è possibile visualizzare oggetti in 3D. Tramite particolari comandi presenti nella finestra delle proprietà è possibile creare delle ombreggiature in modo tale da creare un effetto tridimensionale molto interessante.

È stato inoltre possibile, disponendo delle informazioni geologiche per ogni area, "spalmare" sul DEM gli areali di affioramento delle diverse litologie dando un ulteriore valore aggiunto del prodotto creato.

Dai DEM così creati sono state ricavate per ogni Area carsica le quote minime massime e medie.

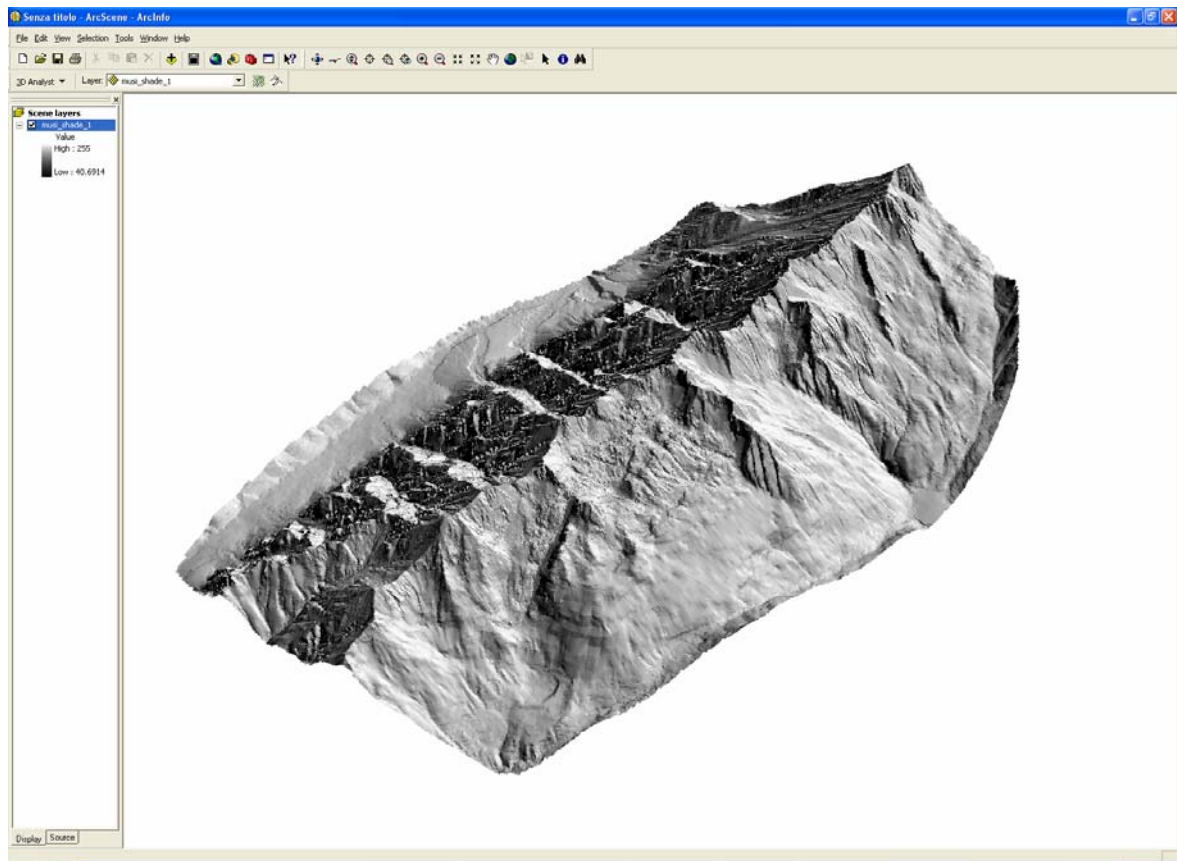


Figura 6.1: esempio di DEM creato per l'Area Monti Musi

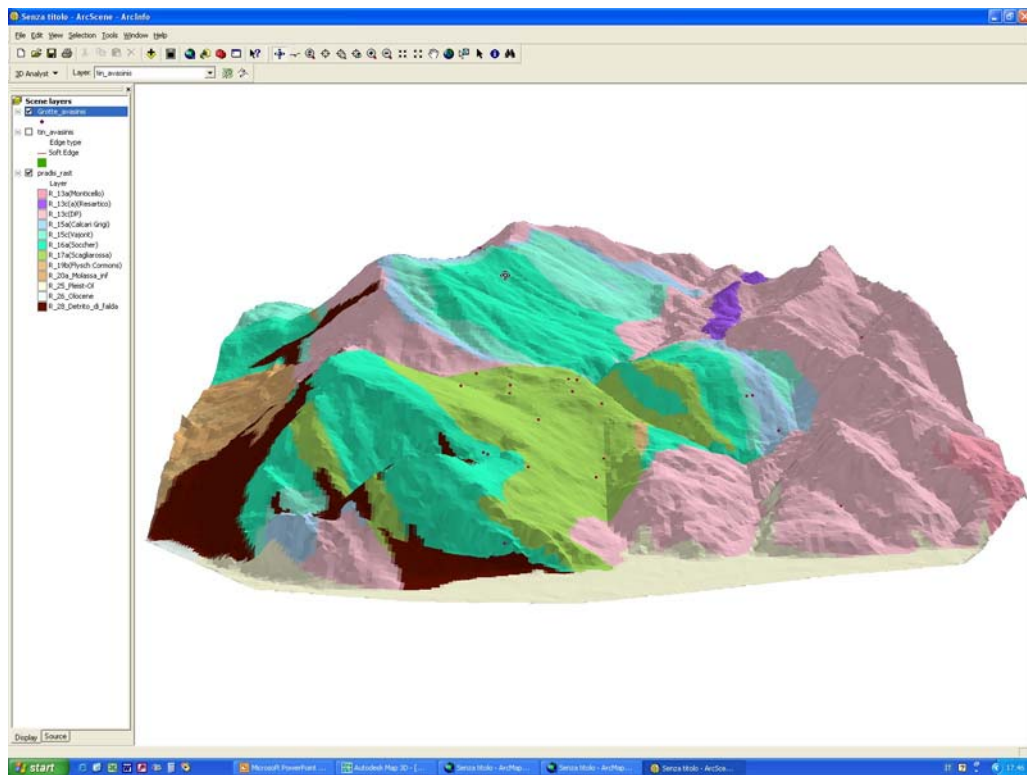


Figura 6.2: esempio di DEM con riportati gli areali di affioramento delle diverse litologie per l'area di Avasinis.

7 CATASTO DELLE AREE CARSICHE

Tramite interrogazione del GDB creato sono state messe in evidenza le relazioni esistenti tra i vari livelli tematici ottenendo così tutti i dati necessari alla compilazione di schede catastali, create in ambiente Access, relative alle Aree carsiche.

Questa fase applicativa è avvenuta in particolare utilizzando i potenti strumenti di interrogazione ed analisi spaziale messi a disposizione dal software.

Di seguito verranno indicati i campi presenti nelle schede ed il criterio mediante il quale sono stati riempiti.

I campi contrassegnati con (*) sono quelli non compilati per mancanza di dati non inseriti nel GIS.

7.1 *Compilazione della scheda catastale delle Aree Carsiche*

Campi della scheda delle Aree.

- **Nome Area:** stabilito riferendosi agli elementi topografici maggiori presenti in zona.
- **Superficie:** superficie in Km² dell'Area ricavata dalla tabella degli attributi della feature class "aree" del GDB.
- **Regione:** regione amministrativa in cui si trova l'area.
- **Provincia geografica:** nome della provincia geografica solitamente di origine storica.
- **Sottoprovincia:** nome derivante dalla suddivisione delle Province ed indicandole solitamente con il Nome della Provincia seguito dall'aggettivo indicante la posizione geografica come, Settentrionale, Centrale, Meridionale, Occidentale ed Orientale.
- **Province interessate:** Nomi delle province in cui si trova l'Area. Dato derivato dal comando "select by location" effettuato tenendo conto della feature class "aree" e limiti amministrativi.
- **Comuni:** Nomi dei comuni in cui si trova l'Area. Dato derivato dal comando "select by location" effettuato tenendo conto della feature class "aree" e limiti amministrativi.

- **Limiti geografici:** limiti espressi in coordinate metriche. Dato derivato dalla tabella degli attributi della feature class “aree”.
 - Nord: coordinata del punto dell’Area che si trova più a Nord.
 - Sud: coordinata del punto dell’Area che si trova più a Sud.
 - Est: coordinata del punto dell’Area che si trova più a Est.
 - Ovest: coordinata del punto dell’Area che si trova più a Ovest.
- **Altimetria (m):** Tutti i dati relativi a questo campo sono stati estrapolati dai DEM creati per ogni area.
 - Quota media: quota media dell’Area.
 - Quota massima: quota massima dell’Area.
 - Quota minima: quota minima dell’Area.
- **Cartografia:**
 - CNR: codice identificativo delle tavolette della Carta Numerica Regionale 1:25000 che sono state utilizzate per il lavoro. I codici sono stati estratti tramite il comando “select by location” effettuato tenendo conto della feature class “aree” e dello shapefile “quadro_unione” della cartografia regionale.
 - CTRN: codice identificativo degli elementi della Carta Tecnica Regionale Numerica utilizzati per il lavoro. I codici sono stati estratti tramite il comando “select by location” effettuato tenendo conto della feature class “aree” e dello shapefile “quadro_unione” della cartografia regionale.
- **Litologie predominanti:** elenco (da 1 a 4) decrescente per superficie delle principali litologie presenti nell’Area. Il dato è stato ricavato effettuando per ogni area un clip della feature class “lito” ed utilizzando come contorno per il taglio la feature class “aree_karst”
- **Bacino idrografico:** nome dei bacini a cui sottende l’Area. I bacini sono stati estratti tramite il comando “select by location” effettuato tenendo conto della feature class “aree” e della feature class “idrografia”.
- **N° Sorgenti:** numero delle sorgenti ricadenti in una fascia di 1,5 km dall’areale dal quale naturalmente devono provenire le acque. Tale selezione è stata effettuata osservando la direzione di deflusso delle acque del reticolo idrografico generato dalle

suddette sorgenti. La selezione è avvenuta creando un buffer attorno ad ogni Area e quindi utilizzando il comando di ArcGIS “Select by Location”.

- **N° Grotte:** numero delle grotte presenti nell’Area. Il dato è stato determinato mediante il comando di ArcGIS “select by location” utilizzando considerando le feature class “aree” e “cavità”.
- **N°Doline:** numero delle doline presenti nell’Area. Il dato è stato determinato mediante il comando di ArcGIS “select by location” considerando le feature class “aree” e “cavità”.
- **Dati esistenti in bibliografia:** si intende presenza o meno di studi nei diversi campi, elencati sotto, presenti in bibliografia. In caso positivo le caselle debbono essere spuntate, ed i titoli delle opere e/o le fonti riportate nel campo sottostante indicando l’autore e l’anno.
 - Vulnerabilità
 - Idrogeologia
 - Geochimica
 - Carsismo
 - Clima
 -

Di seguito viene riportato un esempi di scheda catastale relativo all’area M. San Simeone ed un esempio di carta tematica creata a partire dai livelli tematici del GDB.

Nome area:	Monte S. Simeone			
Superficie (Kmq):	8.97			
Regione:	Friuli - Venezia Giulia			
Provincia geografica:	Prealpi Carniche			
Sottoprovincia:	Prealpi Carniche Settentrionali			
Province interessate:	Udine			
Comuni:	Bordano, Cavazzio, Carnico e Venzone			
Limiti geografici (m):	Nord:	5,135,581	Sud:	5,131,279
	Est:	2,375,746	Ovest:	2,371,819
Altimetria (m):	Quota massima:	1505		
	Quota minima:	247	Quota media:	847
Cartografia:	CNR:	049		
	CTRN:	049012,022,023,051,052,061,063,064,091,104		
Litologie predominanti (Kmq):	1:	Calcari grigi del Friuli 4,32, Kmq		
	2:	Dolomia principale 3,03 Kmq		
	3:	Formazione di Soverzene 1,08 Kmq		
	4:			
Bacino idrografico:	Tagliamento			
N° Sorgenti:	7			
N° Grotte:	7			
N° Doline:	5			
Dati esistenti in bibliografia	<input type="checkbox"/>	Carsismo	<input type="checkbox"/>	Geochimica
	<input type="checkbox"/>	Climatologia	<input type="checkbox"/>	Idrogeologia
	<input type="checkbox"/>	Vulnerabilità		

Figura 7.1: esempio di scheda catastale creata a partire dai livelli tematici del GDB

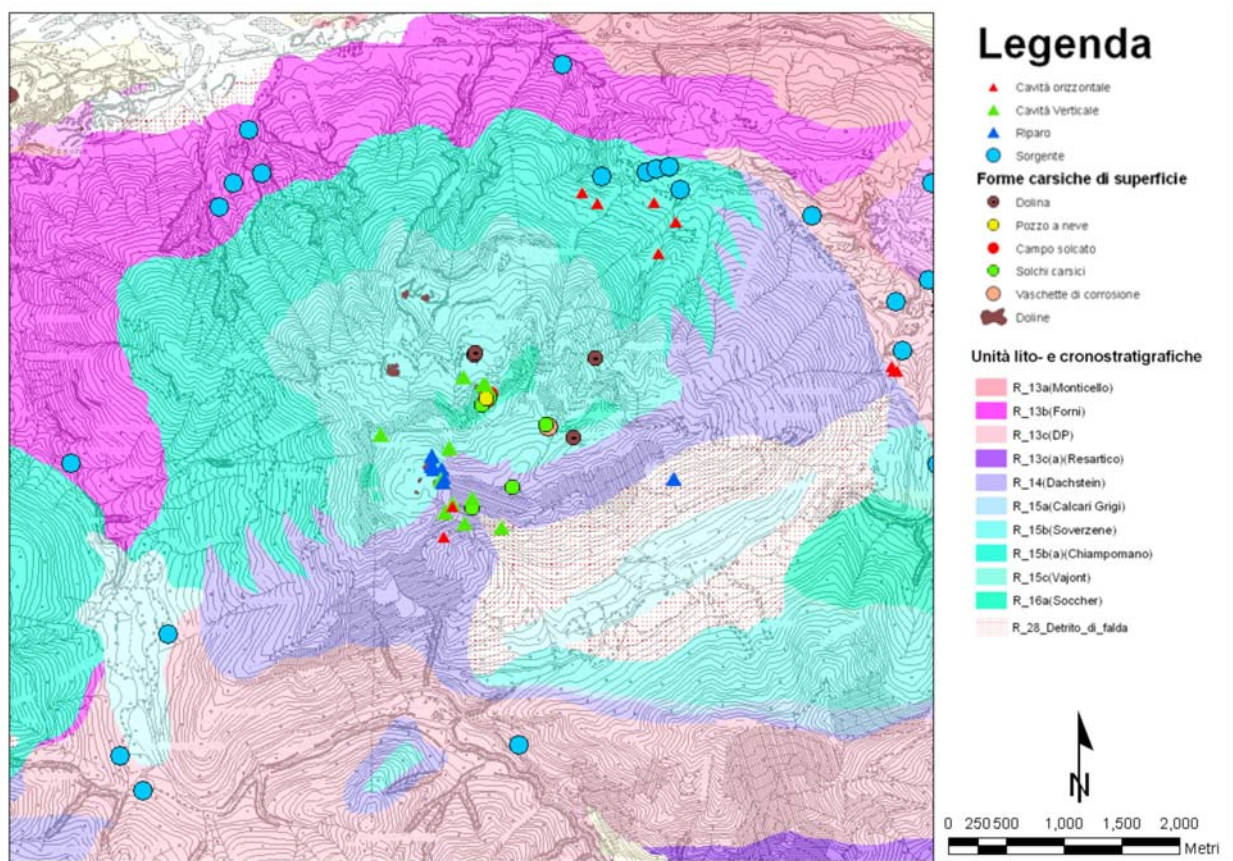


Figura 7.2: esempio di carta tematica ottenuta a partire dai livelli del GDB

8 CONCLUSIONI

L'obiettivo che ci si era prefissati era quello di creare una base dati che raccogliesse ed omogeneizzasse in un'ottica di tipo interdisciplinare le informazioni afferenti alle aree carsiche della regione Friuli Venezia Giulia, creando un valido punto di partenza per diverse applicazioni che spaziano dall'ambito puramente scientifico a quello di gestione e salvaguardia di queste peculiari zone. Per facilitare la consultazione del Sistema Informativo Geografico ci si era inoltre proposti di gettare le basi per la creazione di un Catasto delle Aree Carsiche rappresentato da schede catastali afferenti ad ognuna delle aree carsiche individuate.

L'impostazione del lavoro è avvenuta usufruendo delle potenzialità del software GIS ArcGIS che ha consentito di creare un Geodatabase, struttura molto dinamica risultata molto utile per lo sviluppo dei passi successivi, tra cui l'individuazione e la definizione delle Aree Carsiche, la creazione di Schede catastali afferenti ad ognuna delle aree carsiche individuate, e la creazione di una cartografia organizzata in livelli tematici a carattere geologico.

La struttura di dati e procedure così ottenuta ha facilitato l'elaborazione di una metodologia di suddivisione, secondo caratteristiche omogenee, delle aree carsificabili presenti nel territorio regionale con l'individuazione di quattro livelli territoriali di approfondimento.

Le informazioni così ricavate e relative all'ultimo livello territoriale sono state sintetizzate e convogliate all'interno di schede catastali progettate e realizzate "ad hoc" per questo lavoro.

L'elaborazione della struttura di queste schede ha richiesto un notevole lavoro di progettazione e calibrazione. Per progettazione della scheda si intende la preparazione di una serie di campi standard che possano essere adattati a tutte le Aree.

In sintesi è possibile riassumere il lavoro nei seguenti punti fondamentali:

- Reperimento e correzione grafica della cartografia geologica utilizzata come base per il lavoro;

- Reperimento, individuazione e georeferenzazione di dati di contorno come grotte, doline, sorgenti, bacini idrografici ecc. per ognuno dei quali è stato creato un livello tematico con associata una tabella di attributi alfanumerici contenente le informazioni fondamentali per la loro caratterizzazione.
- Creazione di un Geodatabase in ArcGIS per contenere e gestire tutti i livelli tematici di cui sopra;
- Individuazione di una metodologia di suddivisione, per caratteristiche omogenee, delle aree carsificabili presenti nel territorio regionale;
- Riconoscimento degli areali carsificabili attraverso l'interpretazione dei dati presenti nel Geodatabase. Nello specifico sono state riconosciute le unità litologiche potenzialmente carsificabili e poi tracciati i confini delle Aree carsiche tenendo conto delle peculiarità degli altri livelli tematici e prestando particolare attenzione agli elementi di tipo idrogeologico. In particolare in totale sono state individuate 37 Aree.
- Elaborazione dei dati inseriti nel geodatabase. Grazie ai dati presenti è stato possibile tramite particolari interrogazioni ottenere ulteriori informazioni relative alle Aree carsiche individuate.
- Strutturazione di schede catastali per le Aree introducendo diverse voci inerenti argomentazioni geologiche, idrogeologiche e carsiche.
- Compilazione delle schede catastali relative alle Aree carsiche individuate.

In generale possiamo affermare che grazie all'utilizzo degli strumenti propri dei Sistemi Informativi Geografici, questo lavoro costituisce la base per nuovi sviluppi fornendo la possibilità di:

- ricavare una visione d'insieme del tema affrontato.
- produrre in breve tempo carte tematiche su molteplici aspetti.
- intervenire inserendo aggiornamenti
- contabilizzare le risorse idrogeologiche e carsiche.
- incrociare e ricavare nuovi livelli tematici a partire da informazioni provenienti da settori di studio diversi.

- ricavare informazioni non solo dalle proprietà geometriche (dimensione perimetro ecc) delle aree ma anche dai reciproci rapporti spaziali (prossimità, contenimento, intersezione ecc), grazie alla struttura topologica nella quale sono organizzati i dati.

BIBLIOGRAFIA

AA. VV. (2009): Paesaggi carsici nel Friuli Venezia Giulia, Ed, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

CARACCI P., MUSCIO G., SELLO U., (1986), Carsismo e idrologia sotterranea – Guida del Friuli, Prealpi Carniche, S.A.F. ed. Udine, pp. 6, 67-81.

CARULLI G. B. et AL. (2006): Carta geologica del Friuli Venezia Giulia. Scala 1:150000. S.E.L.C.A., Firenze.

CUCCHI F. (1996): Il Carsismo. Dispense per il corso di geografia fisica, Ed. DiSGAM, Università degli Studi di Trieste

DAVIS M. (1999): Costruire applicazioni con Access – APOGEO.

ESRIITALIA (2006): www.esriitalia.it/arcgis.

FORTI F., SEMERARO R., (1981), Carsismo nella “Catena Carnica” (Alpi Carniche) – Atti del 1° Conv. Sull’Ecologia dei Territori Carsici, La Grafica, Gradisca d’Isonzo, pp. 107-111.

FORD D., WILLIAMS P. (1989): Karst geomorphology and hydrology, Unwin Hymann, pp. 602, London

JOHNSTON K., VER HOEF J.M., KRIVORUCHKO K., LUCAS N. (2001): Using ArcGIS Geostatistical Analyst, ESRI.

LESEK L., VIACHESLAV A. (2008) Characteristics of high-mountain karst based on GIS and Remote Sensing. Environmental Geology, Special Issue, Vol. 54, N. 5, pp 979-994

LEZEK L. (2008): Atlas of karst area based on Web GIS Technology. Environmental Geology, Special Issue, Vol. 54, N. 5, pp 1029-1036.

MC KOY J., JOHNSTON K. (2001). Using ArcGIS Spatial Analyst, ESRI.

MIETTO e SAURO (1989), Aree carsiche italiane: progetto per un catasto Atti XV Congresso nazionale di speleologia, Castellana Grotte, pp.145-159.

- MINAMI M. (2000): Using ArcMap, ESRI.
- MUSCIO G. (2002): Il fenomeno carsico delle Prealpi Carniche orientali (Friuli) Mem. Dell'Istituto Ital. di Speleologia s. II, vol. XII, Udine 2002
- PETRINI A. (2001): Il carsismo nelle prealpi carniche, tesi di laurea inedita, Università degli Studi di trieste a.a. 2000-2001
- QIANG W., HUA X., WANFANG Z. (2008): Development of a 3D GIS and its application to karst areas. Environmental Geology, Special Issue, Vol. 54, N. 5, pp 1027-1045.
- ROSSI ANNA (2007): Gestione informatica di rilievi in aree carsiche. Tesi di dottorato inedita. Dottorato di ricerca in geomatica e sistemi informativi territoriali. XIX CICLO, Università degli studi di Trieste.
- SALVATORE C. (2003): L'uso dello Strumento "geostatistical Analyst" come supporto alle decisioni in campo Ambientale, www.esriitalia.it/conferenza2003cd/content/poster/MinAmb2/kriging.doc
- SHANER J., WRIGHTSELL J. (2000): Editing in ArcMap, ESRI
- SWEETING M.M. (1981): Karst Geomorphology, Hutchinson Ross Publishing Company, pp.427, Stroudsburg, Pennsylvania
- VIENNAU A. (2001): Using ArcCatalog, ESRI.
- WHITW W.B. (1988): Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains, Oxford University Press, New York
- YONGLI G. (2008): Spatial operations in a GIS-based karst feature database. Environmental Geology, Special Issue, Vol. 54, N. 5, pp 1017-1027.

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	Caratteristiche geologiche e geomorfologiche del Friuli Venezia Giulia	4
2.1	La sequenza stratigrafica	4
2.1.1	La sequenza permocarbonifera.....	4
2.1.2	La sequenza triassica inferiore e media.....	6
2.1.3	Le sequenze triassico – terziarie.....	6
2.2	Cenni generali di carsismo nella regione.....	8
3	Reperimento e modifica dei dati utilizzati.....	9
3.1	Omogeneizzazione dei dati geologici.....	9
3.2	Grotte.....	15
3.3	Idrografia superficiale.....	19
3.4	Doline	20
3.5	Sorgenti.....	23
3.6	Limiti amministrativi.....	24
3.7	Cartografia.....	25
3.8	Forme carsiche minori.....	25
4	Creazione del geodatabase	27
4.1	Dati geologici	31
4.2	Cavità.....	32
4.3	Idrografia	32
4.4	Doline	32
4.5	Sorgenti.....	34
4.6	Limiti amministrativi.....	34
4.7	Cartografia.....	35
4.8	Forme carsiche minori.....	35
4.9	Aree carsiche	35
5	Individuazione delle aree carsificate	36
5.1	Metodologia di suddivisione delle aree carsiche.....	36
5.1.1	Provincia Geografica	37

5.1.2	Sottoprovincia geografica.....	37
5.1.3	Superarea	38
5.1.4	Area	38
5.2	Identificazione delle aree carsiche.....	39
6	Creazione dei DEM	45
6.1	Procedura di creazione.....	45
7	Catasto delle aree carsiche.....	49
7.1	Compilazione della scheda catastale delle Aree Carsiche.....	49
8	Conclusioni.....	54