

IL GEOPARCO DEL CARSO CLASSICO ITALIANO

MANUALE PER GUIDE GEOLOGICHE



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA

Autori

Lorenzo Bonini¹, Chiara Calligaris¹, Franco Cucchi¹, Furio Finocchiaro¹, Marco Franceschi¹, Luca Zini¹, Fabiana Vidoz², Sara Bensi³ e Chiara Piano³

¹*Dipartimento di Matematica e Geoscienze - Università degli Studi di Trieste*

²*Libera professionista*

³*Servizio geologico – Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia*

Responsabile del progetto

Fabrizio Fattor, direttore del Servizio geologico – Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

Grafica e impaginazione digitale

Anna Tamiazzo, Lorenzo Oretti (eco&eco Economia ed Ecologia srl)

Stampa

Centro stampa regionale della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Trieste maggio 2023

Autorizzazioni e vincoli

Le immagini dei Dinosauri del Villaggio del Pescatore sono utilizzate su concessione della Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio del Friuli Venezia Giulia - MiC e ne è vietata la riproduzione a scopo di lucro

Da citare come:

Bonini L., Calligaris C., Cucchi F., Finocchiaro F., Franceschi M., Zini L., Vidoz F., Bensi S. e Piano C. (2023): Il geoparco del Carso Classico italiano. Manuale per guide geologiche. Ed. a cura del Servizio geologico – Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2023, Trieste

Copyright © 2023 Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

Tutti i diritti sono riservati

ISBN: 9788894039498

Foto in copertina a cura di Giancarlo Massari

1. INTRODUZIONE

Non è facile far parlare le pietre. Ma il Carso è terra di pietre.

Non per nulla il toponimo *Carso* (anche *Charso*) prende origine dalla radice paleo-indo-europea **Kar** (anche **Karra**) che significa roccia o pietra. E la radice *carso* prende origine dal nome della regione geografica del Carso di Trieste, analizzata per prima dagli studiosi di carsologia e presa come riferimento per le altre regioni carsiche nel mondo e perciò detta anche *Carso Classico* (*Classical Karst Region* o semplicemente *Classical Karst* se non *Karst*, in inglese).

Le pietre del Carso, luogo descritto in quasi tutti i testi scolastici, narrato in capolavori letterari e vissuto in tenere poesie, parlano di storie attuali e recenti fatte di incontri e di scontri fra popoli diversi, di storie antiche di viaggiatori mitici e di conquistatori barbari, dei primi passi degli abitatori preistorici di grotte e di castellieri, di pastori e contadini in lotta contro la mancanza d'acqua.

Ma parlano anche di come decine di milioni di anni fa si siano formate in ambienti oggi esistenti solo a migliaia chilometri di distanza, di come poi si sono innalzate e piegate emergendo dai mari ed esponendosi agli agenti atmosferici, di come negli ultimi milioni di anni sono state modellate in superficie ed in profondità da quel

fenomeno che da loro, bianche pietre calcaree, prende nome, il *carsismo*.

Questo manuale vuole aiutare le guide del geoparco del Carso a rispondere alle domande di quanti vorranno visitarlo per conoscerle e per entrare in simbiosi con i mutevoli paesaggi carsici e le sue genti. In pratica, il manuale si augura di aiutarli a far parlare le rocce affinché raccontino ai visitatori perché il Carso Classico è terra, anzi, è roccia speciale.

Fig.1 Stralcio dalla Vera Descrizione Del Friuli, tavola curata da Giovanni Andrea Vavassori nel 1553, in cui il CHARSO e il Fonte timauo sono abbastanza ben delimitati.



2. GEOLOGIA

Il termine **geologia** deriva dall'unione di due parole greche: "γῆ o **gê**" che significa terra e "λόγος o **logos**" che significa studio. Dunque la geologia è quella disciplina scientifica che studia i processi fisici e chimici che hanno plasmato, e che plasmano tutt'ora, il nostro pianeta. In senso più ampio, la geologia studia i processi evolutivi di tutti i pianeti simili alla Terra, ovvero i corpi celesti che presentano una superficie solida. I principi generali che hanno portato alla nascita e sviluppo della geologia, o in senso più ampio delle scienze della terra, si basano sul concetto di dinamicità. Con dinamicità intendiamo la comprensione del fatto che il paesaggio che noi vediamo non è sempre stato come lo si osserva oggi, ma è solo un fotogramma di un film iniziato miliardi di anni fa.

2.1 Il tempo geologico

Il primo passo per cercare di comprendere cosa significhi realmente la geologia, necessita uno sforzo non indifferente per cambiare i nostri riferimenti temporali, passando dagli anni, decenni, o secoli a decine di migliaia di anni, milioni, miliardi. Mentre ragionare, o riflettere, in termini di decine o centinaia di anni è usuale per l'essere umano perché coincide con la nostra percezione del tempo in relazione alla nostra vita, il salto verso orizzonti temporali distanti milioni e miliardi di anni richiedono sforzi di immaginazione non indiffe-

renti. Per comprendere meglio il problema, può aiutare la visualizzazione del cosiddetto orologio geologico (Fig. 2.1).

L'osservazione dell'orologio geologico aiuta a capire quanto breve sia la storia dell'uomo sul nostro pianeta e quanto insignificante il tempo trascorso dalla sua comparsa possa apparire se confrontato con l'intero arco di esistenza della Terra.

L'età della Terra si aggira sui 4.5 miliardi di anni. Questo è il tempo trascorso dal momento in cui nel sistema solare si sono aggregati nella loro forma semi-definitiva i pianeti che oggi conosciamo. Se per un approfondimento sul tema della creazione ed evoluzione del sistema solare rimandiamo a testi specifici, rimane importante farsi un'idea di come come i geologi hanno organizzato o separato il tempo geologico.

La prima considerazione che deve essere fatta è quella che i geologi hanno organizzato il tempo basandosi su eventi che si ritrovano registrati nelle rocce, ovvero eventi naturali così significativi che hanno portato ad importanti modifiche sulla vita, registrate, per esempio, nel record paleontologico, cioè nei fossili (paleontologia: disciplina che studia gli esseri viventi del passato), o nel clima del pianeta, che possono essere testimoniate da cambiamenti nella natura o nelle caratteristiche delle

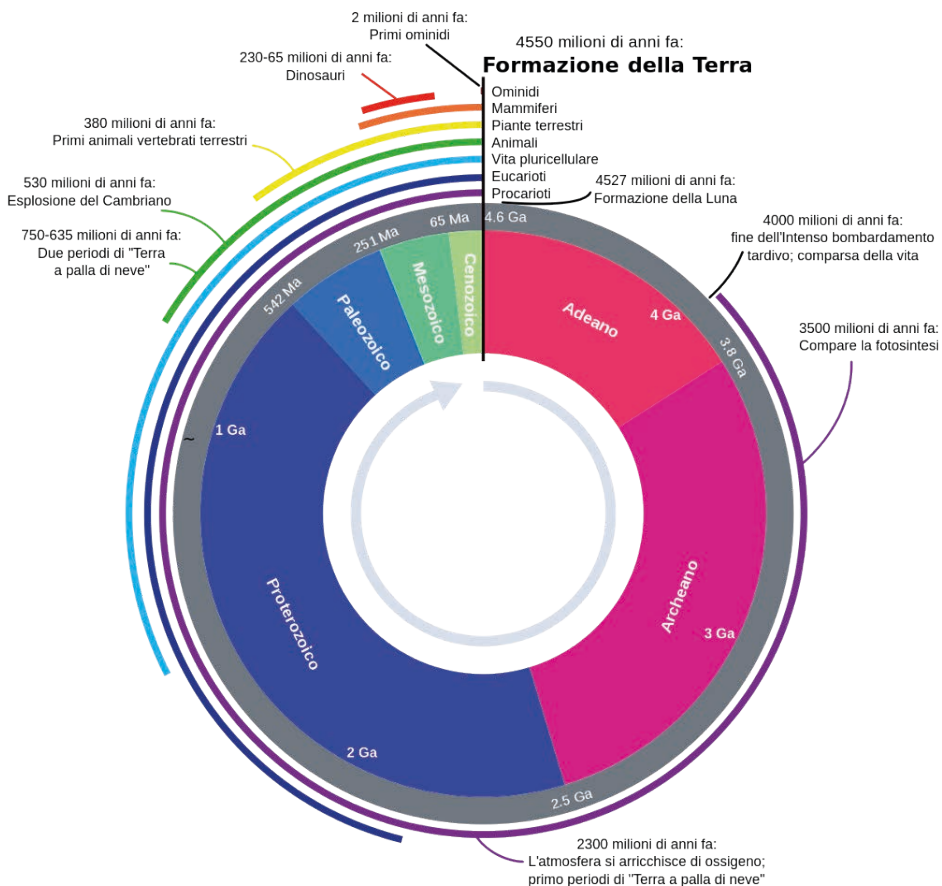


Fig. 2.1 L'orologio geologico.
 (Fonte: Wikipedia)

rocce. Naturalmente è difficile separare la vita dal clima. Infatti gli eventi naturali che possono portare o alla proliferazione della vita o a grandi eventi di estinzione di massa, sono sempre collegati ad eventi climatici significativi. Un esempio, forse l'esempio più fa-

moso di "evento significativo" a cui si possa fare riferimento, è ciò che avvenne al passaggio fra Cretacico e Paleocene (per un approfondimento si rimanda alla descrizione della stratigrafia del Carso), quando tra i vari accadimenti si hanno evidenze della caduta di un grande meteorite sulla

Terra e dell'estinzione dei dinosauri. Le suddivisioni operate dai geologi son ben rappresentate nella *Scala stratigrafica internazionale*, in inglese *International stratigraphic chart* (Fig. 2.2). Uno dei primi aspetti che colpiscono nell'osservare la tabella è che la dimensione degli intervalli temporali rappresentati non è proporzionale alla loro durata.

Perché non esiste tale proporzionalità? Perché più ci si avvicina alla nostra epoca e più sono dettagliate le separazioni? La risposta ad entrambe le domande risiede nella risoluzione delle informazioni che i geologi hanno a loro disposizione per individuare intervalli di tempo precisi. Tale risoluzione è connessa al fatto che più ci allontaniamo da oggi, minori sono le informazioni a disposizione e più lacunoso si fa il *record geologico*, per cui risulta sempre più complesso ricostruire gli eventi nel passato geologico. Tornando a paragonare la storia geologica con i fotogrammi di un film, è come se più ci allontanassimo dalla conclusione e più la pellicola risultasse deteriorata o mancassero degli interi spezzoni. Cosa ha provocato questo deterioramento delle informazioni a disposizione dei geologi? La tettonica delle placche.

2.2 La tettonica delle placche

Il pianeta Terra è vivo. Basterebbe questa affermazione per spiegare perché il mondo che ci circonda, e che osserviamo oggi, non ha ana-

loghi nel passato, ma rappresenta il risultato di diversi processi evolutivi. Con il termine vita o essere vivente o ciclo vitale, si possono fare delle interessanti analogie fra un essere vivente, come è comunemente presente nell'immaginario collettivo, e la storia geologica del nostro pianeta. Un essere vivente ha come scopo quello di sopravvivere nel proprio ambiente con l'obiettivo di riprodursi e perpetuare la propria specie. Un pianeta come il nostro non persegue lo stesso obiettivo, ma come gli esseri viventi ha un ciclo vitale, ovvero: nasce, cresce, si evolve e muore. Ma cosa significa che il pianeta è vivo? Con questo termine in geologia non ci si riferisce solo allo sviluppo e all'evoluzione degli esseri viventi. Si intende che, per sua natura, il pianeta cambia in continuazione. Questo dinamismo è quello che ha permesso lo sviluppo della vita organica, ma perché? Qual è il principio che sta alla base della dinamicità del pianeta? È più semplice di quello che si immagina, ovvero il disequilibrio termico.

È noto che la Terra è costituita da diversi involucri che ricordano quelli di una cipolla. Un ortaggio decisamente grande, con un raggio che si ag-

Fig. 2.2 Scala cronostatigrafica internazionale 2023. Notare che la tabella viene aggiornata frequentemente in base agli avanzamenti sullo stato delle conoscenze, specialmente quelle relative all'età delle rocce. (Fonte: Commissione internazionale di stratigrafia <https://stratigraphy.org/chart>)

gira intorno ai 6370 km. Per quanto riguarda gli involucri, questi presentano diverse proprietà chimiche e diverse temperature (Fig. 2.3).

Al centro ritroviamo un nucleo con raggio di circa 1220 km, costituito in prevalenza da ferro e nichel, in forma solida dovuta alla forte pressione a cui è sottoposto, le sue temperature raggiungono i 5000 °C. Il Nucleo Interno solido è avvolto dal Nucleo Esterno, anch'esso costituito in prevalenza da ferro. Ciò che lo differenzia dal Nucleo Interno è il fatto di essere liquido e che al suo interno sono presenti correnti convettive, moti dovuti

al fatto che in Nucleo Esterno ruota in maniera diversa rispetto al Nucleo Interno. Le correnti convettive producono il campo magnetico terrestre e trasferiscono calore verso l'esterno, due fenomeni fondamentali per l'esistenza della vita. Oltre il nucleo esiste il Mantello che rappresenta circa l'84% del volume dell'intero pianeta ed è costituito da elementi ultrafemici (silicati, ossidi di magnesio e ferro, ecc.) e ha uno spessore di circa 2890 km. Le rocce del Mantello, a causa delle pressioni e le temperature che si trovano a queste profondità, hanno un comportamento plastico e vi-

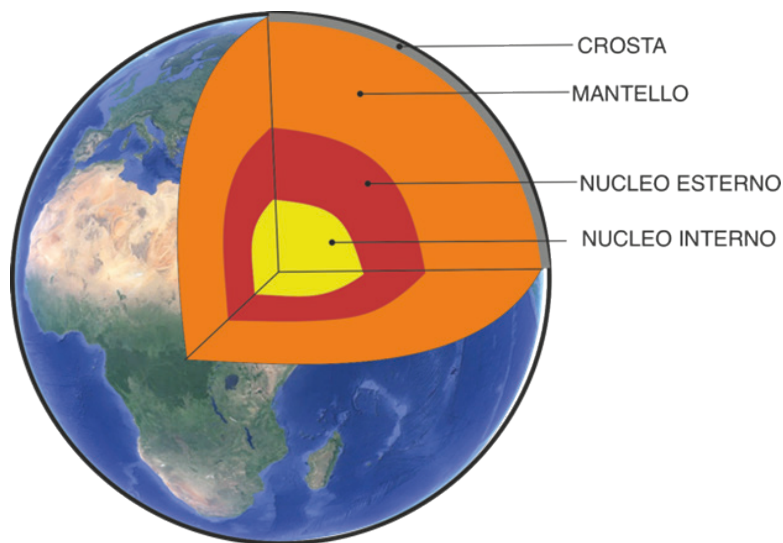


Fig. 2.3 Rappresentazione della separazione in diversi involucri che formano il pianeta Terra: dal nucleo interno fino alla sottile pellicola di crosta. (Schema: Lorenzo Bonini)

scoso. Anche all'interno del Mantello sono presenti degli imponenti moti convettivi, conseguenza degli squilibri termici che esistono tra le porzioni interne ed esterne del pianeta. Infine, come involucro più esterno troviamo la Crosta, sottile pellicola di roccia solida dello spessore di poche decine di chilometri (20-30 km) che è sottoposta agli intensi sforzi deformativi indotti dai movimenti convettivi più profondi.

Presa coscienza delle dimensioni degli involucri, e delle differenze termiche che esistono tra di essi, rimane da comprendere come questo calore sia ancora presente all'interno del Pianeta inducendo questi grandi movimenti convettivi.

Ovvero la domanda è: qual è il motore che mantiene in vita (caldo) il pianeta? La risposta è la radioattività connessa con il decadimento di alcuni elementi, come l'Uranio, presenti sia nel Mantello che nel Nucleo.

La convezione come meccanismo di trasferimento di calore mediante movimento del materiale è un fenomeno che ben comprendiamo, anche perché lo possiamo osservare nella vita di tutti i giorni, basta pensare a quanto avviene all'acqua in un recipiente quando viene riscaldata. Trasferire questo concetto al nostro globo richiede solo uno sforzo mentale e cambiare la dimensione del recipiente o la velocità con cui il movimento di ciò che esso contiene avviene.

Per quanto riguarda le dimensioni,

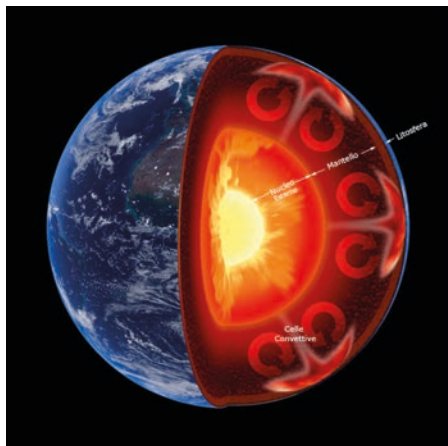


Fig. 2.4 Moti convettivi all'interno del Mantello Terrestre. Fonte: Johan Swan/123RF Archivio Fotografico – Modificato da M. Pregliasco.

si può rimandare a quanto riportato in precedenza a proposito di quanto è spesso, ad esempio, il Mantello. La velocità invece è più difficile da percepire. Come siamo in grado di comprendere la velocità con cui avvengono questi moti convettivi? La risposta risiede nella velocità che registriamo in superficie e che riguarda la migrazione (deriva) delle placche della crosta terrestre.

Senza voler raccontare l'epopea che ha portato all'avvento del modello della Tettonica delle Placche, una teoria che spiega i moti delle placche e accettata dalla comunità scientifica da meno di un secolo, è interessante capire quali sono gli strumenti che

consentono di capire che le placche sono in movimento.

La misura degli spostamenti della superficie terrestre si basano sul cosiddetto sistema satellitare globale di navigazione (in inglese *Global Navigation Satellite System*; GNSS), volgarmente conosciuto anche con il termine desueto di GPS. Tali misure ci consentono di sapere che le velocità massime relative tra una zona e l'altra del pianeta si aggirano nell'ordine di qualche centimetro all'anno (valori massimi intorno al 5-7 cm/anno). Questi spostamenti sono uniformi? Tutte le zone del pianeta di muovono alla stessa velocità? La risposta scontata è no, e proprio questa differenza nei tassi di spostamenti delle diverse zone è alla base della modifica continua del paesaggio.

Per comprendere cosa sia la tettonica delle placche manca però ancora sapere cosa significa tettonica e cosa sono le placche. Il termine tettonica deriva da una parola greca che significa "arte del costruire". Nella scienza moderna con tettonica si intende lo studio dei processi di deformazione delle rocce e le strutture che ne risultano. Una placca invece è una porzione della crosta terrestre che ha un movimento sostanzialmente solidale rispetto alle zone limitrofe. Dunque la tettonica delle placche rappresenta lo studio delle deformazioni indotte dal movimento relativo delle placche.

La Crosta terrestre è suddivisa in numerose placche (*Fig. 2.5*). Alcune di esse si stanno avvicinando, altre allontanando e altre ancora scorrendo

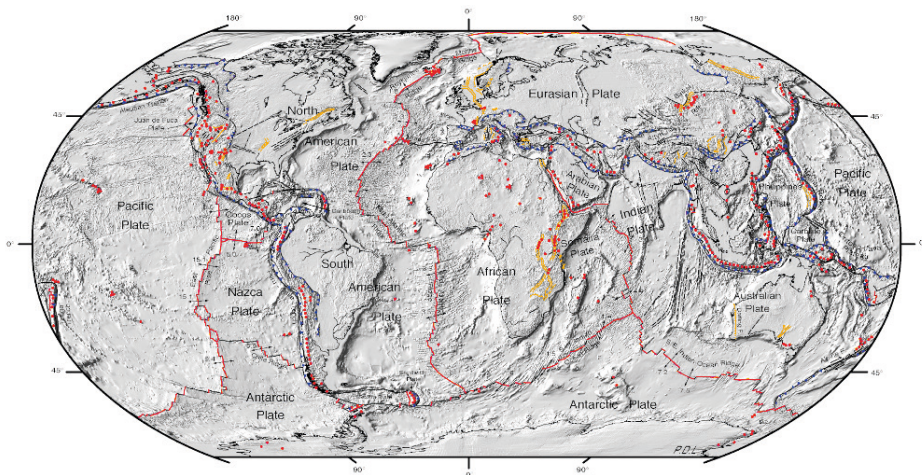


Fig. 2.5 Placche Tettoniche. Le linee rosse e blu rappresentano i principali limiti di placca. (Fonte: Wikipedia)

lateralmente una rispetta all'altra. Questa diversità nel cinematisimo (cinematica in geologia: descrizione del movimento dei corpi rocciosi), introduce al concetto di margini, ovvero le aree periferiche delle placche nel quale esistono interazioni con le placche adiacenti. Esistono tre tipi di margini. I margini convergenti in cui vi è un avvicinamento relativo di due placche adiacenti; margini divergenti in cui le placche adiacenti si allontanano; margini trascorrenti in cui le placche scorrono lateralmente in modo relativo. In modo ancora più semplice, si potrebbe dire che esistono luoghi in cui le placche si scontrano (margini convergenti), si allontanano (margini divergenti), scorrono orizzontalmente le une rispetto alle altre (margini trascorrenti). Questi movimenti relativi sono alla base della creazione di rilievi e della nascita degli oceani.

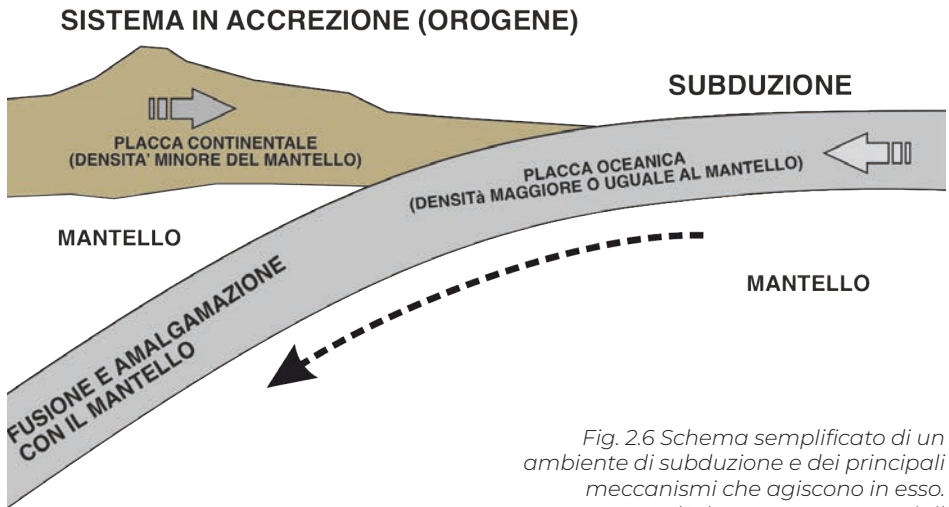
2.3 Il ciclo orogenico e il ciclo di Wilson

Il termine *orogenesi* deriva dalla parola greca *opós* che significa montagna e si riferisce all'origine di un rilievo, o al processo che crea un rilievo. Con il termine *orogene* si intende, invece, in modo generico qualsiasi rilievo. In geologia la connotazione è più precisa e si riferisce ad un processo di creazione di una catena montuosa derivata da un processo di convergenza delle placche. Per comprendere al meglio il *processo orogenico*, conviene introdurre alcuni concetti di geodinamica,

come *subduzione*, *crosta continentale* e *crosta oceanica*.

La differenza tra queste ultime deriva dalla diversa natura e densità delle rocce che le compongono. La crosta continentale è usualmente composta da rocce cosiddette *acide* (es. graniti) aventi una densità relativamente bassa rispetto alle rocce che si trovano nel Mantello sottostante. La crosta oceanica è costituita da rocce cosiddette *basiche* o *ultrabasiche* (es. basalti, gabbro, ecc.) aventi densità uguale o superiore a quella del Mantello. La differenza di densità tra il Mantello e le due tipologie di crosta consente di comprendere un tassello fondamentale della geodinamica e della tettonica delle placche, ovvero la *subduzione*.

La *subduzione* è quel processo che porta una placca con densità uguale o superiore al sottostante Mantello a sprofondare all'interno di esso. Visto che solo la crosta oceanica ha una densità maggiore e uguale al Mantello, sarà proprio questa ad andare in subduzione. Il meccanismo di subduzione è naturalmente agevolato dai movimenti convettivi e dallo scontro delle placche. Infatti la subduzione avviene lungo i margini di due placche quando esse si scontrano (si parla di *margini convergenti* in questo caso) e la più densa scende in profondità, fondendo ed essendo amalgamata con il mantello sottostante (Fig. 2.6).



*Fig. 2.6 Schema semplificato di un ambiente di subduzione e dei principali meccanismi che agiscono in esso.
(Schema: Lorenzo Bonini)*

Il fenomeno della subduzione vede dunque scendere nel mantello una placca di natura oceanica. Quando ci si trova in una condizione di margini convergenti, le placche che si scontrano possono essere di tipo diverso: oceanica con oceanica, oceanica con continentale e continentale con continentale. Solo nei primi due casi si verifica subduzione. Nel terzo caso, dal momento che entrambe le placche hanno densità bassa, non ri-

escono ad andare in subduzione, con la conseguente formazione di un orogene.

Quando due placche si allontanano l'una rispetto all'altra si parla invece di *margini divergenti*. Questo allontanamento porta alla formazione di uno spazio tra le placche. Tale spazio è occupato dalla risalita, dalle regioni più profonde della crosta terrestre, di magma che, solidificando, genera nuova crosta.



*Fig. 2.7 Schema di un margine divergente con la creazione di nuova crosta oceanica.
(Schema: Lorenzo Bonini)*

Può esistere anche il caso in cui ai margini di due placche il movimento sia prevalentemente orizzontale, ossia che le due placche scorrano l'una rispetto all'altra. In questo caso si parla di *margini trascorrenti*. Un esempio classico di margine trascorrente è quello che si trova nella regione della Faglia di Sant'Andrea in California. In questo caso non esiste subduzione o creazione di orogeni.

La velocità con cui si spostano le placche lungo i margini è di alcuni centimetri all'anno. È interessante moltiplicare una velocità media di deriva di una placca per l'età del Pianeta. Si prenda per semplicità un intervallo di tempo di 4 miliardi di anni (l'età della Terra è di 4,5 miliardi di anni) e una velocità di deriva di 3 cm all'anno. Moltiplicando questi due valori abbiamo che una ipotetica placca si è spostata nel corso di 4 miliardi di anni per ben 120'000 km. Sapendo che il raggio del pianeta è circa 40'000 km, una placca potrebbe avere fatto per tre volte il giro del pianeta. Ci sono però delle ulteriori considerazioni, ovvero che una placca durante la sua deriva incontra sempre un'altra placca e che la velocità di deriva che abbiamo preso come riferimento potrebbe essere ben più grande. Questo ragionamento aiuta a capire che l'incontro o l'allontanamento delle placche dall'origine del Pianeta può essere avvenuto decine e decine di volte. Dunque se prendiamo un punto fisso sulla superficie del Pianeta, questo punto può essere stato coinvolto nel

corso del tempo geologico in eventi convergenti, divergenti o trascorrenti decine di volte. Le fasi di divergenza e convergenza tra le placche, si ripetono in modo ciclico: si parla di Ciclo di Wilson.

Il Ciclo di Wilson prende il nome da uno dei padri moderni della tettonica delle placche, il geologo canadese John Tuzo Wilson (1908-1993). La teoria su cui si basa il Ciclo di Wilson è che in un'area della Terra dove avviene subduzione, a un certo punto si avrà collisione continentale (ovvero la collisione tra due placche continentali), a cui seguirà una fase di divergenza con la creazione di nuova crosta oceanica (*Fig. 2.8*).

In conclusione, dunque, si è compreso come la tettonica delle placche sia il fenomeno che ha plasmato e plasma tutt'ora il pianeta: crea oceani, crea montagne, crea nuova roccia e ne consuma altra.

2.4 Le faglie e le pieghe

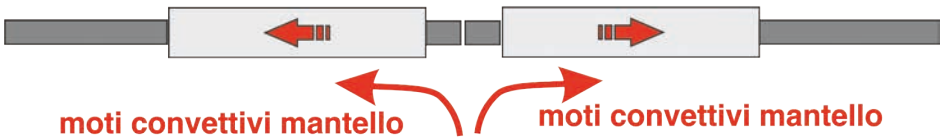
Nella sezione precedente abbiamo introdotto i principali ambienti geodinamici connessi con la tettonica delle placche, ovvero gli ambienti in cui troviamo placche che si scontrano, che si separano e che scrono l'una rispetto all'altra. Ma cosa succede alle rocce che si trovano nelle zone di interazione tra le placche? Ovvero come reagiscono le rocce quando vengono sottoposte a compressione (margini convergenti), estensione (margini divergenti) o trascorrenza? La risposta è che le rocce si deforma-

CICLO DI WILSON

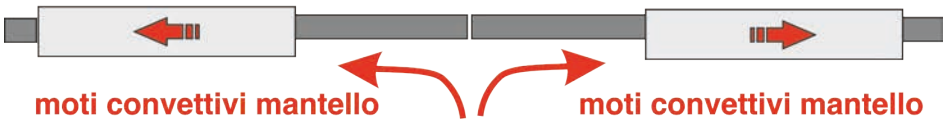
1. PLACCA STABILE



2. RIFTING (SEPARAZIONE PLACCA)



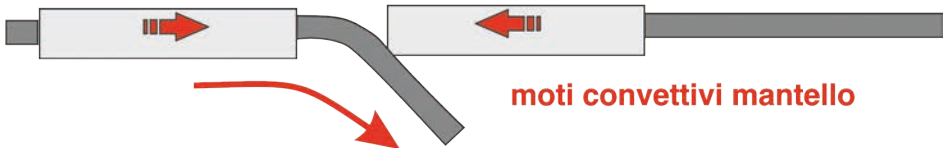
3. CREAZIONE PLACCA OCEANICA



4. SUBDUZIONE PLACCA OCEANICA



5. CHIUSURA OCEANO



6. COLLISIONE CONTINENTALE (OROGENESI)

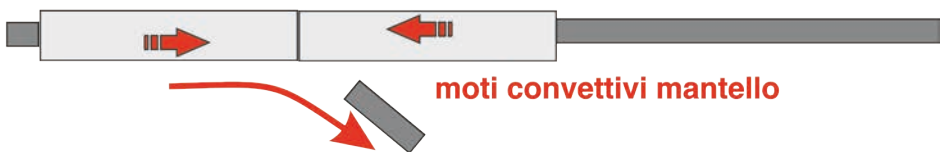


Fig. 2.8 Rappresentazione del Ciclo di Wilson.
(Schema: Lorenzo Bonini)

no. Ma come si deformano? E quali sono le leggi fisiche che governano queste deformazioni? Per semplicità qui saranno descritte le deformazioni che avvengono nella parte solida più esterna del pianeta, ovvero quella che viene chiamata Crosta Superiore.

Le rocce della Crosta quando sono sottoposte a degli sforzi (sforzi tettonici), possono reagire in due modi: avere un comportamento *fragile* o *duttile*. Fragile significa che una roccia sottoposta ad uno sforzo si romperà. Duttile significa che la roccia si piegherà, ossia si deformerà senza rompersi. Ricordando questi due comportamenti, si è introdotto anche il concetto che sta alla base delle due strutture tettoniche principali, ovvero le *faglie* e le *pieghe*. Entrambe queste strutture derivanti dalla deformazione delle rocce si formano nella Crosta superiore e possono coesistere. Il fatto che una roccia si pieghi, si fagli, o entrambe le cose, dipende dal loro *comportamento reologico*, ovvero

dal come le rocce reagiscono quando sono sottoposte ad uno sforzo. Uno esempio utile per mostrare il diverso comportamento reologico è immaginare di sottoporre a compressione all'interno di una pressa un blocco di granito e un blocco di salgemma. A parità di sforzi si osserverà che il blocco di granito si rompe (*fagliazione*) e il blocco di salgemma si schiaccia piegandosi (*piegamento*).

Come si descrivono e categorizzano le pieghe e le faglie? Per quanto riguarda le faglie, prima di discutere le varie tipologie, conviene introdurre il concetto di *tetto* e *letto*. Se una faglia è una frattura lungo il quale si muovono le rocce, si identifica il tetto come il blocco di roccia che si trova geometricamente sopra la faglia. Il letto invece è il blocco di roccia sottostante una faglia. Le faglie sono suddivise in tre tipologie: *inverse*, *normali* e *trascorrenti*. Nelle *faglie inverse* il blocco di roccia di tetto si muove risalendo lungo il piano di faglia. Nel-

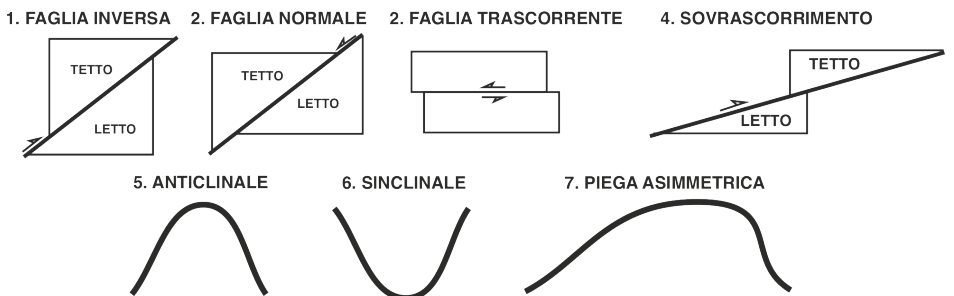


Fig. 2.9 Tipologie di faglie e pieghe. (Schema: Lorenzo Bonini)

le *faglie normali* il blocco di roccia scende lungo il piano di faglia. Nelle *faglie trascorrenti*, le rocce scorrono lateralmente l'una rispetto all'altra (Fig. 2.9). Un particolare tipo di faglie inverse sono i *sovrascorrimenti* (in inglese *thrust*) che sono delle faglie inverse a basso angolo lungo le quali è stato osservato un trasporto (in gergo *rigetto*) di una notevole entità.

Per quanto riguarda le pieghe, invece, la loro categorizzazione dipende dalla loro forma. Esistono le *anticlinali* che mostrano una forma ad "U rovesciata" o ad "A" e le *sinclinali* che invece hanno una forma ad "U" o ad "A rovesciata".

Un esempio pratico semplice per mostrare come le strutture tettoniche si formano come conseguenza di uno sforzo applicato ad un oggetto, si può prendere un foglio di carta tenendone le estremità con le mani. Avvicinando le mani si osserverà che il foglio si deforma formando delle pieghe. Lo stesso meccanismo avviene in natura, seppur con tempi molto più lenti.

2.5 Evoluzione di un orogene

Come detto in precedenza, con il termine *orogenesi* si intende un processo che porta alla creazione di un rilievo. Con il termine *orogene*, si fa riferimento al risultato del processo orogenico, ovvero al processo di formazione di una catena montuosa. Tutte le catene montuose che si trovano sul nostro pianeta rappresentano il risultato di una orogene-

si avvenuta in corrispondenza di un margine convergente. Il ciclo orogeo-nico inizia con la convergenza di due placche e il caso più comune è quello in cui iniziano a convergere due placche di natura diversa: una oceanica e una continentale (Fig. 2.10).

Il primo effetto della convergenza di una placca continentale e una oceanica è che la placca a maggior densità, ovvero la placca oceanica, inizierà a subdurre. La placca che procederà in subduzione viene anche chiamata placca inferiore. La placca che invece salirà sopra a quella in subduzione, in gergo *sovrascorrerà* la placca in subduzione, si chiamerà placca superiore. Dal momento in cui inizia la subduzione, la placca superiore si comporterà come una sorta di bulldozer che tenderà ad affastellare ammassare il materiale roccioso compreso tra le due placche che si affastellerà rompendosi e deformandosi, andando a creare un *cuneo orogenico* (Fig. 2.11).

In un sistema orogenico prende il nome di zona interna (*hinterland*) quell'area da cui proviene il "bulldozer" (spesso chiamato in gergo tecnico *backstop rigido*), e esterno (*foreland*, in italiano *avampaese*) l'area verso la quale si dirige il "bulldozer". Ma come reagisce la placca inferiore all'avanzamento del cuneo orogenico spinto dal "bulldozer"? Reagisce allo stesso modo di una trave sottoposta ad un carico concentrato solo in un suo estremo ed inizia a flettere, mentre in posizione più lontana al carico

tenderà a sollevarsi. La conseguenza della flessione è la formazione di un bacino sedimentario di fronte alla catena in sollevamento, chiamato *avanfossa*, limitato nella sua parte interna dal cuneo orogenico. Più lontano dalla catena, invece, la flessione della placca inferiore darà luogo a un rigonfiamento, detto *forebulge*.

Il sistema catena montuosa, *avanfossa* e *forebulge* è dinamico e tende a spostarsi nel tempo. Un punto della crosta che si trovi nella direzione in cui sta spingendo il bulldozer, prima sarà interessato al sollevamento dovuto alla formazione del *forebulge*, poi verrà a trovarsi nell'*avanfossa*, e infine verrà coinvolto nelle deformazioni compressive del cuneo orogenico.

2.6 Le rocce sedimentarie

Le rocce si dividono in tre grandi gruppi: sedimentarie, magmatiche e metamorfiche. In questa guida de-

scriveremo solo le caratteristiche e le tipologie principali di rocce sedimentarie, perché nel Carso sono presenti unicamente rocce di questo tipo.

Le rocce sedimentarie sono quelle rocce che, attraverso un processo di litificazione, derivano dai sedimenti. I sedimenti sono l'accumulo di particelle di materiale solido che avviene durante il processo di sedimentazione un fenomeno molto importante nella dinamica della Terra e intimamente legato ai processi che ne dominano l'evoluzione coinvolgendo la litosfera, l'atmosfera, l'idrosfera e la biosfera.

I sedimenti possono derivare dai processi erosivi che interessano le rocce che formano la crosta terrestre. Ad esempio, l'azione degli agenti atmosferici produce la disgregazione delle rocce e la formazione di sedimento che può essere trasportato dai fiumi, dai ghiacciai o dal vento e accumulato nei mari, nelle pianure alluvionali,

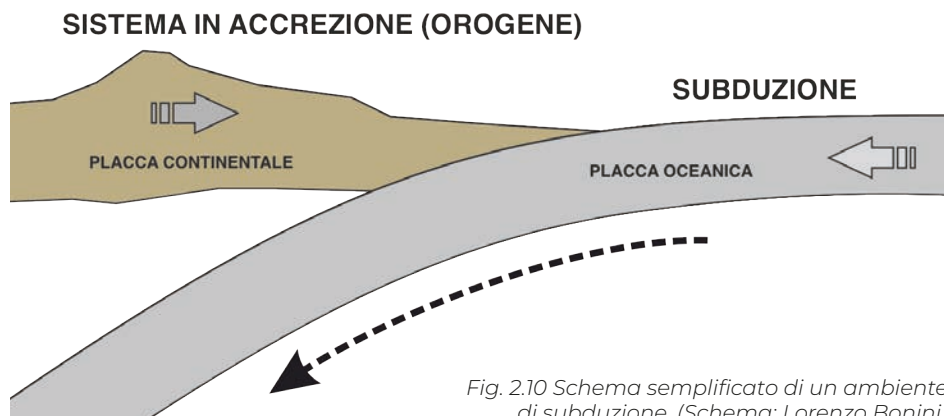


Fig. 2.10 Schema semplificato di un ambiente di subduzione. (Schema: Lorenzo Bonini)

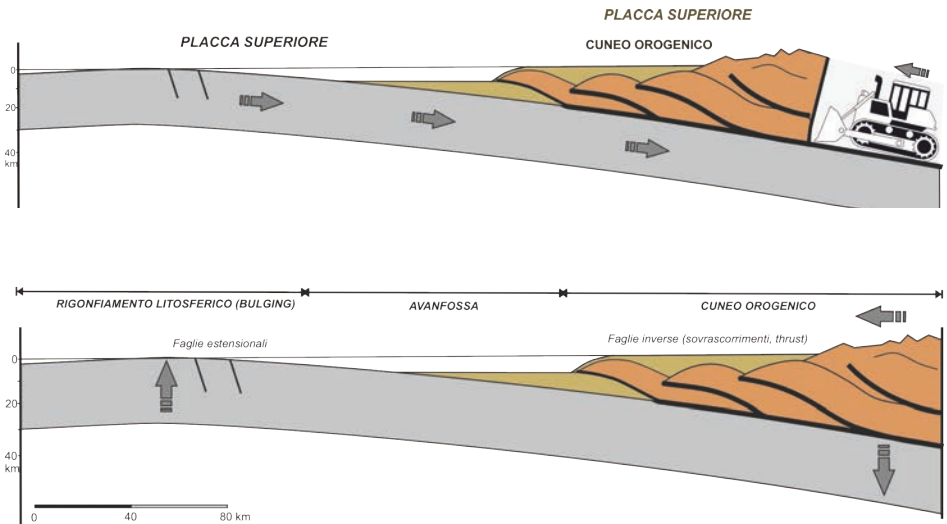


Fig. 2.11 Dettaglio di un sistema orogenico. (Schema: Lorenzo Bonini)

Fig. 2.12 Principali domini che si ritrovano in un sistema orogenico in evoluzione. (Schema: Lorenzo Bonini)

eccetera. Sedimenti si possono però anche accumulare a seguito della precipitazione diretta di minerali che vanno a formare particelle solide. È questo il caso dei gusci degli organismi marini che possono accumularsi sui fondali dei mari oppure della formazione di stalattiti e stalagmiti nelle grotte. I processi di sedimentazione avvengono quindi in molti luoghi della Terra, sia sui continenti che negli oceani.

Per divenire rocce sedimentarie, i sedimenti devono andare incontro a una litificazione. La litificazione comprende un insieme di processi che portano un sedimento sciolto – cioè un sedimento in cui le varie particelle non sono legate tra loro e possono

quindi muoversi l'una rispetto all'altra – ad essere cementato e divenire roccia a tutti gli effetti. La litificazione può avvenire in tempi più o meno lunghi e in genere coinvolge, in misura più o meno importante, fenomeni di compattazione e *diagenesi*, cioè tutta una serie di trasformazioni chimico-fisiche a cui un sedimento va incontro dopo la sua deposizione. Un'altra caratteristica peculiare delle rocce sedimentarie è che spesso presentano una *stratificazione*, in esse, cioè, sono riconoscibili degli *strati*. Uno *strato* (o una *lamina* quando è di spessori millimetrici o anche inferiori) in geologia è una massa di roccia, dotata di caratteristiche abbastanza omogenee, delimitata al tetto e al

letto (cioè al di sopra e al di sotto) da superfici grossolanamente parallele dette *piani di stratificazione o giunti di strato*. La formazione di uno strato (o una lamina) è intimamente legata al processo di sedimentazione che è per sua natura discontinuo. Si può dire che uno strato rappresenta un evento di sedimentazione, ossia un lasso di tempo in cui ci sia stato accumulo di un sedimento con caratteri abbastanza omogenei. In genere, gli strati più antichi vengono ricoperti da strati depositati in eventi successivi e quindi più eventi di sedimentazione che si susseguono nel tempo portano alla formazione di una *successione di strati*. Il tempo di deposizione di uno strato è estremamente variabile. In alcuni casi uno strato spesso pochi millimetri può impiegare migliaia di anni per formarsi, in altri, in poche ore possono depositarsi strati dello spessore di decine di metri. La velocità a cui si accumulano i sedimenti è un parametro molto importante in geologia e viene chiamato *tasso di sedimentazione*.

Non tutte le rocce sedimentarie sono stratificate allo stesso modo. In alcuni casi si possono osservare numerosi strati molto sottili, in altri casi strati più spessi, in altri ancora gli strati possono essere difficilmente distinguibili. Talvolta può essere molto difficile capire quale sia la stratificazione per la presenza di fratture pervasive che risultano più evidenti delle superfici di strato. In questi casi è necessario prestare attenzione se possono es-

sere individuati elementi che certamente sono indicativi della originale stratificazione quali, per esempio, accumuli di fossili o laminazioni dovute alla corrente.

Infine, una caratteristica peculiare delle rocce sedimentarie è che esse possono contenere *fossili*, cioè resti mineralizzati di organismi o tracce della loro esistenza (è il caso questo delle *bioturbazioni*). Il contenuto in fossili, detto *contenuto fossilifero*, può essere molto variabile e fornisce delle indicazioni molto importanti sulle caratteristiche ambientali in cui i sedimenti che formano una roccia sedimentaria si sono depositati. La presenza di fossili di organismi marini in una roccia sedimentaria, ad esempio, testimonia che i sedimenti che hanno dato origine a quella roccia si sono depositati in mare. Inoltre, dal momento che la vita nel corso della storia della Terra si è evoluta con la comparsa di nuovi organismi e l'estinzione di altri, le rocce sedimentarie rappresentano un archivio fondamentale dell'evoluzione della vita sulla Terra e i fossili possono dare delle indicazioni sull'età delle rocce che li contengono.

2.6.1 Rocce terrigene e rocce carbonatiche

Esistono due tipologie principali di rocce sedimentarie: le *rocce terrigene* (o *clastiche*) e le *rocce carbonatiche*.

Le *rocce terrigene* derivano da sedimenti formati a seguito dell'erosio-

ne di rocce preesistenti sulla superficie terrestre, trasportati per lunghi tratti ad opera di fiumi, ghiacciai e venti e quindi accumulatisi nei mari o sui continenti. I processi che dominano l'accumulo di sedimenti terrigeni sono prevalentemente processi fisici quali la gravità e la dinamica dei fluidi e tali processi sono sostanzialmente rimasti gli stessi nel corso della storia della Terra. Questo ha un'importante conseguenza, ed è che nello studio delle rocce terrigene è possibile applicare con una certa sicurezza il principio dell'*attualismo*, secondo il quale i fenomeni geologici o fisici che operano adesso, hanno sempre agito, con la stessa intensità, nel passato (il presente è la chiave per capire il passato).

Le *rocce carbonatiche*, invece, derivano dalla precipitazione diretta (generalmente in acqua marina, ma esistono anche carbonati continentali) di particelle costituite da minerali del gruppo dei carbonati, in prevalenza carbonato di calcio (CaCO_3). Nella maggior parte dei casi i sedimenti carbonatici si accumulano *in situ*, ovvero nel luogo stesso in cui precipitano, oppure, anche se esistono delle eccezioni, non subiscono trasporto per lunghi tratti. La formazione di sedimenti carbonatici prevede, inoltre, un coinvolgimento più o meno importante di processi biologici perché nel processo di precipitazione giocano un ruolo più o meno attivo gli organismi viventi. Dal momento che, come già detto, la vita si è evoluta nel

corso della storia della Terra, ne consegue che i meccanismi di formazione di sedimenti e rocce carbonatiche possono essere cambiati nel tempo. Questo ha come conseguenza il fatto che l'*attualismo* deve essere applicato con cautela quando si studiano le rocce carbonatiche.

Le rocce carbonatiche costituite da carbonato di calcio sono chiamate anche calcari, ma esiste anche un'altra tipologia di roccia carbonatica, cioè le dolomie. Le dolomie sono rocce che sono prevalentemente costituite da dolomite (formula $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Questo minerale difficilmente precipita direttamente alle condizioni che si trovano attualmente nell'acqua marina, ma esistono notevoli volumi di rocce dolomitiche sulla Terra. Questo apparente paradosso è spiegato in due modi. Ci sono evidenze che indicano che nel passato geologico ci siano potute essere delle diverse condizioni chimiche delle acque degli oceani e che questo abbia permesso la precipitazione diretta di grandi volumi di dolomite. Inoltre, il fenomeno della *dolomitizzazione* è possibile durante la *diagenesi*, cioè durante i processi di trasformazione più o meno intensa a cui un sedimento e poi una roccia vanno incontro durante la loro storia. Uno dei fenomeni che può portare alla dolomitizzazione, per fare un esempio, è la circolazione di fluidi ricchi in magnesio all'interno di rocce e sedimenti carbonatici. Questo, dal momento che la dolomite è proprio un carbonato doppio di calcio e ma-

gnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), può facilitare la precipitazione di questo minerale.

2.6.2 Distinguere calcari e dolomie

Distinguere calcari e dolomie a occhio nudo può essere molto difficile. Un facile metodo per farlo, anche se ci si trova in escursione sul terreno, è quello di osservare la reazione che avviene versando sulla roccia un po' di acido cloridrico (HCl). Si raccomanda di utilizzare, per questo piccolo esperimento, acido diluito (in genere al 10%). L'acido cloridrico reagisce in maniera molto evidente con il calcare, dando luogo a una forte effervescenza dovuta al fatto che l'acido reagisce con il carbonato di calcio

producendo un sale solubile, acqua e anidride carbonica (Fig. 2.13). Tale reazione, invece, non avviene se l'acido cloridrico diluito viene versato su una dolomia.

2.6.3 Osservazione delle rocce sedimentarie sul terreno e nozioni per la loro classificazione

Esistono vari tipi di classificazione delle rocce sedimentarie. La classificazione, lungi dall'essere un mero esercizio di nomenclatura, è importante perché fornisce indicazioni precise circa le caratteristiche fisiche delle rocce e informazioni circa le condizioni esistenti nell'ambiente dove i sedimenti da cui esse derivano si depositavano.

Va detto che per effettuare una corretta classificazione delle rocce non è in genere sufficiente una loro osservazione ad occhio nudo. L'osservazione andrebbe sempre effettuata su "frattura fresca" ossia su un frammento staccato dalla roccia nel momento in cui si effettua l'osservazione e con l'ausilio di una lente di ingrandimento (in genere i geologi usano quelle con ingrandimento 10X o 12X, Fig. 2.14).

Un'altra metodologia molto importante per lo studio e la classificazione delle rocce è l'osservazione al microscopio di sezioni sottili. Una sezione sottile è una sottile fetta di roccia, dello spessore di circa 30 micron, che può essere attraversata dalla luce e quindi esaminata utilizzando dei particolari microscopi detti a luce tra-

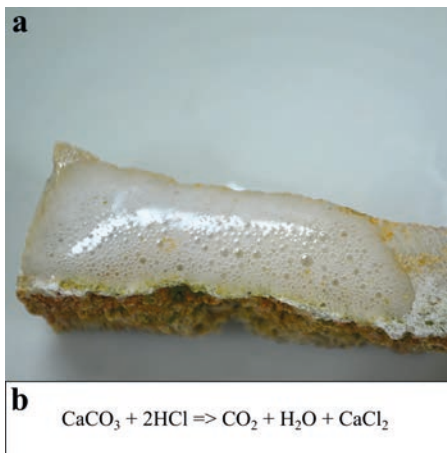


Fig. 2.13 Effervescenza al contatto tra acido cloridrico e un calcare. La reazione produce anidride carbonica (CO_2), acqua (H_2O) e cloruro di calcio (CaCl_2). Tale reazione non si verifica se l'acido cloridrico viene versato su una dolomia. (Fonte: Wikipedia)



Fig. 2.14 a) I due principali strumenti per l'osservazione delle rocce in affioramento: il martello da geologo e la lente di ingrandimento. b) come utilizzare correttamente la lente di ingrandimento. La lente va tenuta vicino all'occhio in modo da avere il maggior campo visivo possibile e poi il campione, che deve presentare una frattura fresca deve essere avvicinato fino ad essere messo a fuoco. Per migliorare la visibilità della tessitura della roccia e dei suoi componenti, specialmente quando si osservano rocce carbonatiche, è importante bagnare la superficie che viene osservata.

(Foto: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)

smessa. In questa guida vengono forniti solo alcuni esempi di classificazione delle rocce terrigene e di quelle carbonatiche che possono essere utili a discutere le caratteristiche nel corso di una escursione.

Una semplice metodologia per la classificazione delle rocce terrigene si basa sull'osservazione delle dimensioni dei granuli che le costituiscono. I termini generalmente utilizzati sono:

conglomerato (quando i grani sono arrotondati)	diametro grani > 2 mm
breccia (quando i grani sono angolosi)	diametro grani > 2 mm
arenite (che può essere da fine a grossolana)	diametro grani < 2 mm > 0.05 mm
siltite	diametro grani < 0.05 mm > 0.005 mm
argillite	diametro grani < 0.005 mm

Nel caso dei termini più fini, i grani non sono visibili ad occhio nudo, ma si può fare ricorso a un metodo empirico. Se si bagnano un silt e un'argilla esse si comportano in modo diverso se vengono manipolate tra due dita di una mano. Nel caso del silt si sentirà una certa ruvidezza, nel caso dell'argilla, invece, si

percepirà una untuosità dovuta al fatto che le particelle che la compongono sono finissime. Per i termini più grossolani, dall'arenite in su, possono invece essere utilizzati dei *comparatori granulometrici*.




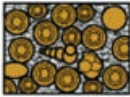

La classificazione può essere poi arricchita con aggettivi che si riferiscono alla composizione dei grani. Ad esempio, un'arenite in cui i grani sono prevalentemente costituiti da quarzo sarà definita arenaria quarzosa, un conglomerato in cui i ciottoli sono costituiti da tante rocce di tipo diverso sarà definito conglomerato *poligenico*, mentre invece se tutti i ciottoli sono costituiti dalla stessa roccia sarà definito *monogenico*.

Per la classificazione delle rocce carbonatiche, invece, ci riferiamo qui a una versione semplificata della Classificazione di Dunham (Fig. 2.15). Questa classificazione parte dalla considerazione del fatto che le rocce carbonatiche sono costituite da tre componenti principali: i grani (che sono tutti i frammenti, spesso di fossili, riconoscibili all'interno della roccia), la matrice (che è costituita da una pasta di fondo carbonatica fatta da cristalli di carbonato così piccoli dall'essere invisibili, spesso anche al microscopio) e da cemento (un precipitato di minerale carbonatico che si presenta sotto forma cristallina di vario tipo). Le proporzioni tra questi componenti dipendono dall'ambiente deposizionale in cui si sono depositati i sedimenti da cui le rocce hanno origine e nel loro complesso costitui-

scono quella che viene chiamata *tessitura deposizionale* di una roccia. La classificazione di Dunham attribuisce dei nomi alle rocce carbonatiche in funzione delle proporzioni tra i grani, la matrice e il cemento e al fatto che il carbonato sia precipitato al momento della deposizione con una struttura più o meno rigida. Si parla di:

- mudstone: grani non a contatto tra loro, dispersi nella matrice, costituiscono meno del 10% del volume della roccia.
- wakestone: grani non a contatto tra loro, dispersi nella matrice, costituiscono più del 10% del volume della roccia.
- packstone: grani a contatto tra loro nella matrice, ancora abbondante negli spazi tra i grani.
- grainstone: grani a contatto tra loro, matrice scarsa o assente, abbondante cemento.
- boundstone: roccia carbonatica in cui esiste evidenza che il sedimento carbonatico sia precipitato formando una struttura più o meno rigida. È questo il caso, ad esempio, delle rocce formate dai coralli che crescono l'uno sull'altro, cementandosi.
- carbonato cristallino: struttura completamente cristallina e tessitura originaria non riconoscibile. Questa tessitura può riscontrarsi frequentemente in caso di dolomie.

Per fare due esempi di come la classificazione delle rocce possa dare delle indicazioni circa le condizio-

Original components not bound together at deposition				Original components bound together at deposition. Intergrown skeletal material, lamination contrary to gravity, or cavities floored by sediment, roofed over by organic material but too large to be interstices
Contains mud (particles of clay and fine silt size)		Lacks Mud		
Mud-supported		Grain-supported		
Less than 10% Grains	More than 10% Grains			
Mudstone 	Wackestone 	Packstone 	Grainstone 	Boundstone 

ni ambientali in cui i sedimenti da cui originano si sono depositati, un conglomerato si forma a partire da sedimenti che hanno subito un certo trasporto e dunque sono stati arrotondati, ma pur sempre in prossimità dalla sorgente rocciosa da cui provengono. Le areniti fini o le siltiti, invece, indicano un trasporto molto più prolungato e derivano da sedimenti accumulati generalmente in grande quantità a distanze considerevoli dalla sorgente. Per quello che riguarda le rocce carbonatiche, rocce con abbondante matrice sono generalmente indicative di una deposizione di sedimenti in ambienti tranquilli, mentre l'assenza di matrice può essere indice di condizioni idrodinamiche agitate che hanno favorito la sciacquatura del sedimento e la rimozione della matrice carbonatica fine.

Fig. 2.15 Classificazione delle rocce carbonatiche proposta da Dunham (1962). Questa classificazione si basa sulle caratteristiche della tessitura deposizionale delle rocce carbonatiche.

2.7 Geologia del Carso

Le rocce che affiorano nel territorio del Carso sono esclusivamente di tipo sedimentario. Nello specifico sono rappresentati i due principali tipi di rocce sedimentarie, le terrigene e le carbonatiche, con una netta prevalenza delle seconde. La stragrande maggioranza del substrato roccioso che costituisce l'ossatura dell'altopiano del Carso è infatti costituita da calcari e, in subordine, da dolomie. L'abbondanza di rocce carbonatiche, ed in particolare di calcari, è la ragione principale per cui il Carso è luogo pa-

radigmatico per il fenomeno del *carsismo*, ossia per tutti quei fenomeni di dissoluzione e accumulo dovuti all'interazione chimica dell'acqua con le rocce calcaree.

2.7.1 Stratigrafia

Le rocce sedimentarie affioranti nel Carso classico italiano si sono formate tra il Cretacico e l'Eocene, ossia tra circa 110 e 45 milioni di anni fa. Si tratta di rocce derivanti da sedimenti depositati prevalentemente in ambienti marini anche se ci sono evidenze di periodi in cui c'è stata influenzata di acque continentali e sono frequenti le testimonianze di momenti in cui l'area del Carso era una terra emersa. Le rocce del Carso Classico italiano sono raggruppate in delle "unità litostratigrafiche" che comprendono rocce che presentano caratteri simili e testimoniano delle fasi nell'evoluzione paleo ambientale dell'area.

La suddivisione che verrà utilizzata in questa guida (*Fig. 2.16 e descrizioni seguenti*) deriva da una semplificazione di quella proposta nella carta geologica GeoCGT prodotta nel 2013 dal Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Non ha lo scopo di essere completamente esaustiva, ma risponde alla necessità di rendere più facilmente comprensibile la complessa evoluzione degli ambienti sedimentari avvenuta nel corso di 65 milioni di anni. Dettagli ulteriori circa la suddivisione stratigrafica possono essere trovati nella citata GeoCGT e nella carta pubblicata da





Jurkovšek et alii nel 2016.

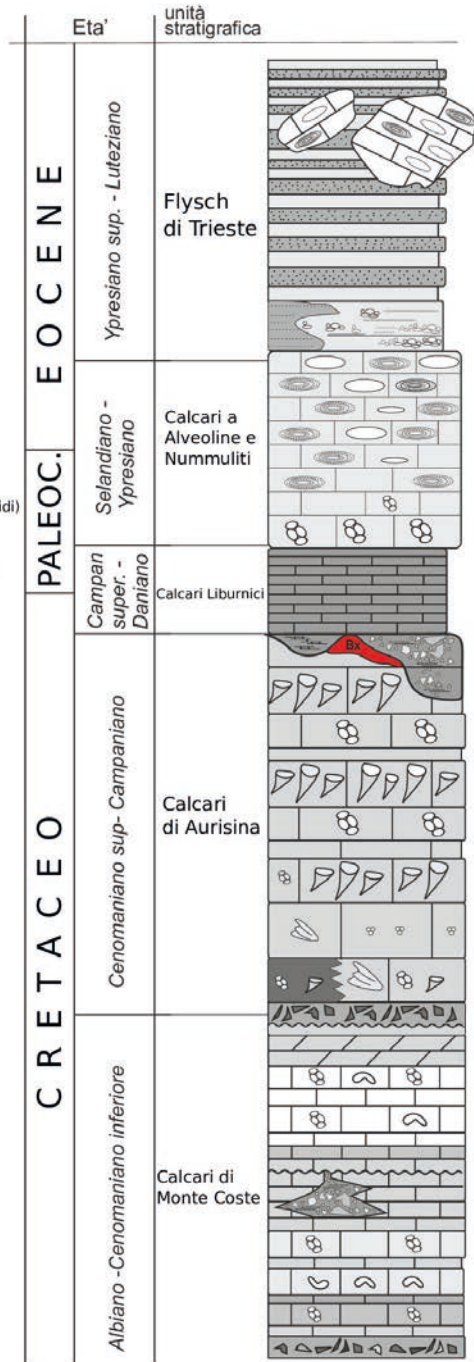
Le rocce carbonatiche del Carso derivano da sedimenti depositati in un ambiente di *piattaforma carbonatica*. Una piattaforma carbonatica è un corpo geologico tipico di ambienti sedimentari marini poco profondi in cui l'accumulo di sedimenti carbonatici dà luogo a delle strutture rilevate sul fondo del mare e caratterizzate da una sommità piatta (da qui il nome di piattaforma). Esempi di piattaforme carbonatiche attuali sono, ad esempio, le Bahamas, le Maldive (*Fig. 2.17*), ma è opportuno ricordare che, come detto sopra, quando si parla di rocce carbonatiche i confronti tra gli ambienti attuali e quelli passati devono essere fatti con cautela perché gli organismi che sono i principali attori nella formazione dei sedimenti carbonatici sono cambiati nel tempo e quindi anche i corpi geologici formati dall'accumulo di questi sedimenti possono avere cambiato le loro caratteristiche.

La piattaforma in cui si formarono le rocce carbonatiche affioranti nel Carso è chiamata Piattaforma Adriatica (*Fig. 2.17*). Si trattava di una grande piattaforma carbonatica le cui rocce affiorano oggi dal Friuli Venezia Giulia, lungo tutte le Dinaridi fino al Montenegro e che si sviluppò a partire dal Giurassico inferiore nell'oceano della Tetide, un ampio braccio di mare allungato in direzione est – ovest che si trovava a latitudini tropicali. Il Carso italiano occupa l'estremità nord occidentale di questa grande piattaforma

a**LEGENDA**

-  nummuliti
-  alveoline
-  rudiste
(p.es hippuritidi e radiolitidi)
-  Chondrodonta
-  foram. planctonici
-  miliolidi
-  requienidi
-  Bx
bauxiti
-  conglomerati
-  breccie

-  arenarie
-  marne
-  dolomie
-  calcari



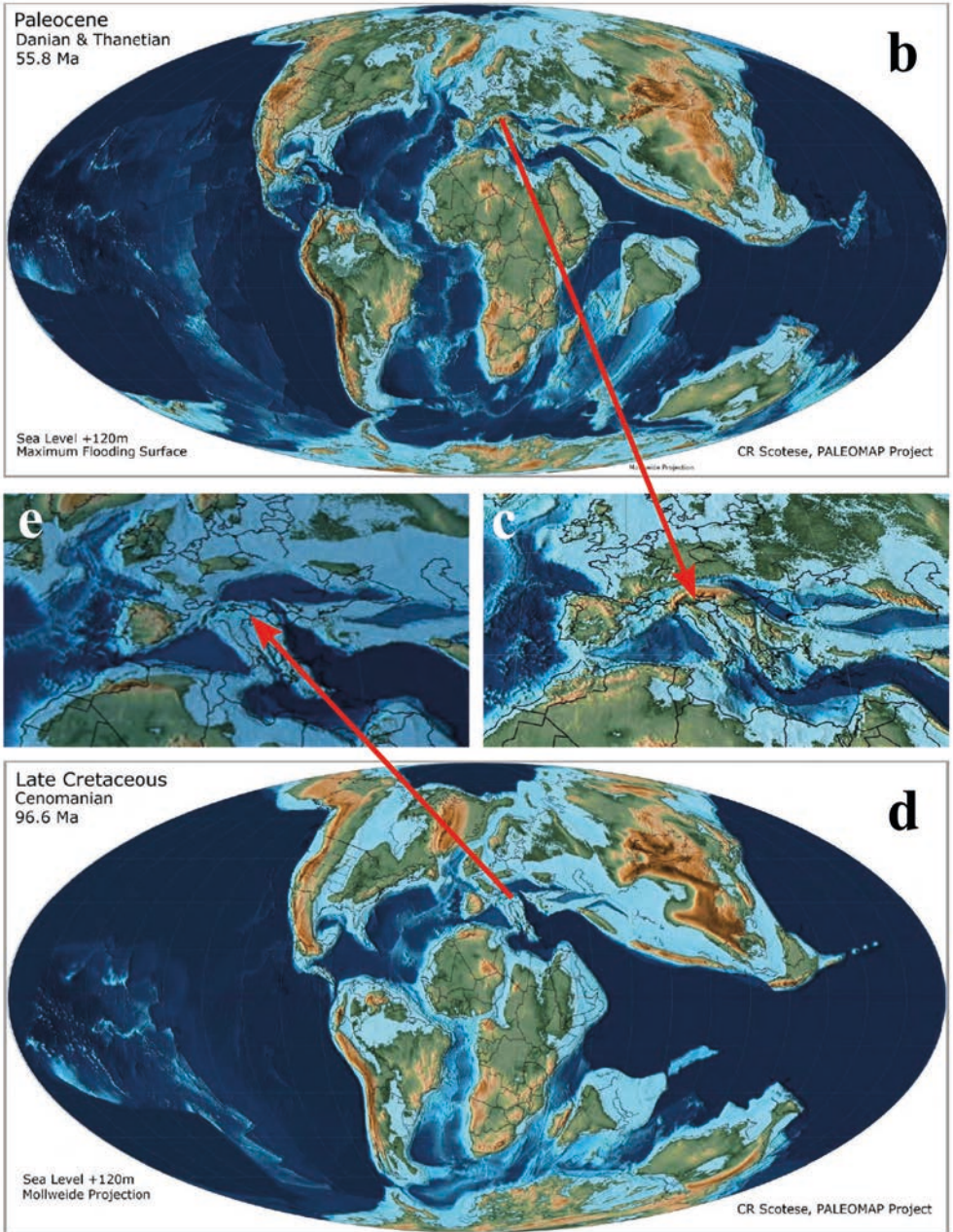
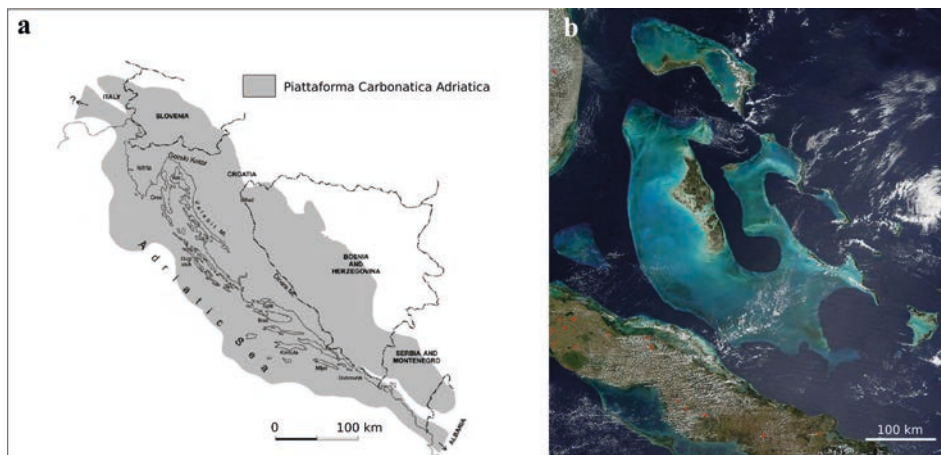


Fig. 2.16 a) Colonna stratigrafica della successione sedimentaria affiorante nel Carso. Sono indicate le unità litostratigrafiche a cui si fa riferimento nel testo. b) paleogeografia nel Cretacico superiore. c) ingrandimento sull'area del Mediterraneo e dell'Europa. d) paleogeografia nel Paleocene. e) ingrandimento sull'area del Mediterraneo e dell'Europa. Mappe paleogeografiche da Scotese (2014). (Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)



che in letteratura viene anche chiamata Piattaforma Friulana.

Le rocce terrigene affioranti nel Carso sono in gran parte dei *flysch*. I *flysch* sono delle rocce particolari che derivano da sedimenti depositati all'interno di bacini sedimentari a seguito di *correnti di torbida* (Fig. 2.18). Le correnti di torbida sono dei movimenti in massa di sedimenti sciolti ricchi in acqua che si verificano nei fondali marini (le correnti di torbida si verificano in genere nei mari, ma possono anche esserci correnti di torbida nei laghi). Le rocce che derivano da questi eventi sono anche dette *torbiditi*. Uno dei contesti in cui si possono accumulare potenti successioni di *torbiditi* sono i *bacini di avanfossa* che si formano al fronte di catene montuose in attivo sollevamento a causa del progressivo aumento del peso

esercitato di un orogene in crescita ed ispessimento sulla litosfera.

2.7.2 Cosa ci racconta la successione stratigrafica del Carso

La successione stratigrafica del Carso, come già accennato, ci racconta l'evoluzione dell'area nel corso di circa 65 milioni di anni, tra il Cretacico e l'Eocene. Durante questo periodo l'area del Carso si trovava a latitudini tropicali e fu per la maggior parte del tempo occupata dal mare dell'oceano Tetide. Tra il Cretacico inferiore e il Cretacico superiore (Calcarei di Monte Coste e Calcarei di Aurisina), il Carso si trovava in una porzione interna della parte nordoccidentale della Piattaforma Adriatica (Fig. 2.18). Il mare era poco profondo e raramente raggiungeva poche decine di metri di profondità. La vicinanza alla superficie

Fig. 2.17 a) paleogeografia della Piattaforma Adriatica nel Cretacico. È evidenziata la geografia attuale dell'area dell'Adriatico orientale e settentrionale e dei Balcani che permette di apprezzare l'estensione di questa piattaforma carbonatica (modificato da Vlahović et al., 2005). Per confronto in b) è mostrato uno dei maggiori esempi attuali di piattaforma carbonatica: i Great Bahama Banks.

rendeva molto frequenti episodi di emersione dovuti ad oscillazioni relative del livello del mare. Già in questo periodo cominciano le prime avvisaglie dell'innalzamento, a nordest della Catena Dinarica, dovuto alle fasi iniziali dell'Orogenesi Alpina. Tra il Cretacico superiore e il Paleocene inferiore le rocce affioranti (Formazione Liburnica) testimoniano un progres-

sivo abbassamento del livello relativo del mare, fortemente influenzato da un innalzamento della crosta terrestre collegato al *bulging litosferico* dovuto all'innalzamento della Catena Dinarica. A seguito di questo sollevamento, che provocò significativi episodi di emersione e fasi caratterizzate da condizioni quasi continentali con apporto di acque dolci, il livello marino incominciò ad innalzarsi di nuovo a causa dell'avvicinarsi dell'avanfossa della Catena Dinarica in avanzamento da nordest in direzione sudovest. Questo permise l'attecchimento di una nuova piattaforma carbonatica rappresentata dai Calcari ad Alveoline e Nummuliti. Questa piattaforma sopravvisse fino all'Eocene inferiore, quando nelle rocce si osserva un brusco cambiamento litologico. Al di sopra dei calcari di piattaforma si trovano rocce che testimoniano condizioni di mare profondo (base del Flysch di Trieste). Questo passaggio rappresenta quello che dai geologi è chiamato *annegamento della piattaforma* e testimonia la cessazione della sedimentazione carbonatica di mare basso dovuta a un forte innalzamento del livello marino. Infine, la successione torbida del Flysch di Trieste testimonia la sedimentazione principalmente dovuta a sedimenti trasportati da correnti di torbida nell'avanfossa della Catena Dinarica. Un elemento interessante è la presenza, nella zona del Castello di Miramare, di grandi blocchi calcarei appartenenti ai Calcari ad Alveoline e Nummuliti

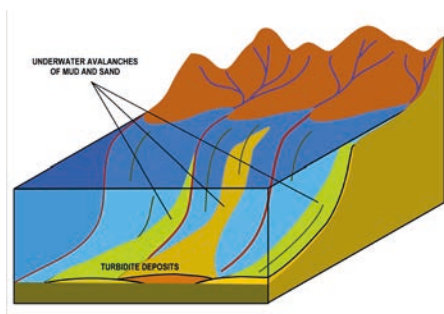


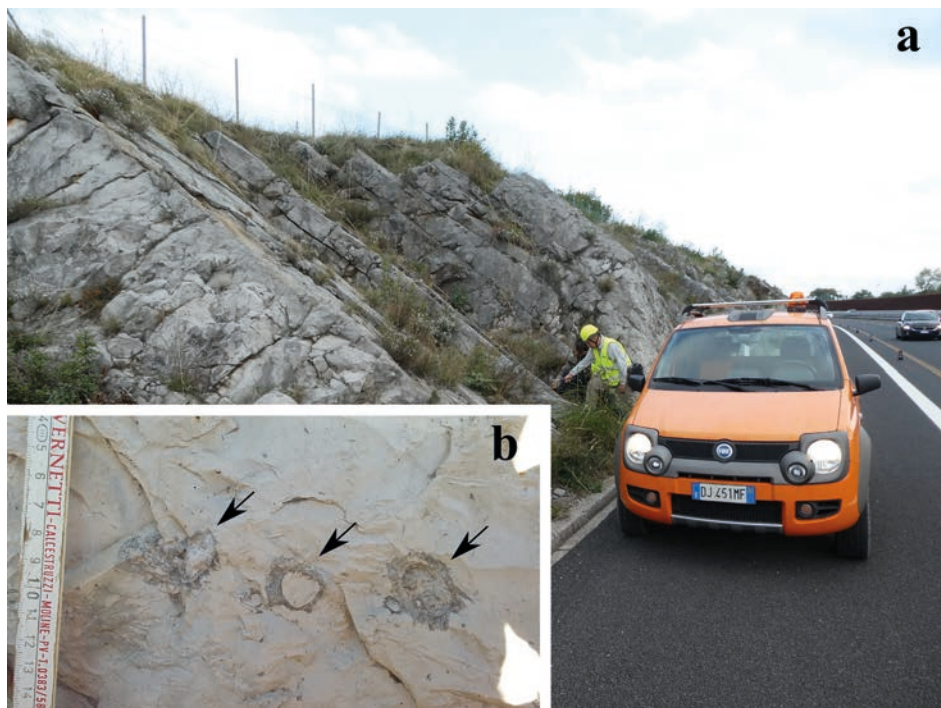
Fig. 2.18 Disegno rappresentante un bacino di avanfossa al fronte di una catena montuosa in sollevamento con evidenziate le frane sottomarine, le correnti di torbida e gli associati depositi torbidaici. Il Flysch di Trieste è costituito in gran parte da torbiditi. Da Wikipedia.

all'interno del Flysch di Trieste (Fig. 2.16). Questi blocchi fanno parte del corpo di una paleo-frana sottomarina depositatasi all'interno del bacino in cui si stavano sedimentando le torbiditi. La presenza di questi blocchi testimonia che il sollevamento della Catena Dinarica arrivò ad un certo punto ad interessare i Calcari ad Alveoline e Nummuliti, provocando il distacco di ampi frammenti della piattaforma.

Nel paragrafo seguente le unità litostratigrafiche affioranti nel Carso sono descritte una ad una con maggiore dettaglio.

2.7.3 Unità litostratigrafiche del Carso
Calcari di Monte Coste (Cretacico inferiore; *Albiano - Cenomaniano inf.*). Corrisponde alle unità "Monte Coste Limestone" e "Monrupino Formation" di Cucchi et al., (2013) e alla "Brje Formation" e "Povir Formation" di Jurkovšek et al. (2016). L'unità comprende calcari da grigio a grigioscuro e nerastri, a matrice fangosa in facies prevalentemente di tipo wackestone, caratterizzati da frequenti accumuli di piccoli foraminiferi bentonici (miliolidi). La porzione sommitale di questa unità è costituita da un potente (>100 metri) spessore di dolo-





mie. Queste rocce sono in letteratura state definite una unità stratigrafica a sé stante denominata “Formazione di Monrupino”.

I Calcari di Monte Coste testimoniano la sedimentazione in un ambiente di piattaforma carbonatica interna (“laguna”) a bassa energia, con locali accumuli di sedimenti più grossolani

Fig. 2.19 Calcari Monte Coste. a) affioramento. b) dettaglio in cui si osservano facies di breccia e calcari laminati. (Foto: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)

Fig. 2.20 Calcari di Aurisina. a) affioramento. b) dettaglio con evidenti fossili di rudiste (indicati dalle frecce). (Foto: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)

(shoal bars) influenzato dalle maree e caratterizzato da forte evaporazione e frequenti episodi di emersione.

Calcari di Aurisina (Cretacico superiore; *Cenomaniano sup.* - *Campaniano*).

Corrisponde al “Aurisina Limestone” di Cucchi et al., (2013) e alle “Repen Formation”, “Sezana Formation” e “Lipica Formation” di Jurkovšek et al.

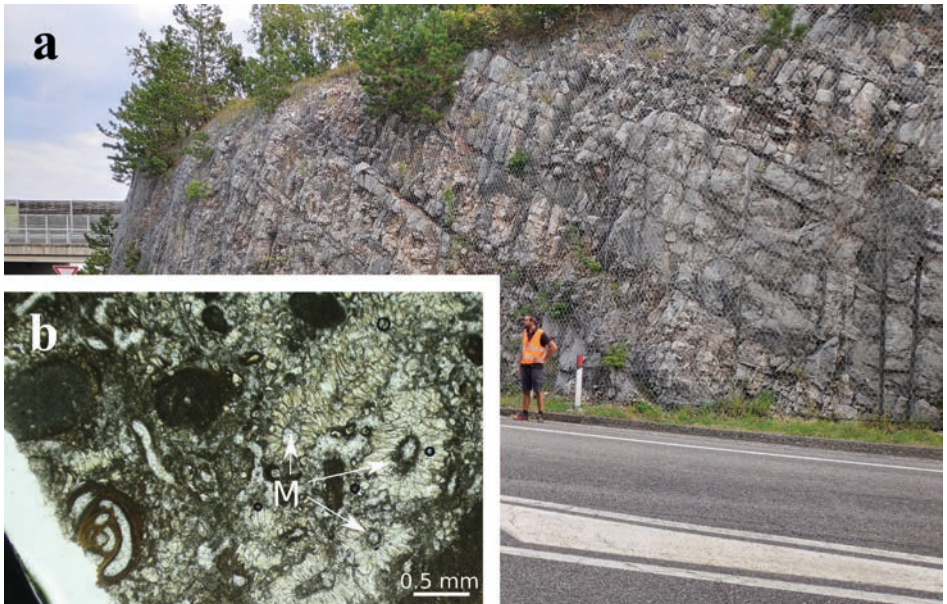
(2016). L'unità comprende calcari bioclastici da grigio-chiari a grigio-scuri, in facies prevalente di tipo packstone o floatstone. Caratteristici sono i gusci appartenenti a grandi bivalvi rudiste e *Chondrodonta*.

I Calcari di Aurisina depositarono in un ambiente di piattaforma carbonatica articolata con aree caratterizzate da bassa energia, bassi fondali con acque più agitate, canali tidali. Frequenti, specialmente nella porzione medio-superiore dell'unità sono gli accumuli di rudiste, intercalati a breccie calcaree formatesi durante brevi episodi di emersione. Al tetto dell'unità breccie di collasso e accumuli di bauxite indicano emersioni più prolungate accompagnate dallo

sviluppo di fenomeni carsici.

Calcari Liburnici (Cretacico superiore – Paleocene; *Campaniano sup. - Daniano*).

Corrispondono alla “Liburnica Formation” di Cucchi et al., (2013) e alle “Liburnia Formation” di Jurkovšek et al. (2016). L'unità comprende calcari a matrice fangosa di colore molto scuro (dal marrone al grigio scuro) in facies tipo wackestone o mudstone. Frequenti sono gli accumuli di organismi bentonici (foraminiferi, ostracodi, gasteropodi, alghe dasicladali, coralli solitari) e le evidenze di ambiente paralico quali ad esempio *Microcodium* (Fig. 2.21). I Calcari Liburnici rappresentano prevalentemente ambienti di bassa profondità paralici caratteriz-



zati da una circolazione ristretta delle acque e dall'influenza di acque dolci di origine continentale.

In alcune località, calcari scuri che, per analogia litologica, possono essere riferiti ai Calcari Liburnici riempiono delle cavità nei Calcari di Aurisina, verosimilmente formatesi a seguito di fenomeni paleo-carsici avvenuti in occasione di emersioni della piattaforma. Particolarmente significativi nell'area Carso sono i sedimenti che, presso Villaggio del Pescatore, hanno restituito alcuni scheletri di dinosauri (Fig. 2.22). Questo ritrovamento rende Villaggio del Pescatore un geosito di rilevanza internazionale perché gli esemplari di dinosauro ritrovati, completi con le ossa in connessione anatomica, oltre ad essere tra i pochissimi dinosauri ritrovati in Italia, sono unici al mondo per l'eccezionalità del loro stato di conservazione.

All'interno dei Calcari Liburnici si situa il passaggio Cretacico/Paleogene (K/Pg), un momento di grande cambiamento nelle faune e flore marine e terrestri a livello mondiale. Al limite K/Pg sono state individuate molteplici evidenze dell'impatto di un grande meteorite che provocò importanti sconvolgimenti ambientali. Al K/Pg molte forme terrestri e marine si estinsero (per esempio dinosauri

e ammoniti) e in seguito nuove altre specie comparvero nei mari e sui continenti.

I Calcari Liburnici testimoniano un aumento dell'influenza continentale e una generale diminuzione della profondità e degli ambienti deposizionali che occupavano l'area del Carso. Questo fenomeno è attribuito a un sollevamento della crosta terrestre dovuto alla crescita della Catena Dinarica. Questo fenomeno di sollevamento distale, tipico dei contesti orogenici, è denominato, come menzionato in precedenza, *bulging litosferico*.

Calcari ad Alveoline e Nummuliti (Paleocene superiore – Eocene inferiore; *Selandiano - Ypresiano*).

Questa unità corrisponde alla "Alveoline and Nummuliti Limestone" di Cucchi et al., (2013) e alla "Alveolinid Nummulitid Limestone" di Jurkovšek et al. (2016). L'unità comprende packstone-grainstone caratterizzati dalla presenza di foraminiferi bentonici miliolidi e, soprattutto, nummulitidi e alveolinidi, a volte molto grandi e visibili a occhio nudo (Fig. 2.23). Sporadici sono livelli di alghe dasicladali e coralli.

I Calcari ad Alveoline e Nummuliti testimoniano la sedimentazione carbonatica in un contesto di rampa carbonatica e di progressivo approfondimento dell'ambiente sedimentario dovuto all'avanzamento dell'avanzamento della Catena Dinarica in sollevamento verso nordest. È inte-

Fig. 2.21 Foto Calcari Liburnici.

a) affioramento.

b) sezione sottile con *Microcodium* (M).

(Foto: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)

Fig. 2.22 Fossili di dinosauro rinvenuti presso Villaggio del Pescatore. a) e b) scheletro del dinosauro chiamato "Antonio". c) e d) scheletro del dinosauro chiamato "Bruno" (foto Lerman).



Tutte le immagini di fossili del sito Villaggio del pescatore sono utilizzate su concessione della Soprintendenza ABAP FVG – MiC e ne è vietata l'ulteriore riproduzione a fini di lucro.

ressante notare come la produzione del sedimento carbonatico muti sensibilmente nei Calcari ad Alveoline e Nummuliti. Sono infatti questi ultimi organismi che in questo tempo sono responsabili della produzione della maggioranza del carbonato, in contrasto con quanto si osserva nei Calcari di Monte Coste dove frequenti erano le stromatoliti, testimonianza di precipitazione carbonatica asso-

ciata alla presenza di microbi (carbonato microbiale) e i Calcari di Aurisina dove importantissimo era il contributo delle rudiste.

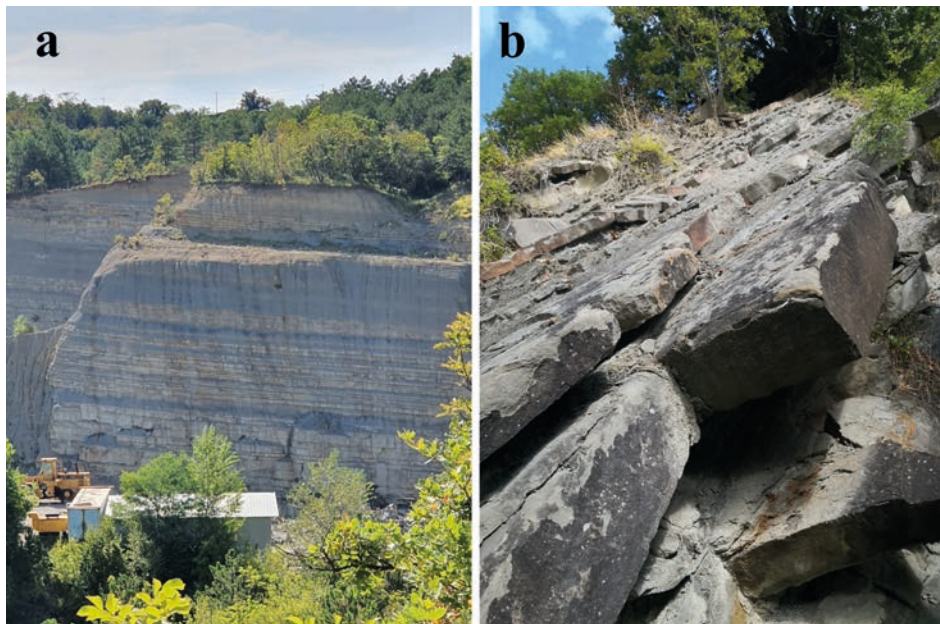
Flysch di Trieste (Eocene inferiore; *Ypresiano sup.* - *Luteziano*).

Questa unità corrisponde al “Flysch di Trieste” di Cucchi et al., (2013) e al “Flysch” di Jurkovšek et al. (2016). Comprende areniti da grossolane a fini, siltiti e argilliti siltose con strutture sedimentarie quali laminazioni, *flute casts* e *groove casts* tipici delle successioni torbiditiche. Tra il Flysch di Trieste e i Calcari ad Alveoline e Nummuliti si trovano marne e calcari marnosi con foraminiferi planctonici e calcareniti che in letteratura sono

Fig. 2.23 Calcari ad Alveoline e Nummuliti. a) Affioramento. b) dettaglio in cui sono visibili i fossili di foraminiferi nummulitidi. c) dettaglio in cui si osservano numerosi fossili di alveolinidi (le macchie bianche sulla roccia). d) Alveolina in sezione sottile. (Foto: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)



Fig. 2.24 Flysch di Trieste. a) affioramento di una successione di torbiditi. b) dettaglio degli strati (dello spessore di alcuni centimetri) di areniti intercalati a strati più argillosi. (Foto: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS)



strati denominati “Strati di Transizione”. Il contatto con i sottostanti Calcari a Alveoline e Nummuliti è caratterizzato dalla presenza di una breccia a clasti calcarei da angolosi a sub-arrotolati.

Nel suo complesso il Flysch di Trieste rappresenta la fine della sedimentazione carbonatica di mare basso nell'area del Carso. Le marne e i calcari marnosi che, a luoghi, poggiano sui Calcari ad Alveoline e Nummuliti testimoniano l'annegamento della piattaforma carbonatica con un generale approfondimento dell'am-

biente sedimentario. La seguente successione torbiditica è invece tipico deposito sin-orogenco (cioè contemporaneo e geneticamente legato al sollevamento di una catena montuosa), riempimento dell'avanfossa della Catena Dinarica.

2.8 L'assetto strutturale del Carso

La conformazione morfologica che osserviamo oggi del Carso deriva dagli eventi geodinamici che hanno interessato la zona nel corso degli ultimi milioni di anni. Se si dovesse sintetizzare la struttura attuale, si potrebbe

descrivere il Carso come un altipiano separato dal mare da una zona acclive dove sorge la città di Trieste. Ma da cosa deriva questa conformazione? La risposta risiede nella fase orogenica che ha interessato l'area negli ultimi 70-80 milioni di anni, ovvero dalla fine del Cretaceo fino ad oggi.

2.8.1 La convergenza: l'Orogenesi Dinarica

Il processo di formazione della struttura attuale del Carso è iniziato in concomitanza con i cambiamenti geodinamici che avvennero nella zona meridionale europea. Se si osserva una carta tettonica della situazione esistente nel nord-est Italia oggi, la zona del Carso Classico occupa parte

della cosiddetta Catena Dinarica. Le Dinaridi sono una catena montuosa che si estende dal nord-est Italia (a sud delle Alpi Giulie) fino all'Albania e Grecia (Fig. 2.25).

Da quanto detto in precedenza, orogene significa convergenza. Dunque la situazione che osserviamo oggi deriva da un processo di convergenza tra due placche. Le due placche in questione sono l'Adria e la Placca Euroasiatica. La fase convergente è iniziata nel Cretaceo con la chiusura e la subduzione di una porzione di crosta oceanica chiamata Oceano Ligure-Piemontese che separava in quel periodo l'Europa dall'Adria che era un promontorio di crosta continentale appartenente alla placca Africana.

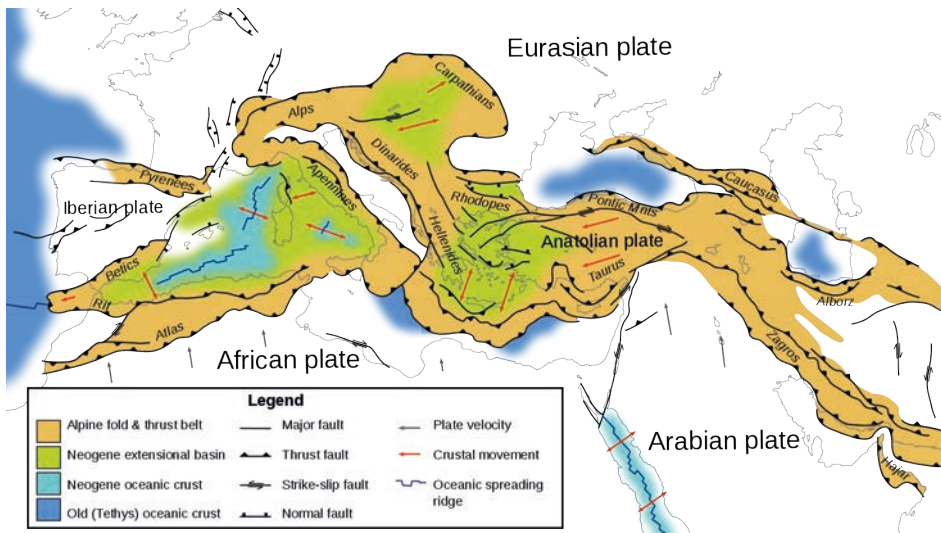


Fig. 2.25 Carta Tettonica dell'Europa. (Fonte: Wikipedia)

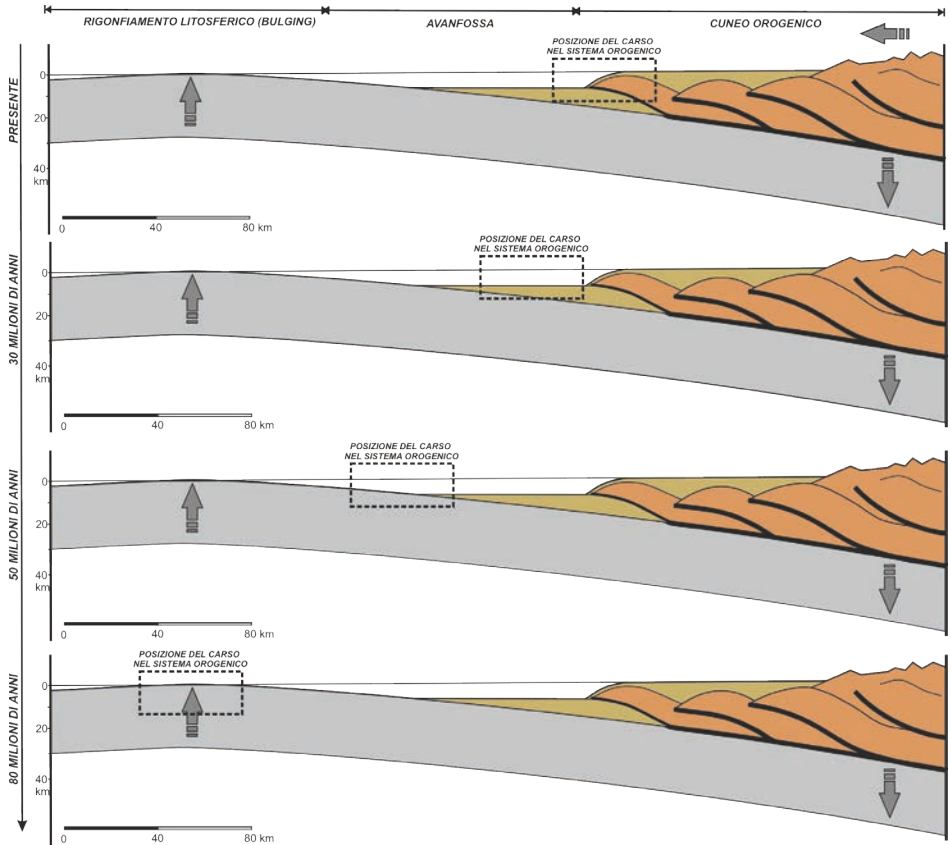


Fig. 2.26 Evoluzione semplificata del sistema orogenico con la localizzazione del Carso. (Schema: Lorenzo Bonini)

La subduzione della parte oceanica è proseguita sino a “consumare” tutta la porzione oceanica. Ma la zona del Carso dove si trovava? Si trovava in una posizione relativamente interna rispetto alla zona di subduzione principale e risentiva gli effetti dell'avanzamento del cuneo orogenico dinarico. I primi effetti nel Carso del cambiamento geodinamico lo si os-

serva nel momento della deposizione dei Calcari Liburnici, calcari depositati in ambienti di mare poco profondo proprio perché l'area era soggetta al sollevamento dovuto alla transizione del forebulge litosferico. La storia seguente vede la zona del Carso progressivamente in approfondimento, come conseguenza dell'avvicinarsi del fronte orogenico che imponeva

un abbassamento sempre più spinto della placca inferiore. In questo periodo si imposta il cosiddetto bacino d'avanfossa colmato dalla deposizione di torbiditi (Flysch di Trieste). Gran parte degli effetti orogenici si concludono circa 20 milioni di anni fa, quanto il fronte orogenico coinvolge le rocce del Carso e le incorpora nel cuneo orogenico, generando la struttura che domina ancora oggi l'area, ovvero la grande anticlinale del Carso (Fig. 2.26).

2.8.2 Il Carso nel tempo geologico: un viaggio nel passato

Se immaginiamo ora di eseguire una sezione verticale lungo l'area del Carso, possiamo osservare la struttura dominante, ovvero la grande anticlinale asimmetrica (Fig. 2.27).

Con il termine asimmetrica si intende che un fianco – ovvero una porzione del piega – è meno inclinato dell'altro. In particolare il fianco rivolto a nord-est è meno inclinato del fianco che guarda verso sud-ovest,

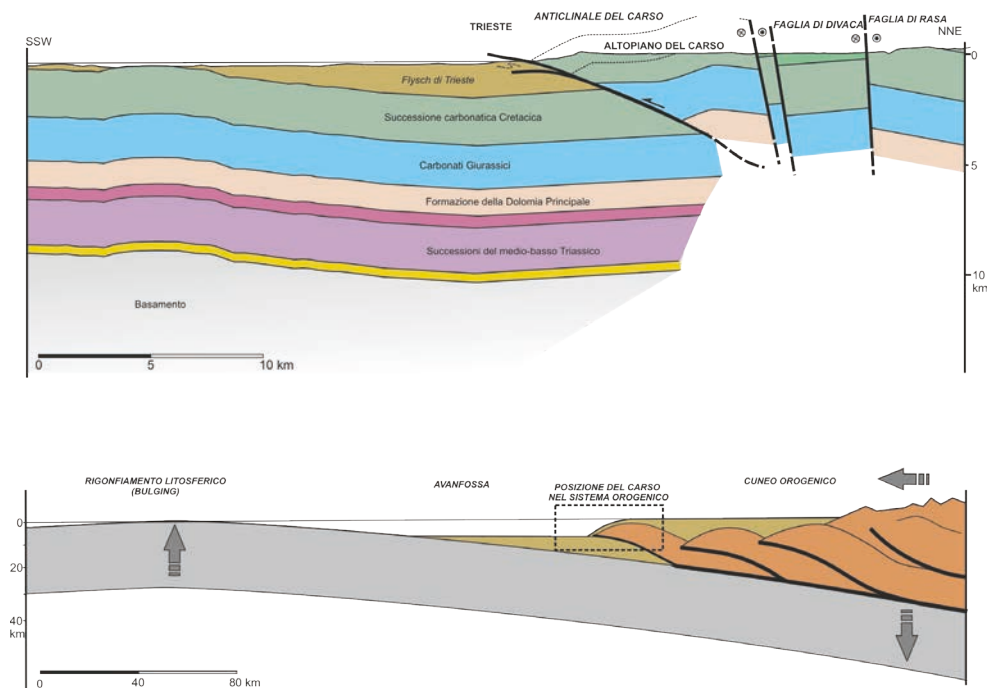
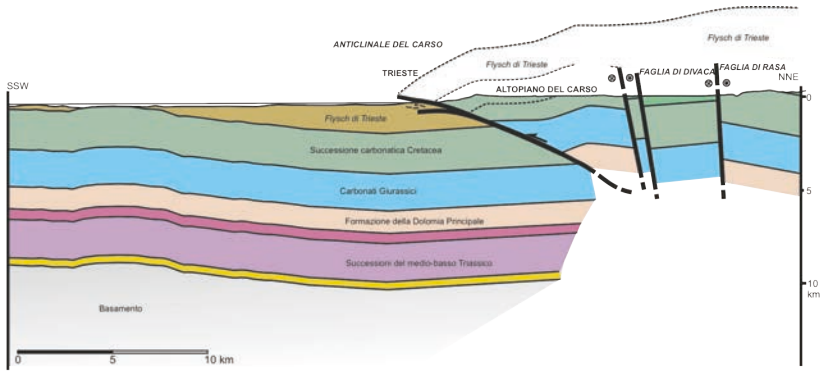
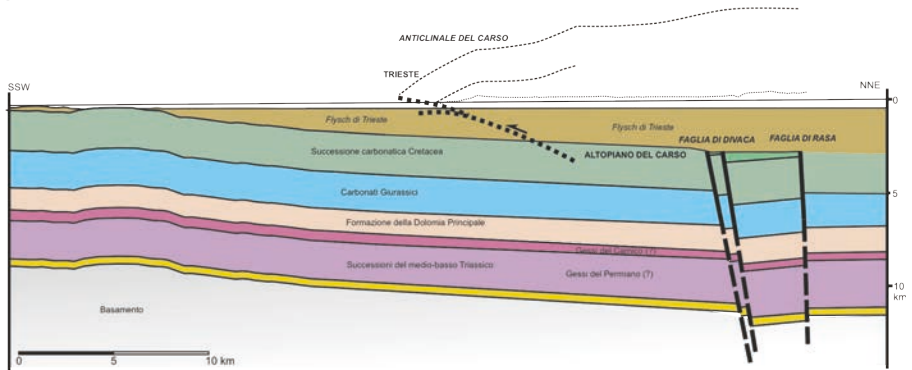


Fig. 2.27 Sezione geologica semplificata della struttura che si osserva oggi nel Carso. (Schema: Lorenzo Bonini)

PRESENTE



30 MILIONI DI ANNI



ovvero la zona del Golfo. Il fatto che il fianco interno (ovvero rivolto verso l'*hinterland*; si veda il significato di *hinterland* e *foreland* nelle sezioni precedenti), sia meno inclinato, ha facilitato la formazione dell'altopiano del Carso. Ma come mai oggi affiorano nel Carso i termini più antichi (es. Calcari di Aurisina) in corrispondenza dell'altopiano? Dove sono finite le successioni rocciose che ricoprivano le successioni carbonatiche, ovvero i Flysch? La risposta sta nell'erosione. Va ricordato che la struttura che os-

serviamo oggi è sostanzialmente rimasta la stessa che era presente 20 milioni di anni fa. In questo lasso di tempo è avvenuta sostanzialmente l'erosione dei termini rocciosi più recenti, ovvero i Flysch di Trieste (Fig. 2.27). Ritornando ora all'anticlinale, si noterà come sia associata ad una grande faglia inversa che possiamo chiamare sovrascorrimento o thrust. Entrambe le strutture sono tipiche degli ambienti orogenici compressivi. Va notato che la struttura tettonica che domina il Carso rappresenta

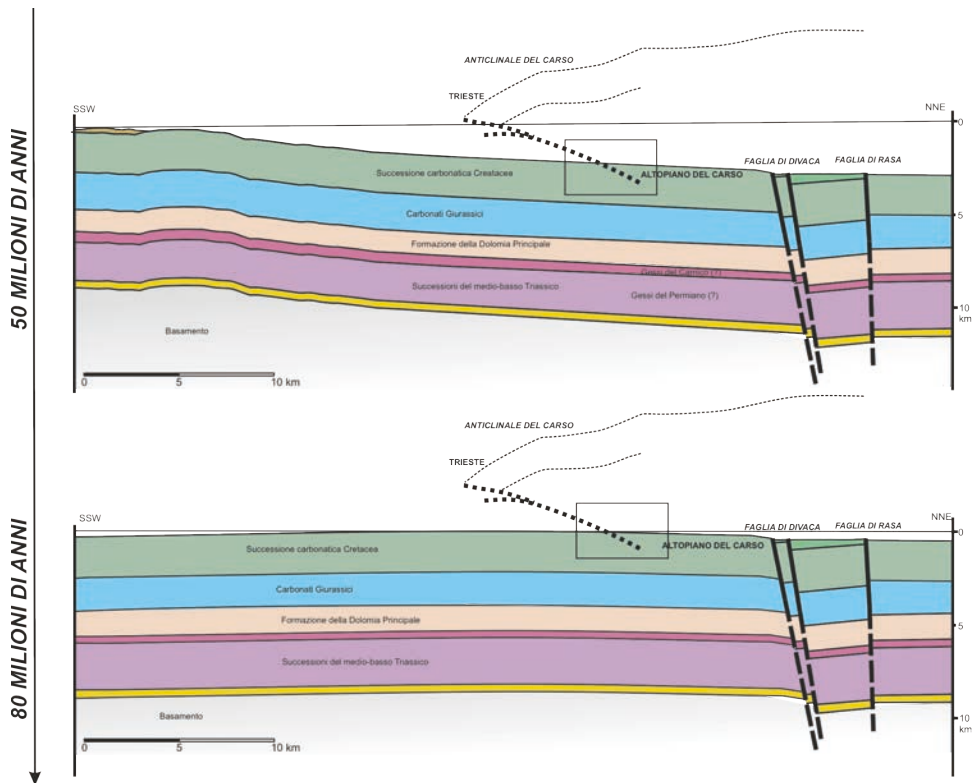


Fig. 2.28 Ricostruzione delle principali fasi tettoniche che hanno interessato il Carso. (Schema: Lorenzo Bonini)

la struttura più esterna dell'orogene dinarico, e di conseguenza la più recente visto che l'età delle strutture in questi sistemi tende ad essere più giovane andando dai settori interni (*hinterland*) ai settori esterni (*foreland*).

Per comprendere meglio i tempi con cui si è formata la struttura odierna del carso, conviene osservare una serie di fotogrammi che mostrano gli eventi geodinamici principali dell'area (Fig. 2.28).

Il primo fotogramma mostra la strut-

tura attuale con al centro l'anticlinale e il sovrascorrimento già discussi. Verso sud ovest si trova la zona del Golfo di Trieste, il cui substrato è costituito prima dai Flysch di Trieste che ricoprono tutte le rocce sedimentarie tipiche delle regioni nord-orientali d'Italia (dai carbonati giurassici ai depositi variegati permo-triassici), fino a giungere al basamento cristallino costituito da antiche rocce vulcaniche e metamorfiche. Guardando verso nord-est si riconoscono due grandi strutture tettoniche: la Faglia

di Divača e la Faglia di Raša. Queste strutture mostrano una cinematica recente di tipo trascorrente. La domanda che sorge ora è a quale meccanismo sono collegate queste due strutture trascorrenti in un contesto prevalentemente compressivo.

Se ora cerchiamo di ripercorrere la storia tettonica dell'area, un momento precedente alla formazione della grande anticlinale, ritroviamo il bacino sedimentario in cui si depositavano i Flysch di Trieste (bacino di avanfossa). In quel momento le due faglie sopramenzionate mostravano un rigetto (ovvero uno spostamento del blocco di tetto rispetto al blocco di letto) in senso normale. Questo significa che la Faglia di Divača e la Faglia di Raša si sono formate in un ambiente estensionale? Ovvero in prossimità di un margine divergente? Nulla di tutto questo. Il meccanismo geodinamico della loro formazione lo ritroviamo nello schema che rappresenta la situazione esistente circa 80 milioni di anni fa quando il Carso si trovava in una regione sottoposta al fenomeno del *bulging*, ovvero della flessurazione della placca che stava subducendo. È proprio quella flessione che ha generato la nascita di queste due faglie estensionali (insieme ad altre più piccole che si trovano nel territorio del Carso; es. Faglia del Colle Nero). Ora l'ultima questione a proposito di questo gruppo di faglie estensionali riguarda quando sono state riattivate con una cinematica diversa, ovvero trascorrente. Questa ripresa delle fa-

glie è avvenuta in tempi relativamente recenti in una fase tettonica che viene chiamata neo-alpina, in cui il cambiamento di traiettoria di migrazione della placca adriatica, insieme allo sviluppo sempre più ampio del bacino Pannonico ad est, ha indotto queste precedenti strutture estensionali a "lavorare" recentemente come faglie trascorrenti.

Tornado ora alla struttura che si può osservare oggi, le sue peculiarità sono ben evidenti in due zone. La prima è la Val Rosandra dove percorrendo i sentieri si possono ritrovare ripetute le une sulle altre le formazioni più recenti come ad esempio i Flysch e i calcari ad Alveoline e Nummuliti. Il fatto che i flysch o le marne (formazioni giovani) siano sovrapposti geometricamente sopra i Calcari Alveoline e Nummuliti (formazione relativamente più vecchia dei flysch e delle marne), mostra la presenza di faglie inverse, o meglio di Thurst. Per quanto riguarda la grande piega del Carso, la sua osservazione può essere fatta lungo la strada napoleonica in cui gli strati che appartengono al fianco esterno dell'anticlinale sono molto inclinati fino ad apparire verticali. Si rimanda al capitolo degli itinerari per un approfondimento di questi temi.

BIBLIOGRAFIA E ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO

CONSORTI L., ARBULLA D., BONINI L., FABBI S., FANTI F., FRANCESCHI M., FRIJIA G., PINI G.A. (2021) *The Mesozoic palaeoenvironmental richness of the Trieste Karst*. Geological Field Trips and Maps, Vol. 113(2.2). <https://doi.org/10.3301/GFT.2021.06>

CUCCHI F., PIANO, C. (2013) *Brevi note illustrative della carta geologica del Carso Classico Italiano*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale ambiente energia e politiche per la montagna, Servizio geologico.

DUNHAM R. (1962) *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*. AAPG Memoir 1, <https://doi.org/10.1306/M1357>

JURKOVŠEK B., BIOLCHI S., FURLANI S., KOLAR JURKOVŠEK T., ZINI L., JEŽ J., TUNIS G., BAVEC M., CUCCHI F. (2016) *Geology of the Classical Karst Region (SW Slovenia – NE Italy)*, Journal of Maps, Vol.12(1), DOI:10.1080/17445647.2016.1215941.

SCOTESE, C.R. (2014). *Cenozoic Plate Tectonic, Paleogeographic, and Paleoclimatic Reconstructions, Maps 1-15*, The PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS, version 2, Volume 1. DOI: 10.13140/2.1.3417.6961

SCOTESE, C.R. (2014). *Atlas of Late Cretaceous Maps, maps 16 – 22, Mollweide Projection*, The PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS, Volume 2. DOI: 10.13140/2.1.4691.3284

VLAHOVIĆ I., TIŠLJAR J., VELIĆ I., MATIČEC D. (2005). *Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 220 (3–4). <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.01.011>.

JURKOVŠEK, B., CVETKO TEŠOVIĆ, B., KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2013: *Geologija Krasa = Geology of Kras*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije. Geological Survey of Slovenia, 205 pp

3. GEOMORFOLOGIA

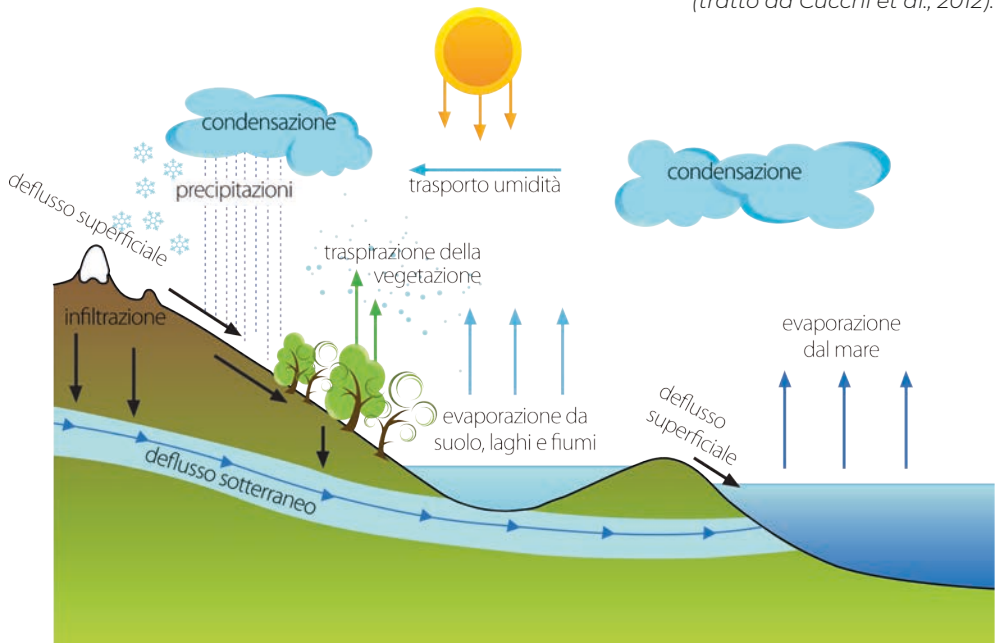
Premessa

Gira e rigira, il ciclo dell'acqua è il processo base per il nostro esistere in questo mondo. Il vapor d'acqua che passa all'atmosfera per evaporazione dai mari e dagli oceani, condensa tramutandosi in acqua che cade sulla superficie terrestre, la modella ruscellando e ingrossando i fiumi, la vivifica generando vita vegetale e consentendo quella animale, penetra all'interno della terra percolando lentamente, fuoriesce dalle sorgenti,

genera altri ruscelli, altri fiumi e scorre fino al mare. E il ciclo continua ripetendosi.

Restringendo il campo a ciò che ci riguarda direttamente, l'acqua oltre che vita, genera forme fisiche, condiziona la morfologia del territorio con processi talora lentissimi talora quasi istantanei. Interagendo con i processi endogeni ed esogeni che creano la superficie, i processi erosivi,

Fig. 3.1 Il Ciclo dell'acqua (tratto da Cucchi et al., 2012).



legati all'opera di torrenti, fiumi, mari, i processi esarativi, legati all'opera di ghiacci e nevi, quelli gravitativo - deposizionali, quali crolli, frane, alluvioni, detriti, e quelli chimico - fisici che generano suoli, dissoluzione, alterazione, hanno creato rilievi, valli, pianori, cavità, con morfologie che si sono evolute a più velocità. Alcune assumono forma e si riconoscono solo a scala dei milioni di anni (pianori e altopiani, ad esempio), altre a scala delle decine di migliaia di anni (valli e pianure ad esempio). Altre ancora si evolvono rapidamente, in poche migliaia di anni se non in pochi secondi

come le frane.

Nel Carso, qualche decina di milioni di anni fa, mentre la successione di rocce che si era depositata sul fondo del Mare della Tetide prima e del Mediterraneo poi, iniziava ad essere direttamente coinvolta nei movimenti compressivi fra Africa ed Eurasia, si sono formati rilievi sui quali mari, ghiacci, fiumi hanno esercitato la loro azione modellatrice. Nel corso dei millenni, le morfologie si sono evolute in un continuo "gioco" di costruzione e distruzione sulla base dei diversi processi morfogenetici, ognuno dei quali ha agito a sua volta con velocità

Fig. 3.2 I processi di disgregazione ed alterazione delle rocce (tratto da Panizza, 2014).

	<i>Processi</i>	<i>Agenti</i>	<i>Tipi di rocce</i>	<i>Zone climatiche</i>	<i>Acqua</i>	<i>Prodotti</i>
Disgregazione fisica	CRIOCLASTISMO	ghiaccio	tutte	fredde-umide	si	crioclasti
	TERMOCLASTISMO	insolazione	tutte	calde-aride	no	termoclasti
	IDROCLASTISMO	acqua	argillose	umide	si	idroclasti
	ALOCLASTISMO	sali	tutte	varie	si	aloclasti
	BIOCLASTISMO	esseri viventi	tutte	varie	no	bioclasti
Alterazione chimica	SOLUZIONE	acqua e CO ₂	evaporitiche e carbonatiche	varie, umide	si	minerali residuali
	IDROLISI	acqua	silicatiche	calde-umide	si	minerali argillosi, ossidi, silice
	IDRATAZIONE	acqua	alcune	umide	si	minerali idrati
	OSSIDAZIONE	ossigeno	alcune	varie	no	ossidi
	AZIONI BIOCHIM.	esseri viventi	tutte	varie	si	suoli

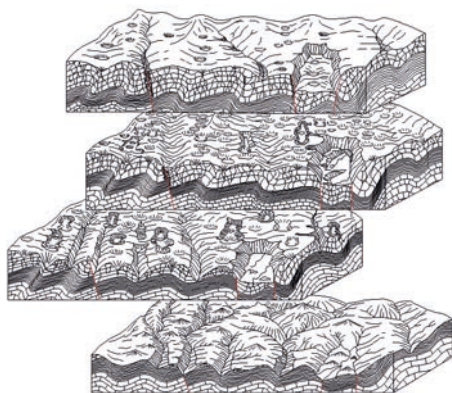


Fig. 3.3 Uno dei modelli di evoluzione di un massiccio carsico: ad un carsismo iniziale segue uno evoluto ed uno maturo fino all'inizio di una fase semplicemente erosiva (tratto da Ford e Williams, 2007).

diversa e variabile nei tempi.

Carsologia è il nome della disciplina scientifica che affronta lo studio degli ambienti carsici.

Karst phenomena¹ o più semplicemente **karst (fenomeno carsico o carsismo)** è l'espressione morfologica dell'insieme dei processi di asportazione e movimentazione delle rocce in cui il processo dominante è l'attacco alle rocce carbonatiche per via chimica, con meccanismi che vanno sotto il nome di **corrosione o dissoluzione carsica**.

In realtà va tenuto presente che tutte le rocce, in misura variabile, sono solubili in acqua, ma solo alcune portano, in certe condizioni morfo-climatiche, allo sviluppo del tipico assetto idrologico e di forme carsiche. Queste rocce sono, in ordine d'importanza, quelle carbonatiche, composte da calcite, dolomite, ecc., quelle evaporiti-

tiche, composte da salgemma, gesso, anidrite, ecc., e le quarziti composte da quarzo.

Sulla superficie terrestre affiorano con abbondanza le rocce carbonatiche, infatti i calcari e le dolomie costituiscono circa un quarto delle terre emerse e sono tutti più o meno carsificabili.

Dal punto di vista lessicale, si possono così distinguere:

- **i fenomeni carsici**, cioè quelli che normalmente si instaurano in calcari e dolomie calcaree, cioè nelle rocce ad alto o medio alto contenuto in carbonato di calcio;
- **i fenomeni paracarsici**, cioè quelli che si instaurano in rocce a basso o nullo contenuto di carbonato di calcio (le quarziti, ad esempio);
- **i fenomeni ipercarsici**, cioè quelli che si evolvono in rocce altamente solubili (le evaporiti in senso lato, i gessi, ad esempio);
- **i fenomeni pseudocarsici** cioè quelli che danno origine a morfologie simili a quelle carsiche, ma la cui genesi non è legata a solubilità per acque acidule (alcuni sprofondamenti, ad esempio).

¹Qui e più avanti, in corsivo sono riportati i termini in lingue diverse dall'italiano, siano essi di uso internazionale che locale. Ove il termine non sia in inglese, con acronimo è riportata la nazionalità (fra=francese, deu=tedesco, esp=spagnolo, slo=sloveno, ...).

La dissoluzione avviene ove è presente acqua in forma liquida e quindi nelle zone temperate, subtropicali e tropicali. In aree in cui piove pochissimo, oppure in cui predominano neve e ghiaccio, il processo carsico ha minor efficacia rispetto ai processi morfogenetici di tipo meccanico (erosione fluviale, abrasione glaciale, ecc.). La dissoluzione si esplica con intensità particolare in presenza di condizioni geologico strutturali e tessiturali adatte, quali discontinuità (stratificazione, diaclasi, fratture, ecc.) e permeabilità (vacui comunicanti). Per quanto riguarda il Carso Classico,

le rocce affioranti sono tutte rocce sedimentarie e, fra queste, quelle carbonatiche la fanno da padrone. D'ora in poi quindi tratteremo i fenomeni carsici propriamente detti, con limitati accenni e confronti con le altre fenomenologie.

Nella ristretta area del Carso Classico, come noto, affiorano calcari, calcari dolomitici e dolomie calcaree, dolomie, breccie e conglomerati calcarei o poligenici ma a matrice carbonatica, arenarie e marne silicatico carbonatiche. Le rocce sono irregolarmente coperte da esigui spessori di suolo, prevalentemente detritico; sul fondo

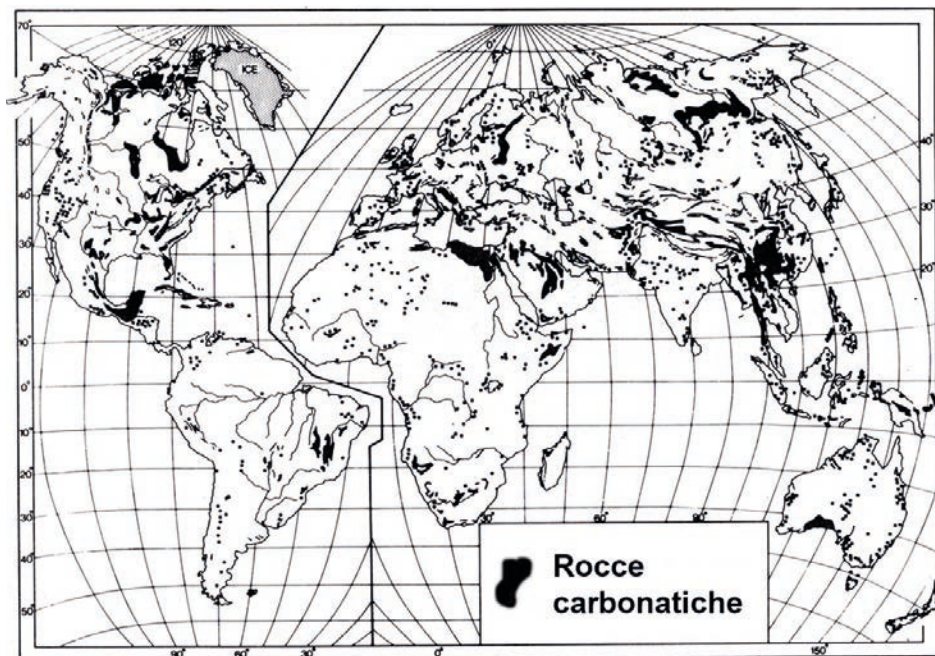


Fig. 3.4 Gli affioramenti di rocce carbonatiche nel mondo (modificato da Ford e Williams, 2007).

delle depressioni si rinvengono terre rosse, sui fianchi detriti di falda. In sintesi quindi le morfologie sono prettamente carsiche, talora esaltate da fatti erosivi.

I processi carsici hanno per base una semplice formula chimica, universalmente nota, che prevede che un carbonato (sia esso calcite che dolomite, di per sé minerali quasi insolubili) immerso in un'acqua acidificata dall'anidride carbonica proveniente dall'atmosfera, lentamente si dissolve e diventi un bicarbonato (di calcio o di magnesio o di calcio e magnesio)

di per sé elemento solubile. Come risultato la roccia si corrode e l'acqua porta via quanto soluto sotto forma di ioni. Come tutte le formule chimiche anche questa è reversibile, per cui può succedere che i bicarbonati ridiventano calcite o dolomite, ricreando roccia.

Letto così, il carsismo risulterebbe fenomenologia banale.

In realtà, come spesso accade, la faccenda è invero molto più complessa, - perché la reazione è la sintesi di un serie di reazioni chimiche concatenate tra loro,

Nell'areale affiorano rocce carbonatiche (verde pallido) e rocce silicatico-carbonatiche (marrone). (Modificato da: Zini et al., 2021)



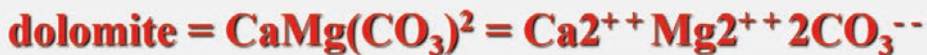


Fig. 3.6 – La reazione carbonato/solido + acqua/liquido + anidride carbonica/gas.
(Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UNITS)

- perché molteplici sono i fattori in grado di accelerare, ritardare, modificare le reazioni,

- perché numerose sono le circostanze in cui queste ed altre reazioni ed altri processi si evolvono,

- perché le rocce su cui i processi avvengono non sono sempre puramente carbonatiche ed omogenee,

- perché nei tempi occorrenti alle reazioni ed ai processi per divenire significativi mutano, talora sensibilmente, geografia e clima.

Ecco che, quindi, i fenomeni carsici vanno analizzati non solo dal punto di vista prettamente morfologico geografico, ma di essi è bene comprendere

- i modelli genetici,

- le modalità evolutive,

- i condizionamenti “esterni” che hanno portato alla singola forma nel contesto generale e, di conseguenza, al contesto generale originato dall’insieme delle forme.



Fig. 3.7 Piccole forme carsiche riassumono vette, valli montane, pianori, ...
(foto P. Sfregola).

3.1 Il carsismo

Dal punto di vista chimico, la dissoluzione è fenomeno che avviene in un sistema a tre fasi (**gas + liquido + solido**) e quindi la conoscenza delle caratteristiche fisico-chimiche di queste fasi è essenziale per la corretta comprensione del processo.

Il processo della dissoluzione carsica (o processo della corrosione carsica) consiste nella messa in soluzione di molecole di roccia da parte delle acque piovane, di scioglimento glaciale, di condensazione, marine, che scorrono in superficie o percolano attraverso il suolo e le discontinuità della massa rocciosa. Il processo è innescato dalla acidificazione delle acque da parte dell'anidride carbonica

proveniente dall'aria, dal suolo o dal sottosuolo. Andando in soluzione, la CO_2 forma l'acido carbonico (H_2CO_3) che a sua volta si dissocia rendendo acida la soluzione con la produzione di protoni (H^+).

La corrosione - fase solida

La fase solida è rappresentata dalla roccia incassante, dagli speleotemi e/o dai depositi fisici (suoli, alluvioni, morene, detriti, ...). Per definirne la carsificabilità teorica e quantificare la carsificazione effettiva, vanno tenute in debito conto:

- le caratteristiche mineralogiche e petrografiche della roccia oltre che la sua struttura e la sua tessitura.

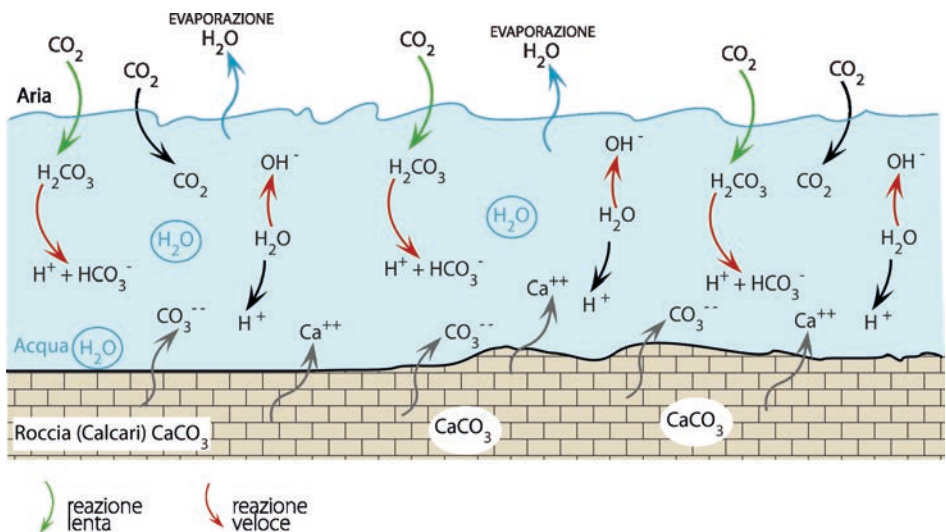


Fig. 3.9 La miscela ionica nelle acque a contatto dell'aria e della roccia (tratto da Cucchi et al., 2012).

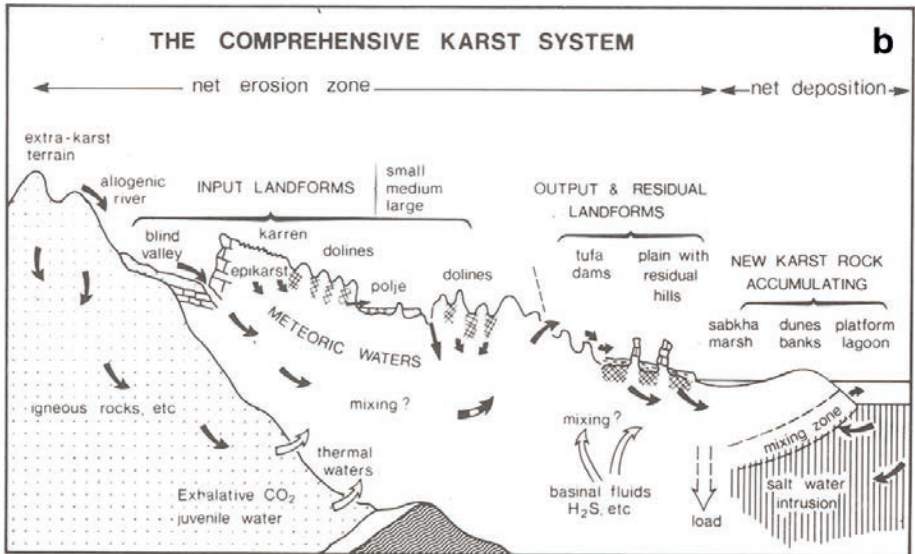
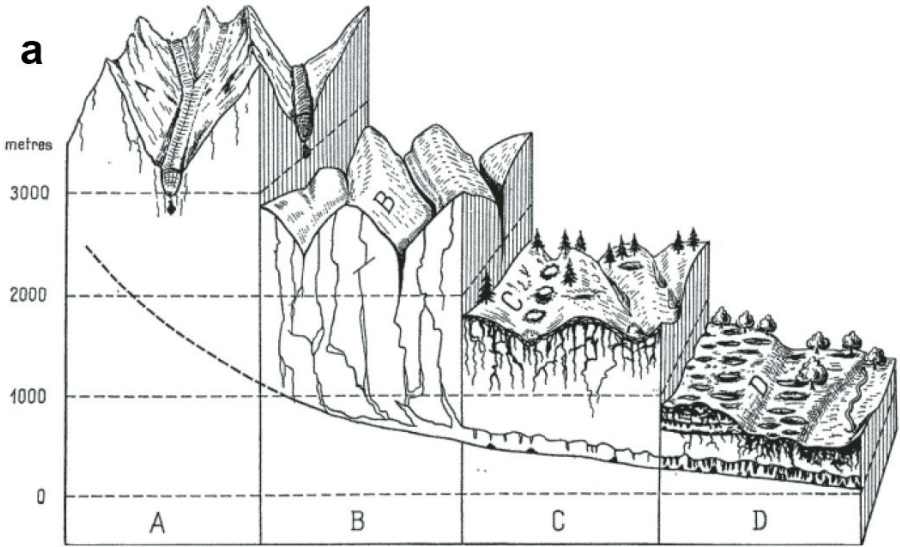


Fig. 3.8 Due schemi generali sui fattori che condizionano l'evolversi del carsismo. In alto (a) quelli che Jakucs (1977) definisce i condizionamenti legati al fattore "collocazione geografica" (clima, ...) e al fattore tempo (evoluzione geologica, ...). In basso (b) quello che Ford & Williams (1981) chiamano "il sistema carsico omnicomprensivo" essenzialmente condizionato dalla chimica delle acque.

Importanti sono poi anche - i rapporti spaziali fra i diversi litotipi ed in genere tutti i processi geologici che possono far variare le caratteristiche chimico-fisiche della fase solida e la loro permeabilità.

Indubbiamente la solubilità delle rocce carbonatiche è minima, oltre che lenta, per cui di primo acchito si è portati a pensare che non sia necessario tenere conto di questo tipo di condizionamento. Tuttavia, dato che il fenomeno carsico è molto lento (l'unità temporale di misura sono i 10.000 anni) minime differenze di solubilità portano nel tempo a notevoli differenze di morfologia.

Ad esempio, se è ovvio da sempre che i gessi sono più solubili dei calcari, è noto solamente da poche decine d'anni che i calcari micritici sono più solubili dei calcari sparitici, e non è ovvio, ma ormai provato, che calcari bituminosi possono essere più solubili di calcari puri.

La corrosione - fase gassosa

Questa fase è praticamente rappresentata dall'aria in quanto contenente CO_2 (anidride carbonica o biossido di carbonio²).

La solubilità della calcite in acqua pura (senza CO_2) a 25°C è di circa 14 mg/l. Per confronto, quella del quarzo è di poco inferiore, di circa 10 mg/l.

Importanza viene così ad assumere la pressione parziale di CO_2 (PCO_2), che nell'atmosfera è normalmente di circa 3.5×10^{-4} atm. Tale valore è influenzato da numerosi fattori (clima, vegetazione, ...) e aumenta notevolmente nei suoli che coprono il substrato roccioso, tanto che nei primi centimetri di suolo (la rizosfera) il valore medio oscilla tra 2×10^{-2} e 2×10^{-3} atm.

Con una minima Pco_2 (0,001 bar) la solubilità sale a 60 mg/l per la calcite e a 50 mg/l per la dolomite, mentre se ne sciolgono sempre 10 mg/l di quarzo. Con quantità significative di CO_2 e con Pco_2 di 0,1 bar, alla stessa temperatura la solubilità dei carbonati aumenta notevolmente giungendo a 400 mg/l di calcite e 300 mg/l di dolomite, mentre quella degli altri minerali non varia.

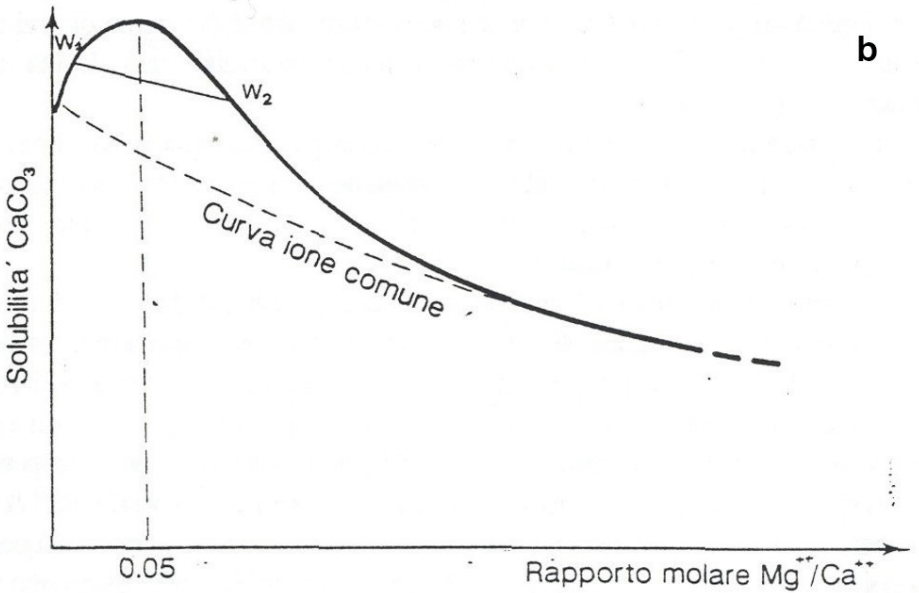
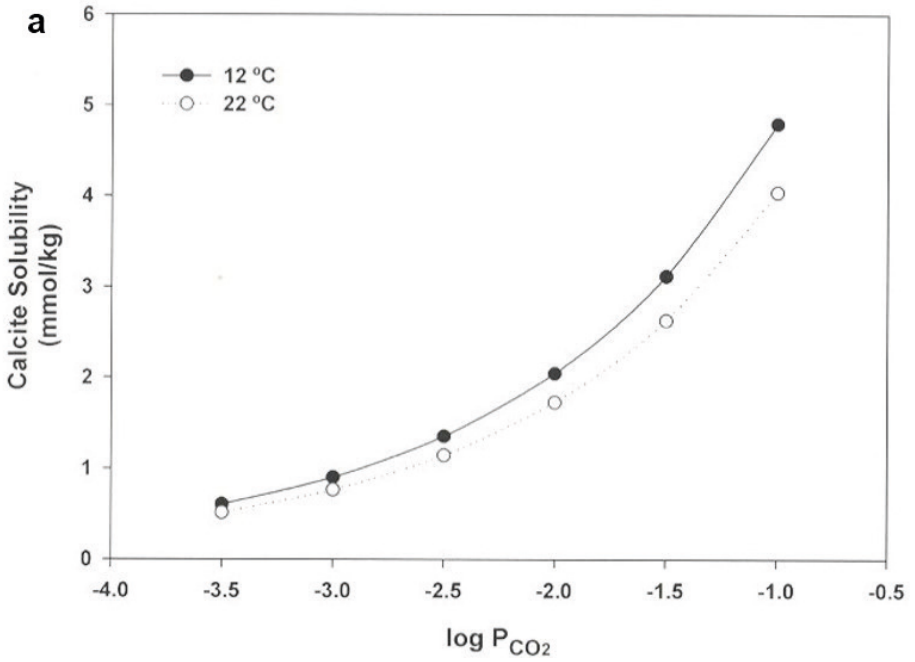
Più aumenta la Pco_2 nell'aria e al contatto aria-acqua, più CO_2 viene disciolta in acqua.

Poiché la solubilità in acqua della CO_2 è inversamente proporzionale alla temperatura, la diminuzione della temperatura, a parità di Pco_2 , porta ad una maggiore aggressività. Va tenuto conto che generalmente la fase liquida in natura è una soluzione "dinamica", con una certa energia che può essere dissipata nelle reazioni.

L'anidride carbonica è presente nell'atmosfera e nell'aria contenuta nel suolo. Il valore medio di CO_2 nell'aria è circa dello 0,038%, mentre nel suolo varia tra 0,1% e 15%, con valori medi compresi fra il 0,3% e il 10%. Per inciso, nell'atmosfera di una cavità

²Nel testo, a seguire, sarà utilizzata la sola formula chimica.

Fig. 3.10 a) Diagramma sul rapporto fra CO_2 disciolta e P_{CO_2} ; b) solubilità della $CaCO_3$ in funzione del rapporto Mg/Ca (tratto da Trudgill, 1986).



varia tra 0,5% e 1%, valore decisamente più alto che nell'atmosfera esterna, ma minore di quella nel suolo.

La CO_2 presente nel suolo è indubbiamente una fonte molto importante di questo gas e dipende dalla porosità del suolo, dall'attività biologica, dalla temperatura ed ovviamente dalla presenza dell'acqua. La quantità di CO_2 nei suoli dipende quindi dal tipo di substrato e di suolo, dal clima e dalla stagione. Nei suoli ben sviluppati, le attività biologiche sono molto intense, specie nell'Orizzonte B. Le attività biologiche s'intensificano infatti a temperature superiori ai 20°C , mentre rallentano a temperature più basse.

La produzione di CO_2 è ottimale con valori d'umidità relativa tra 50% e 80%: nelle aree tropicali si raggiungono i valori più alti (Pco_2 tra 0,2% e 15%), nelle aree temperate i valori di Pco_2 sono compresi tra 0,1% e 6%, nelle praterie alpine scendono tanto che durante il disgelo oscillano tra 0,2% e 1%.

Particolari fasi gassose possono essere quelle legate alla presenza di altri gas, provenienti solitamente da punti localizzati (sottosuolo, fumarole marine, sorgenti termali, ad esempio).

La corrosione - fase liquida

Nelle rocce carbonatiche sono essenzialmente due i processi che portano alla genesi ed alla evoluzione delle forme. In entrambi i processi, l'agente è l'acqua: ai processi chimici quali dissoluzione e corrosione si aggiungono

infatti i processi fisici quali erosione e gravità.

Le acque possono essere di origine meteorica, ed allora si parla di *acque epigeniche*, che agiscono scendendo dall'alto verso il basso, oppure acque profonde, dette *ipogeniche* che attivano i processi risalendo dal basso verso l'alto, spesso miscelandosi con le acque epigeniche.

La dissoluzione è data dall'acqua con il suo moto e con le varie sostanze in essa contenute sotto forma di ioni, molecole, colloidali, ecc. I valori da tenere in considerazione sono la Pco_2 , il pH, la concentrazione di Ca e di Mg, la temperatura, la presenza di ioni "estranei" al sistema, il flusso. In pratica tutto quanto contribuisce ad originare ioni che acidificano il fluido o quanto facilita la diffusione delle sostanze nell'acqua.

La reazione si svolge in modo diverso in un sistema aperto rispetto ad un sistema chiuso.

Un sistema viene definito aperto quando le tre fasi sono libere di scambiarsi molecole contemporaneamente fino a quando si raggiunge l'equilibrio termodinamico. Man mano che le molecole di CO_2 reagiscono con l'acqua si trasformano in H_2CO_3 che rilascia ioni HCO_3^- e protoni H^+ . Questi vengono consumati dalla reazione con il CaCO_3 creando molecole di bicarbonato HCO_3^- che vanno in soluzione. Nuove molecole di CO_2 possono così passare dall'aria

all'acqua sostenendo l'intero processo fino a quando non viene raggiunto l'equilibrio termodinamico.

In un sistema chiuso, interagiscono contemporaneamente soltanto due fasi: nel sistema chiuso acqua-roccia le fasi interagiscono fino a quando la soluzione consuma tutta la CO_2 ed i suoi prodotti derivati H_2CO_3 , HCO_3^- attraverso la reazione con CaCO_3 . Ne consegue che, rispetto al sistema aperto dove la CO_2 consumata può essere rimpiazzata, la quantità di calcite disciolta sarà minore.

Come accennato, altri fattori influenzano, direttamente o indirettamente, sulla solubilità di un carbonato in acqua: la temperatura, la pressione, la presenza di altri acidi (acidi organici, ossidazione di metalli, ecc.), l'effetto dello ione comune, l'effetto della forza ionica, l'effetto dell'accoppiamento ionico, l'effetto della miscelazione e la presenza di elementi in traccia.

Temperatura: con $P_{\text{CO}_2} = 0,03\%$ a 25°C si sciolgono 55 mg/l di CaCO_3 nell'acqua. Abbassando la temperatura di 25° (quindi fino a 0°C) tale valore aumenta fino a 75 mg/l. Il carbonato di calcio è quindi più solubile in acque fredde, a causa del fatto che la CO_2 è più solubile in acqua a temperatura più bassa.

Pressione idrostatica: la solubilità della CO_2 dipende anche dalla pressione: un aumento nella pressione idrostatica fa incrementare la solubilità della

CO_2 e quindi quella del carbonato in acqua. Questo processo è rilevante nella speleogenesi, specie nelle prime centinaia di metri di profondità dell'acquifero, con aumenti della solubilità di circa 6 mg/l per ogni 100 metri di colonna d'acqua.

Effetto dello ione comune, noto anche come dissoluzione incongruente, si verifica quando due sostanze minerali differenti introducono nell'acqua uno ione in comune. Ciò causa un abbassamento della solubilità di ambedue i minerali. Ciò spiega perché in grotte di gesso e in grotte nelle rocce dolomitiche si formano concrezioni di calcite.

Effetto della forza ionica e dell'accoppiamento ionico: l'introduzione nell'acqua di ioni come Na^+ , K^+ e Cl^- fa decrescere l'attività ionica degli ioni in soluzione, il che causa un aumento della solubilità dei minerali carbonatici. L'effetto è molto evidente nel caso in cui all'acqua dolce si aggiunga, anche e soprattutto in piccole quantità, acqua salata, come nel caso delle aree carsiche costiere, Ioni estranei al sistema, sostanze organiche, bolle d'aria, miscugli termali, in quanto originanti ioni in grado di interagire con la roccia e l'acqua e quindi di modificare il pH, possono comportare accelerazioni anche notevoli o rallentamenti nella dissoluzione.

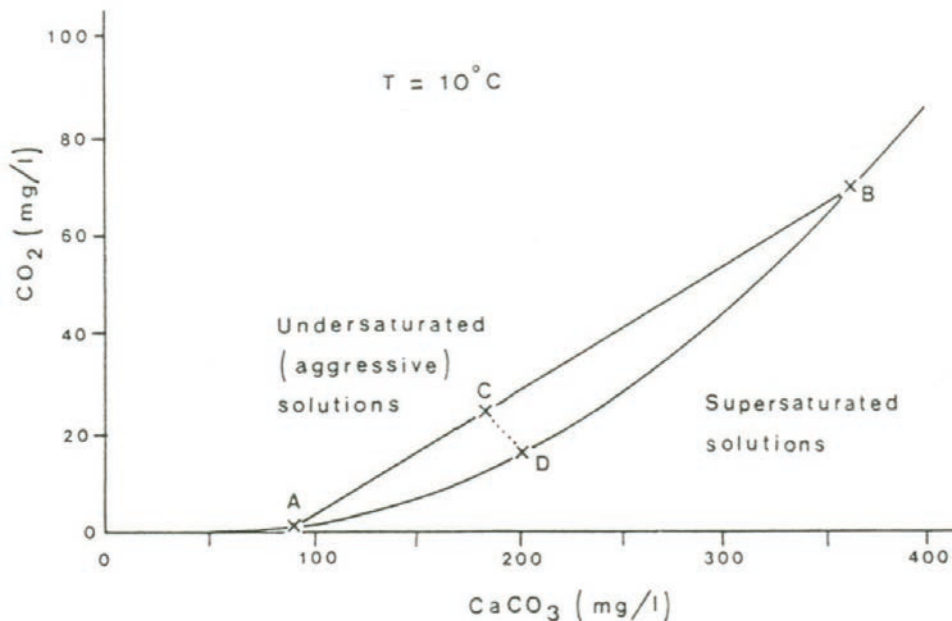
Effetto miscela (la Mischungkorro-

sion di Bögli, 1964), cioè il ri-divenire aggressivo di un'acqua derivata dalla miscela di due (o più) acque saturate provenienti da punti diversi. Dato che la curva di dissoluzione del carbonato di calcio in funzione della CO_2 , diminuisce gradualmente con l'aumentare della concentrazione di carbonato disciolto, la miscela porta ad una nuova soluzione sottosatura e quindi aggressiva. Questo processo assume una certa importanza soprattutto nelle profondità dell'acquifero carbonatico, dove circolano soltanto soluzioni saturate non più in grado di sciogliere ulteriore roccia.

L'effetto Picknett, per il quale la presenza di altre specie chimiche o di

ioni estranei può tanto accelerare la solubilità (se in modestissima quantità nel caso del Magnesio ad esempio) quanto inibirla (se abbondante, sempre nel caso del Magnesio ad esempio) e può comunque modificare le modalità di formazione dei precipitati in soluzioni sovrasature. Le specie chimiche o gli ioni estranei funzionano in pratica da catalizzatori naturali. La presenza di piccole quantità di alcuni metalli può abbassare sensibilmente la solubilità del carbonato di calcio perché l'assorbimento da parte della calcite dei metalli inibisce il passaggio in soluzione.

Il moto dell'acqua, in quanto il flusso dell'acqua, lento o vorticoso che



sia, ha effetti tanto fisici che chimici. Infatti può movimentare la CO_2 di interfaccia gas-liquido ed i carbonati di interfaccia liquido-solido o favorire le reazioni chimiche in soluzione. Il flusso può poi favorire la diffusione delle sostanze nel liquido ed annullare l'effetto impacchettamento (l'accumulo di cristalli in una sorta di pellicola al contatto roccia-acqua) asportando i germi di cristallizzazione e rendendo così nuovamente insaturo o non sovrassaturo il liquido a contatto con la roccia.

3.2 Geomorfologia del Carso

Anche se sono espressione dello stesso fenomeno e sono strettamente collegate e dipendenti, si suole distinguere le **forme carsiche epigee** o superficiali da quelle **carsiche ipogee** o profonde o sotterranee.

Nelle prime è invalso l'uso di distinguere le grandi forme (anche mesoforme) dalle piccole forme e di definire microforme quelle puntuali originate da fatti biologico-chimici.

Nelle forme carsiche ipogee si usa invece distinguere quelle primarie, generate solamente da fatti corrosivi, da quelle secondarie o derivate, legate alla modificazione delle forme primarie per fatti erosivi, gravitativi, deposizionali e neo-corrosivi. Talvolta, nella

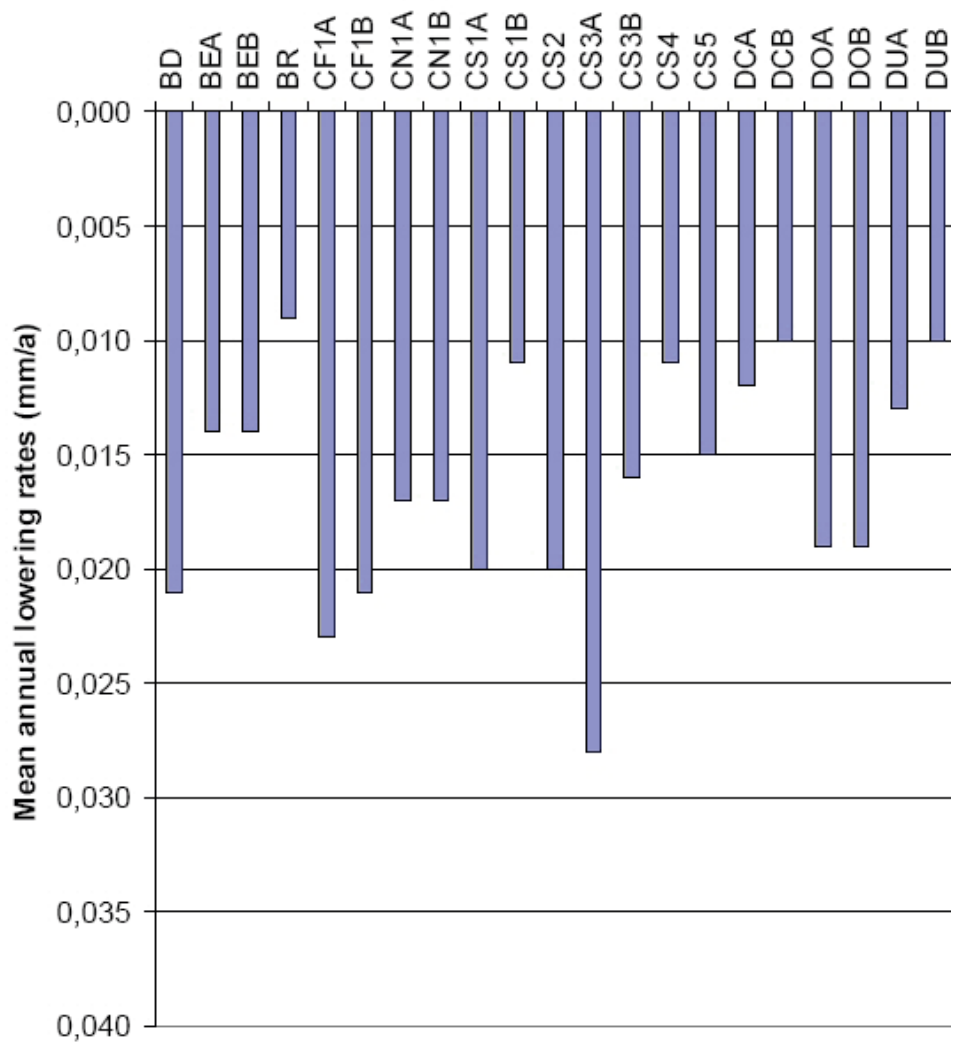
genesì delle forme primarie o nella modifica di quelle derivate, intervengono processi che accelerano quelli legati alle acque di percolazione, come le venute dall'interno di gas o acque a temperatura e/o composizione diversa: si parla allora di processi ipogenici e di morfologie ipogeniche. Resta il fatto che quanto avviene in superficie e quanto avviene in profondità è il risultato degli stessi processi, che possono avvenire o non avvenire separatamente e/o congiuntamente, ripetersi nel tempo, magari modificandosi.

Ecco che l'analisi e la comprensione di un sistema carsico deve tenere sempre in considerazione, contemporaneamente, il procedere del tempo e le conseguenti modifiche climatiche accanto all'attività, talora concomitante, dei diversi processi che modificano le caratteristiche geologiche e geomorfologiche del suolo e del sottosuolo.

3.2.1 Geomorfologia superficiale

Genesi ed evoluzione delle forme carsiche epigee

Il paesaggio carsico si caratterizza per la presenza di roccia calcarea o calcarea dolomitica affiorante o sub-affiorante interessata da morfotipi superficiali originali e da scarsità o assenza di un reticolo fluviale. Le acque che ruscellano in superficie vengono assorbite in punti idrovori o in inghiottitoi e convogliate all'interno della massa rocciosa carsificata (ove vengono a generarsi le morfologie ipogee).



Stations

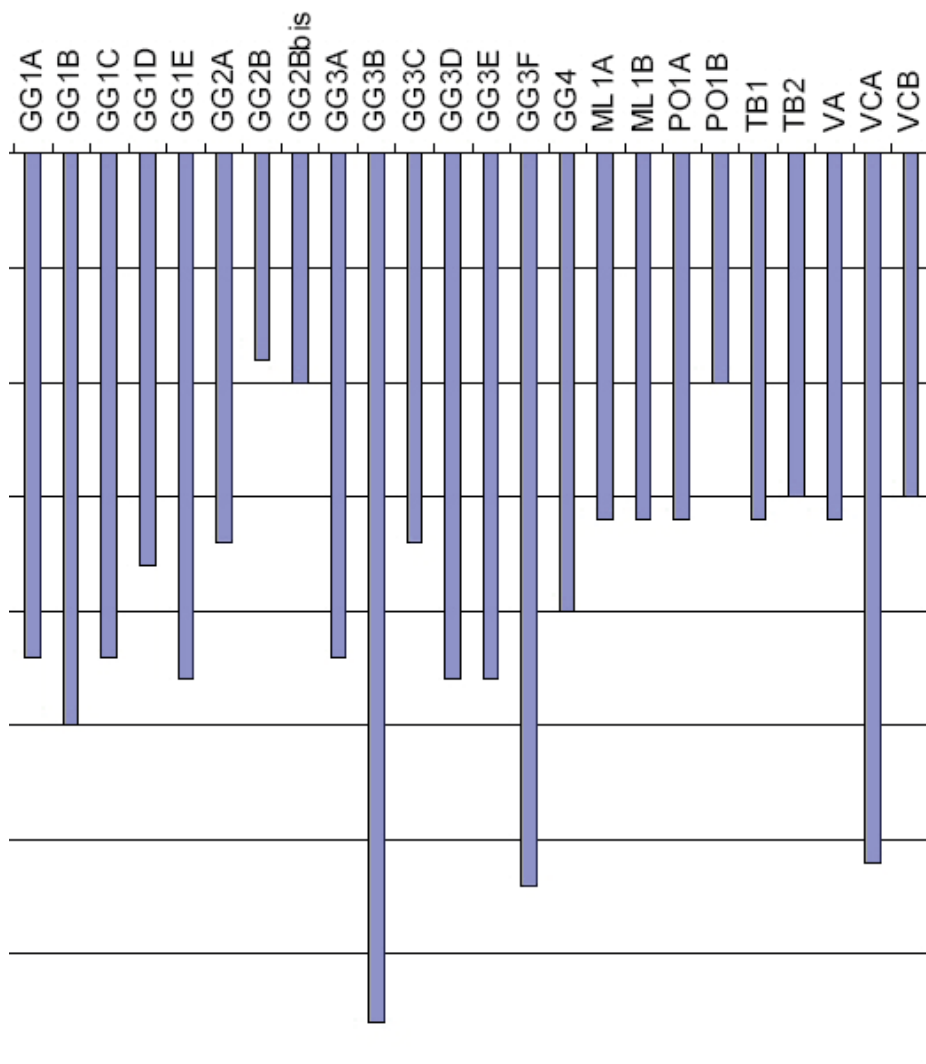


Fig. 3.12 L'abbassamento delle superfici calcaree nel Carso Classico misurato mediante micro-erosion-meter nell'arco di una ventina d'anni nelle stazioni di misura appositamente predisposte e distribuite sul territorio, indicano che le rocce all'interno si abbassano mediamente di circa 2 centesimi di millimetro all'anno. (Furlani et al., 2009)

Le doline

La grande forma (talora, non correttamente, detta macro-forma, o, più correttamente, mesoforma) tipica dei paesaggi carsici è la dolina³. Si riconoscono doline di dissoluzione, doline di crollo, doline di suffusione, doline di subsidenza.

La dolina di dissoluzione è una depressione chiusa, solitamente più larga che profonda che si apre in rocce calcaree o calcareo dolomitiche. Gli elementi di una dolina sono la corona (o il bordo) scarpata subcircolare o subellittica che interrompe il pianoro in cui la dolina si apre; i fianchi ed il fondo.

I fianchi, che possono essere a natural declivio o a gradoni, simmetrici o asimmetrici, hanno acclività e morfologia collegate alle caratteristiche litologiche e strutturali del substrato. Le dimensioni sono estremamente variabili e vanno da pochi metri ad alcune centinaia di metri di larghezza, per profondità che variano da pochi metri ad alcune decine di metri.

Il fondo può essere riempito da materiale grossolano (clasti mobilizzati e/o franati dai versanti) e/o da depositi fini sciolti o più o meno cementati (le cosiddette **terre rosse**: residuo di quanto non disciolto o materiale

“intrappolato” per accumulo eolico o colluviale).

Volendo, si possono riconoscere vari aspetti delle doline: a imbuto, a ciotola, a piatto, prendendo dagli oggetti di comune utilizzo, ma è meglio badare alla funzione della dolina, più che al suo aspetto esteriore.

La genesi è legata ad un punto o ad una ristretta area che assorbe le acque ruscellanti in superficie. Il ruscellamento genera dissoluzione centripeta della roccia, per cui l'inghiottitoio diventa dolina per allargamento progressivo dei fianchi ed approfondimento progressivo del fondo. Nel sottosuolo si genera una rete di assorbimento delle acque che dà luogo a diverse morfologie carsiche ipogee.

Dimensioni, fondo e fianchi definiscono quindi delle forme attive la cui genesi è legata ad assorbimento localizzato di acque (puntiforme o concentrato – uno o più punti idrovori-) con un progressivo allargamento radiale per erosione e corrosione accelerata ed approfondimento per corrosione sottocutanea.

Particolare morfotipo è la dolina di crollo, sprofondamento che si genera per fenomeni di collasso del soffitto di cavità prossime alla superficie. Ha pianta solitamente circolare, pareti

³Termine internazionale derivato dallo sloveno: dolina = valle. Da qualche anno sta prendendo piede in gran parte dell'Europa così come in Italia, il termine statunitense sinkhole, che letteralmente in inglese significa inghiottitoio. Il termine è utilizzato negli U.S.A., soprattutto in campo ingegneristico, come sinonimo di dolina.

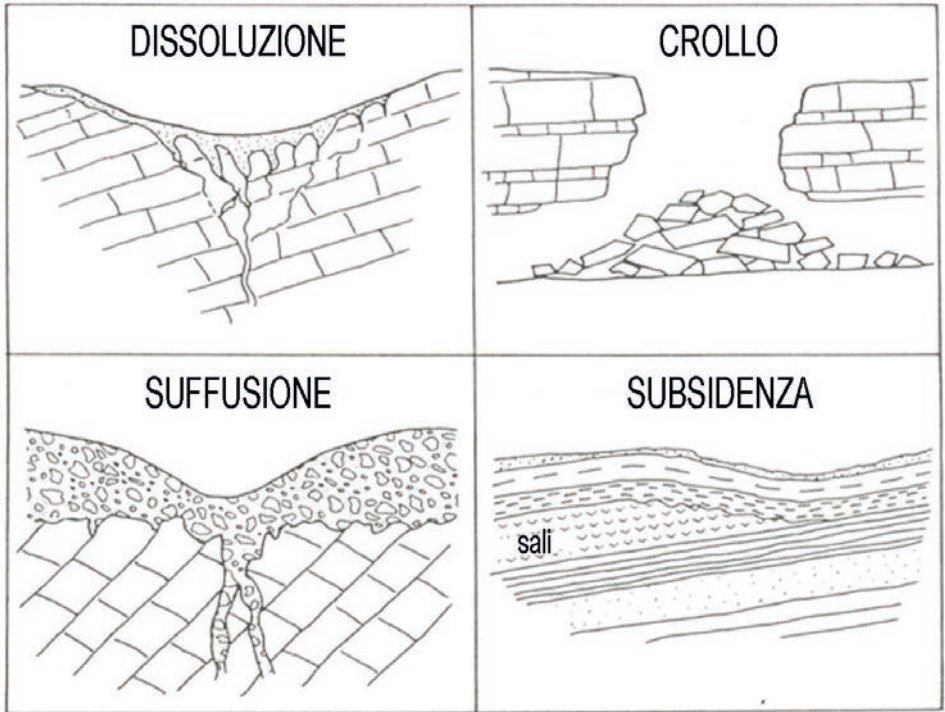


Fig. 3.13 I diversi tipi di dolina (modificato da Ford e Williams, 2007).

subverticali e fondo occupato da depositi grossolani di crollo o tratti di cavità. Nel tempo può naturalmente evolvere verso forme più ampie e dai fianchi meno acclivi in funzione delle caratteristiche geomeccaniche dei versanti e del regime delle acque superficiali.

La dolina di suffusione e la dolina di subsidenza sono altri due tipi di dolina che si aprono in depositi o in rocce non carbonatiche.

La prima è dovuta al fluimento del

materiale di copertura (depositi alluvionali, depositi morenici, ...) all'interno di un bedrock carsificato.

La seconda è il risultato del lento adattamento di vasti affioramenti di copertura (roccia e depositi) alla progressiva soluzione di orizzonti molto solubili sottostanti.

Le cavità senza soffitto (roofless cave) Particolari morfologie superficiali sono le **roofless cave**, le cavità scopriate o senza soffitto. Si tratta di tratti di gallerie ipogee venuti alla

Fig. 3.14 A sinistra: l'ingresso della Grotta Noè che è una dolina di crollo (Catasto Speleologico Regionale) (Foto: Maurizio Maffei). A destra: la parete orientale del Baratro dei Cavalli. Al piede si nota quanto resta della volta della cavità che ha probabilmente originato, crollando, questa grande dolina di crollo. Le concrezioni stalattitiformi sulla parete sono travertinose. (Foto: Franco Cucchi)



luce per progressiva dissoluzione e conseguente abbassamento della superficie topografica. Quando i tratti di cavità sono relativamente superficiali, il carsismo può corrodere la copertura, mettendo in luce la cavità. Spesso le roofless cave si rinvengono davanti alle cavità vere e proprie, costituendo quasi degli atri alle gallerie appena inclinate nel sottosuolo. Talora mettono in luce reticoli ipogei antichissimi, movimentando la superficie e conferendo al territorio aspetti morfologici particolari. Sempre ci parlano del lento (ma "inesorabile") progredire del carsismo.

Le (o gli?) uvala (compound sinks)

Altre grandi forme tipiche sono le (o gli?) **uvala**, articolate depressioni chiuse, formatesi per coalescenza di più doline che hanno allargato il diametro fino a far scomparire quasi completamente tratti dei versanti di separazione. I bordi perimetrali hanno contorni sinuosi, lobati. Il diametro maggiore è solitamente di alcune centinaia di metri, la profondità di alcune decine.

Molti **paesaggi carsici** e molte forme carsiche sono il risultato dell'azione combinata, nel tempo e nello spazio, sia del processo carsico che di altri processi. La combinazione favorisce lo sviluppo di forme miste, spesso influenzate oltre che dai processi fluvia-

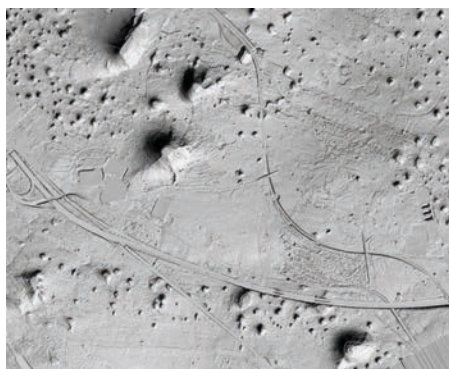


Fig. 3.16 Doline di dimensioni diverse sul Carso Classico messe in evidenza grazie alla rappresentazione shaded relief del modello digitale del terreno (Catalogo IRDAT – RAFVG).

li, carsici, glaciali, periglaciali (e quindi dalle caratteristiche climatiche) anche dalle particolari condizioni litologiche e geologico-strutturali.

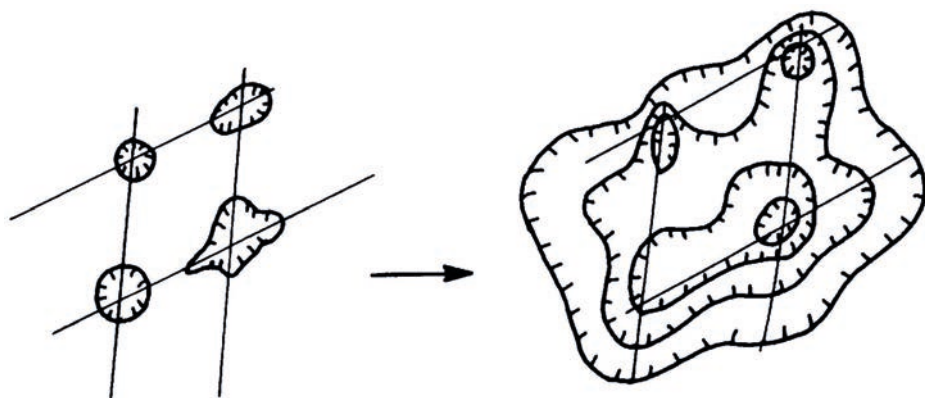
Fra le forme complesse caratterizzanti i paesaggi, merita ricordarne alcune, tutte presenti nel Carso Classico: i **polje**, le **valli cieche**, gli **hum**, le **città di roccia**, le **forre carsiche**, le **falesie calcaree**.

Il **polje** è una depressione chiusa di origine mista carsica e litologico-strutturale, con dimensioni talvolta fino a decine di chilometri. È una forma allungata da mettere in relazione a strutture tettoniche lineari come faglie e/o assi di pieghe. I fianchi (o uno dei fianchi) sono ripidi, acclivi o comunque non raccordati al fondo della depressione; il fondo è piatto o

Fig. 3.15 Dolina di dissoluzione nei dintorni di Padriciano (foto F. Finocchiaro).



*Fig. 3.17 Un tratto tortuoso di una roofless cave nelle vicinanze dei Campi solcati di BGG. Quello che si può considerare un ingresso è in Fig. 6.19b dell'Itinerario 2.
(Foto: Chiara Calligaris)*



sub-orizzontale, roccioso o argilloso-alluvionale. Il fondo e/o la fascia di raccordo con i fianchi sono spesso caratterizzati da piccole depressioni e/o da inghiottitoi; questi ultimi possono funzionare anche da sorgenti temporanee, dette **inversac**.

Una **valle cieca** è una forma mista fluvio-carsica, cioè una valle fluviale o un ampio solco di ruscellamento lungo il cui percorso, nel tempo, si sono aperti uno o più inghiottitoi: a monte di questi l'incisione continua ad approfondirsi e i fianchi ad evolversi, a valle non c'è più acqua, se non dopo che si sia ricreato un altro bacino idrografico. E quindi l'evoluzione della valle si interrompe mentre il resto del bacino prosegue come valle fluviale.

L'area intorno all'inghiottitoio si evolve come una dolina asimmetrica sul cui fianco a valle talora si sviluppa una vera e propria cavità drenante.

La **forra carsica** è generalmente una profonda incisione in rocce calcaree compatte e poco erodibili alla quale mancano corsi d'acqua laterali che addolciscono i rilievi.

La **città di roccia** è un'area, solitamente sub-pianeggiante o appena ondulata, in cui, ben definiti ed isolati, si ergono, per alcuni metri, dei **torrioni**, blocchi carbonatici, quasi edifici di

una città. Fattori condizionanti sono una stratificazione suborizzontale ed un sistema di fratturazione a famiglie perpendicolari, rade e persistenti.

I blocchi carbonatici di grandi dimensioni e molto isolati, sono **detti hum**. Come esempio si vedano i torrioni presso Monrupino, descritti nell'ambito dell'Escursione n. 2

Falesia calcarea è un tratto di costa rocciosa a perpendicolo sul mare, caratterizzata da calcari interessati da carsismo accelerato sui bordi e sui fianchi e da corrosione ed erosione marina al piede.

Come esempio si veda la falesia fra Duino e Sistiana, descritta nell'ambito dei capitoli seguenti sulla Geodiversità.

Le piccole forme epigee

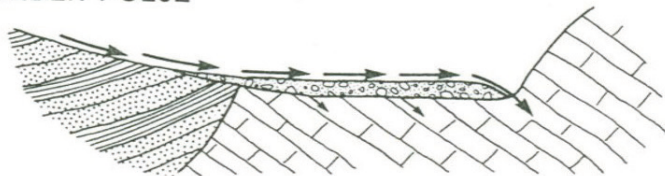
Numerose tipologie hanno le cosiddette **piccole forme** (**Karren**, in senso lato ed in tedesco), originate sulle



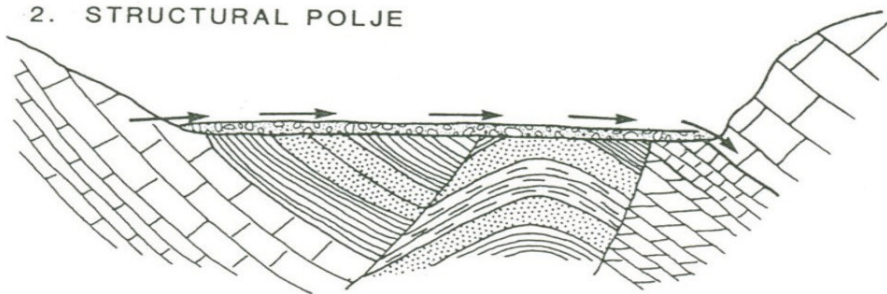
Fig. 3.18 Schema evolutivo di uvala (tratto da White, 1988).

3.20 Un tratto della forra carsica del Torrente Rosandra. (Foto: Franco Cucchi)

1. BORDER POLJE



2. STRUCTURAL POLJE



3. BASELEVEL POLJE

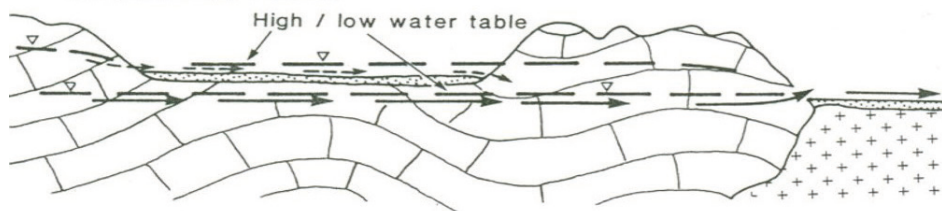


Fig. 3.19 I tre tipi base di polje: p. di bordo; p. strutturale; p. di livello di base (tratto da White, 1988). Il Lago di Doberdò occupa il fondo di un polje di livello di base.

superfici carsificabili direttamente esposte agli agenti atmosferici o esumate dopo esser state coperte da suoli (ed allora si parla di **carsismo sottocutaneo**).

Le piccole forme sono legate o alla dissoluzione attiva delle acque scorrenti su superfici più o meno acclivi (solubilità dinamica) o alla dissoluzione statica delle acque stagnanti nelle depressioni superficiali (solubilità statica). Dal punto di vista idrogeologico e genetico le forme legate a solubilità dinamica possono essere ulteriormente divise fra quelle impostate lungo linee di massima pendenza e quelle impostate lungo piani di discontinuità della massa rocciosa.

In prossimità del mare, le molecole di aerosol, gli spruzzi se non le stesse acque marine ricche in ioni estranei, innescano dissoluzione accelerata, conferendo alle piccole forme rilievo particolare.

Si riconoscono così:

- Le **scannellature** (in tedesco *Rillenkarren*, in inglese *solution flutes* o (meno usato) *rill karren*, ... Sono forme minute rappresentate da brevi solchi rettilinei separati da crestine aguzze che fungono da spartiacque, profondi circa 1 cm, larghi 1-4 cm, lunghi 5-50 cm, a sezione arrotondata. In genere sono tipiche di superfici mediamente o poco inclinate e sono riunite in complessi. In funzione dell'aspetto, chi vuole può distinguere le scannellature a pettine,

quelle a penna, quelle a fascio, quelle a isola. La genesi va ricondotta a corrosione delle acque piovane per solubilità dinamica lungo linee di massima pendenza (si vedano le figure 3.7 e 3.20). A valle delle scannellature si trovano spesso superfici lisce che corrispondono alle zone dove l'acqua forma, per unione dei diversi filetti idrici, un velo continuo che scorre in modo omogeneo senza variazioni laterali di velocità (flusso laminare).

- I **solchi carsici**, se sinuosi: **solchi carsici meandrici** (in tedesco *Rinnenkarren* o *Wandkarren* a seconda della morfologia, in in-



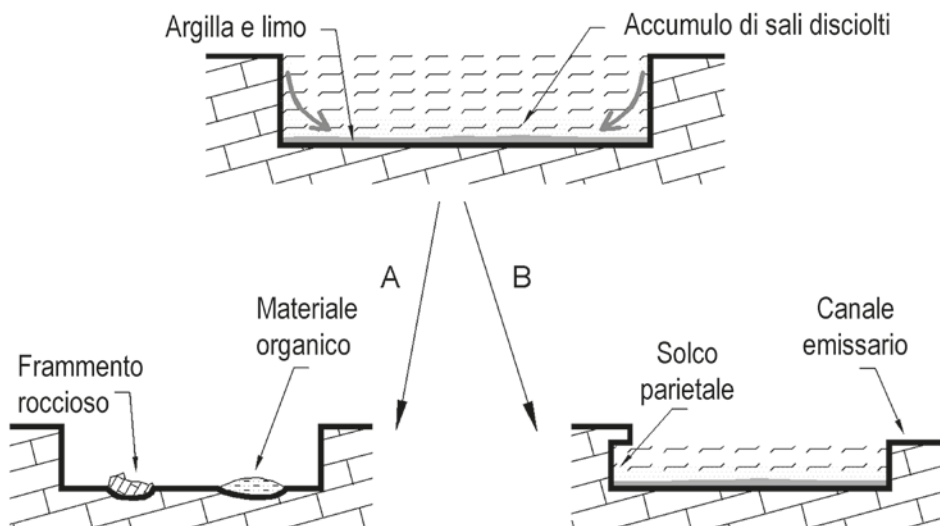
Fig. 3.21 Scannellature e solchi carsici su calcari a rudiste lungo la falesia di Duino. (Foto: Franco Cucchi)

glese *solution grooves* o (meno usato) *wall karren*, in francese *lapiès*, ...; se sinuosi: *meandering runnels*, *Meanderkarren*; se da carso coperto: *rounded karren*, *Rundkarren*). Sono solchi larghi più di 5 cm, profondi più di 3 cm, lunghi almeno 100 cm, che seguono la massima pendenza della superficie calcarea. Hanno morfologia varia: la sezione è sempre ad U, ma i fianchi possono essere più o meno acclivi in funzione della quantità e velocità delle acque di ruscellamento. Lo sviluppo è solitamente rettilineo ma anche tortuoso o a meandri, questi ultimi più frequenti sulle superfici poco inclinate. Il fondo è liscio, spesso incavato da un solco secondario, effetto dissolutivo del flusso minimo di percolazione. Il profilo longitudinale è talvolta caratterizzato da un andamento a gradinata per la presenza di piccole conche, quasi delle "minimarmitte". Si tratta di "grondaiè", la cui genesi è legata allo scorrere lineare concentrato delle acque di ruscellamento, per cui la morfologia dipende dall'inclinazione della superficie di scorrimento, dalla presenza di organismi vegetali, dal tipo di clima: sono il classico effetto di quella che viene definita corrosione accelerata (si vedano le figure 3.7 e 3.20).

- I **crepacci carsici** (in tedesco *Kluftkarren*, in inglese *grikes* o

solution grooves o (meno usato) *cleft karren*, in francese *lapiés de diaclase*). Sono profonde fratture incarsite (*solution widening of joints*), raramente legate ad anastomosi di fori, più spesso delle vere vie di deflusso preferenziale delle acque guidate dalla fratturazione. I fianchi sono sempre molto inclinati, il fondo è piatto (*trench karren*) o a V poco aperta (*cleft karren*). Dal punto di vista genetico sono simili ai solchi carsici; tuttavia, mentre nei solchi è la massima pendenza a guidare il defluire delle acque, nei crepacci sono i piani di discontinuità (normalmente quelli di frattura, se di *strato grove karren* o *cutter*) a condizionare la direzione del movimento.

- Le **vaschette di corrosione** (internazionalmente note con il termine serbo croato **kamenitza**, in tedesco *Napfkarren*, in inglese *solution pan*, *tinajita (spa)*, ...). Sono piccole conche chiuse (profondità da 2 a 50 cm, larghezza da 5 a 200 cm), tondeggianti, di diametro variabile, poco profonde rispetto le dimensioni areali. Il fondo è quasi sempre orizzontale, la sezione è a piatto o a scodella allargata verso il basso. Spesso hanno un canale emissario di scarico (*drainway*), e talvolta anche, specie se evolutesi lungo fratture, un limitato bacino di impluvio.



3.22 Evoluzione schematica di una kamenitza: la corrosione dura più a lungo sulle pareti e (caso A) sotto frammenti rocciosi o piccoli cumuli di materiale organico o terroso. Caso B: l'acqua che resta nella vasca corrode ai lati e si forma un micro solco parietale durante le fasi di progressivo svuotamento. Le pareti divengono aggettanti (Cucchi F., 2009)



Fig. 3.23 a) Kamenitza a forma irregolare con terre rosse al fondo, canale di scarico e pareti aggettanti; b) kamenitze circolari. (Foto: Franco Cucchi)

La genesi è legata allo stagnare dell'acqua in una micro-depressione, talvolta originata o favorita da fitocarsismo o da un clasto isolato. Se nella vaschetta permangono depositi o organismi anche durante le fasi di svuotamento, si possono generare delle tasche di approfondimento per carsismo sottocutaneo.

Le vaschette si allargano più velocemente di quanto si approfondiscano in quanto la corrosione è più attiva ai bordi che sul fondo. Spesso, durante le fasi di progressivo svuotamento della kamenitza per approfondimento progressivo del solco di scarico, si creano, alla base delle pareti, delle nicchie aggettanti, quasi dei "solchi di corrosione" simili ai solchi di battente.

- I **fori di dissoluzione** (pit karren o tunnel karren). Sono micro-pozzi, piccole cavità tubolari a sezione circolare o ellittica, di diametro da millimetrico a decimetrico, quasi trapananti la roccia e formati in corrispondenza di fratture. La genesi è da ricondurre a fenomeni di dissoluzione lungo canalicoli in fratture con progredire dell'allargamento dal basso verso l'alto per fenomeni di capillarità prima e di circolazione d'aria umida poi.

- Le **grize** o pietraie carsiche (dallo sloveno *griza* = pietraia). Sono campi di pietra dati da blocchetti di roccia isolati dal substrato roccioso per carsismo lungo le superfici di discontinuità (stratificazione e fratturazione) e rimasti in posto, senza essere mobilizzati da gravità o acque scorrenti. Spesso interrompono la continuità dei campi solcati, ad indicare alternanza fra bancate e stratificazione fitta, talora coprono vaste aree a significare roccia intensamente suddivisa da stratificazione e fratturazione.



Fig. 3.24 Anastomosi di fori di dissoluzione a formare uno pseudo crepaccio carsico. (Foto: Franco Cucchi)



Fig. 3.25 a) Griza (Foto: Franco Cucchi);
b) campo solcato presso Percedol (Foto:
Furio Finocchiaro).

- I **campi carreggiati o campi solcati** (*Karrenfeld* in tedesco, *lapiés* in francese, anche *limestone pavements* in inglese). Sono affioramenti rocciosi, anche vasti, in cui sono presenti in associazione più morfotipi dissolutivi quali scannellature, solchi, crepacci, vaschette, fori, ecc.

Il Carso Classico italiano

Nel Carso Classico, il carsismo è da considerare relativamente maturo, con forme che risultano il prodotto di un'evoluzione durata per lo meno una decina di milioni di anni. Ne consegue che tanto in superficie quanto in profondità sono presenti contemporaneamente forme giovanili e forme mature. Si può, in linea di massima considerare che la superficie, dall'inizio dell'incarsimento ad oggi, si sia abbassata per sola dissoluzione

complessivamente di alcune centinaia di metri, che il livello di base delle acque sia oscillato più volte e che sia stato, anche per tempi considerevoli, almeno 300/200 metri più basso dell'attuale, che il clima sia considerevolmente mutato più volte.

In linea di principio, le prime forme modellanti la superficie sono le doline di dissoluzione, forme ad imbuto risultato della dissoluzione dinamica centripeta di acque richiamate in profondità da punti o zone di assorbimento preferenziale. Nel contempo alcuni punti idrovori, quelli a contatto con le rocce non carsificabili al contorno del massiccio calcareo, iniziano a fungere da veri e propri inghiottitoi e nel massiccio viene a crearsi il reticolo ipogeo drenante le acque verso i punti di emergenza. Accanto alle doline di dissoluzione iniziano così ad aprirsi numerose doline di crollo, perché i vani ipogei si ampliano man mano e spesso lo spessore della roccia di copertura diviene esiguo.

Oggi delle forme superficiali più antiche resta ben poco e le doline a diametro maggiore di 100/200 metri sono appena una decina. Sono solitamente caratterizzate in profondità da un sistema complesso di cavità ubicate in corrispondenza dei fianchi e del fondo; le cavità sono più o meno beanti e spesso riempite da materiali eterogenei (crolli, concrezioni, argille).

L'abbassamento della superficie porta nel tempo alla modifica della tipologia dei suoli, campi solcati vengono sostituiti da grize poi trasformate in esigui suoli, aree a carso coperto divengono grize o nuovi campi solcati, con l'assetto strutturale e la petrografia delle rocce a definire le diverse tipologie di piccole forme carsiche di corrosione superficiale. In alcuni punti restano per qualche decina di migliaia di anni forme residuali.

Certo il paesaggio non muta con la velocità di quelli soggetti ad erosione o esarazione, sembra immobile nei tempi umani, e quasi lo è. Ma va guardato consci che è un fotogramma di una storia antichissima che continuerà ad evolversi.

3.2.2 Geomorfologia ipogea

La **speleogenesi** è l'insieme dei numerosi processi che, in quasi tutti i contesti geologici in cui sono presenti rocce carbonatiche, portano alla

formazione di cavità naturali.

Esistono cavità generate da processi che non includono la dissoluzione carsica (grotte vulcaniche, grotte nei ghiacciai, ripari sotto roccia, ...), ma la maggior parte delle grotte⁴ è formata prevalentemente da processi di dissoluzione in rocce carbonatiche (speleogenesi carsica in senso stretto).

Nelle rocce carbonatiche sono essenzialmente due i processi che portano alla genesi e alla evoluzione delle cavità. In entrambi l'agente è l'acqua:

- processi chimici quali dissoluzione della roccia e corrosione;
- processi fisici quali erosione e gravità.

Si veda al proposito anche quanto riportato nei capitoli precedenti.

Le acque sono prevalentemente quelle di origine meteorica (dette epigeniche) che agiscono scendendo dall'alto verso il basso guidate dalla gravità ma possono anche essere acque profonde (dette ipogeniche) che attivano i processi chimici risalendo dal basso verso l'alto, spesso miscelandosi con le acque epigeniche.

In corrispondenza delle linee di costa vi sono poi acque miste, i cosiddetti cunei salini di interfaccia fra acque prettamente marine ed acque dolci, miscele che contribuiscono localmente ad accelerare la corrosione.

⁴“grotta” è termine generico per cavità, di norma usato dagli speleologi ad indicare vani sotterranei naturali in cui l'uomo può penetrare e quindi misurare le dimensioni e l'orientamento dei vani georeferenziandone l'ingresso.

Pressione

La solubilità della CO_2 dipende anche dalla pressione (pensiamo all'acqua gassata per esempio). Un aumento nella pressione idrostatica fa incrementare la solubilità della CO_2 e conseguentemente del carbonato in acqua. Questo processo è rilevante nelle prime centinaia di metri dell'acquifero, con aumenti della solubilità di circa 6 mg/L per ogni 100 metri di colonna d'acqua. Un esempio è dato da grotte che vengono inondate repentinamente: in nicchie sul soffitto può venire intrappolata dell'aria che viene compressa, causando la dissoluzione della CO_2 e quindi un aumento dell'aggressività dell'acqua, con la possibile formazione di cupole e canali di volta. L'effetto dell'aumento di solubilità dell'anidride carbonica in profondità (ad alta pressione) è molto importante soprattutto in presenza di CO_2 ipogenica. In questo caso l'effetto combinato di abbassamento di temperatura (man mano che l'acqua sale in superficie) e diminuzione della pressione (con rilascio di bolle di CO_2 che dissolve istantaneamente nell'acqua) può creare zone di rinnovata aggressività delle acque.

Genesi ed evoluzione delle forme carsiche ipogee

L'analisi delle morfologie ipogee non può prescindere dalla conoscenza delle fasi evolutive del massiccio o dell'area carsica in cui si manifestano. Questo in quanto i morfotipi ipogei sono il prodotto delle diverse situazioni idrologiche in cui si sono trovati

nel tempo i volumi interessati da carsismo.

Attraverso le superfici di discontinuità, siano esse piani di strato, faglie o fratture, e/o attraverso le porosità della roccia, siano esse primarie o secondarie, l'acqua penetra dalla superficie nell'interno della massa rocciosa e/o dalle profondità ai volumi sovrastanti e, tramite percorsi più o meno articolati e veloci, si trasferiscono ai punti di risorgenza.

Ad un inizio quasi casuale, condizionato dai punti idrovori, cioè quelli che consentono alle acque di penetrare nel suolo e da lì nel sottosuolo, dei percorsi delle acque nel sottosuolo, segue la formazione delle prime proto-cavità che si sviluppano con modalità a casualità guidata (vedi innanzi). Ne consegue l'allargamento preferenziale dei tratti di condotta idrica con sbocco all'esterno, quelli cioè in grado di richiamare per deflusso più acqua, e poi lo sviluppo vero e proprio all'interno dell'idrostruttura, frutto di numerosi fattori fra cui prevalgono quelli geologici e climatici.

In spazi temporali diversi, ma in tempi che hanno come ordine di grandezza ed unità di misura le decine di migliaia di anni dal momento in cui le acque iniziano ad aggredire la superficie esposta o le rocce profonde, in seno alle masse rocciose carsificabili si genera, per dissoluzione, un reticolo di vuoti comunicanti più o meno articolato.

L'evoluzione del reticolo ipogeo segue regole non univoche e modali-

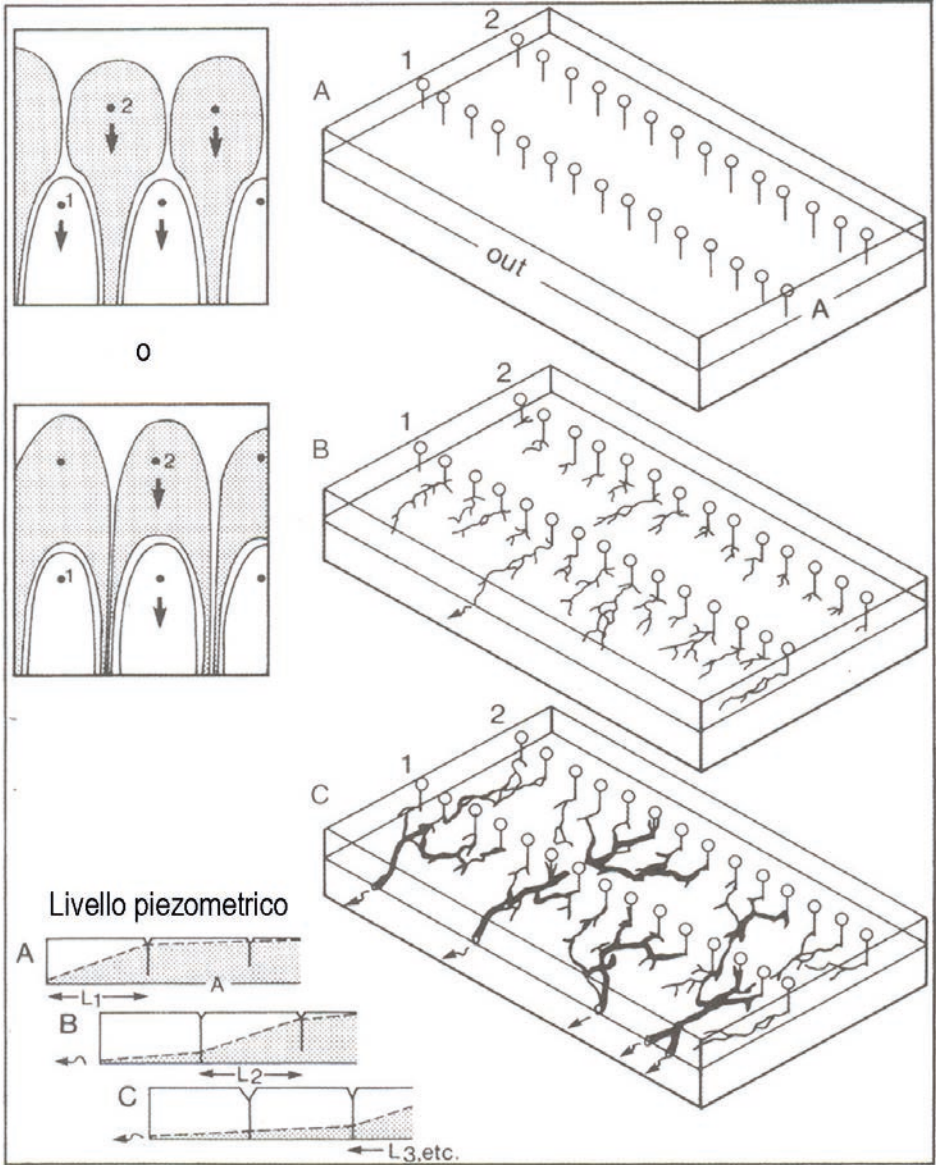


Fig. 3.26 Il progredire "casuale" delle protocavità (tratto da Ford e Williams, 2007).

tà complesse, secondo processi non ancora noti nei dettagli anche perché molteplici sono i fattori che intervengono nel guidare l'evoluzione.

Fra questi fattori, forse i più importanti sono la persistenza e la beanza dei piani di discontinuità: più le superfici sono estese e meno sono aderenti, più facilmente penetra l'acqua, prima per capillarità, poi con regime laminare, poi ancora con regime turbolento.

Fattore essenziale è anche la carsificabilità della massa rocciosa: sappiamo che le rocce a pasta di fondo micritica hanno un tasso di corrodibilità superiore a quello delle rocce sparitiche, che i cristalli dolomitici resistono di più di quelli sparitici; che le impurità organiche favoriscono la dissoluzione, mentre quelle silicatiche la ostacolano, o meglio ostacolano i flussi idrici una volta mobilizzate. Ecco che alcuni vani si ampliano più velocemente di altri.

Gli altri fattori che influenzano la velocità delle reazioni dissolutive rallentandole o accelerandole, ovviamente intervengono a loro volta: miscela di acque diverse per chimismo e/o tem-

peratura, presenza di gas disciolti o a contatto,

Sappiamo poi che, nel momento in cui l'acqua percola con maggior velocità inizia anche la fase di erosione, con conseguente trasporto del materiale soluto altrove.

Il reticolo ipogeo interessa tutto il massiccio, e dal punto di vista idrologico si vengono a creare due porzioni di massiccio:

- quella superiore, con i vuoti interessati **da percolazione e ruscellamento** con riempimento d'acqua solamente durante la fase di trasferimento delle acque dalla superficie verso il basso.
- quella inferiore con i vuoti carsici completamente riempiti d'acqua al di sotto della cosiddetta **superficie freatica**⁵.

Si ha così una suddivisione "idrogeologica" del massiccio carsificato in:

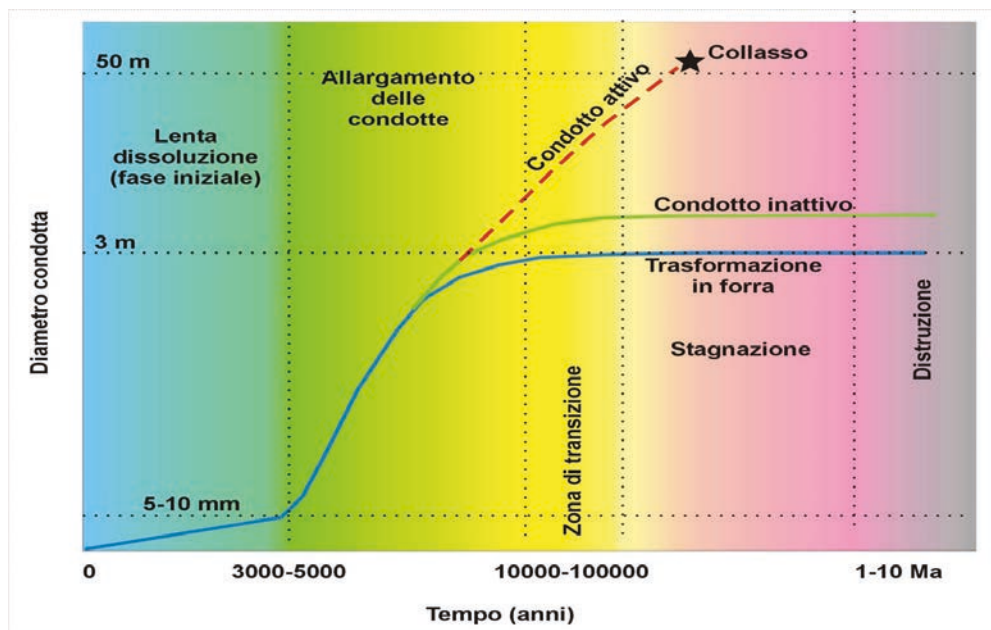
- una **zona vadosa** o **zona di percolazione** o **zona di assorbimento**;
- una **zona satura** o **zona freatica** o **zona dell'acqua di fondo**.

Fra le due zone vi è una fascia intermedia, detta **zona di oscillazione** (anche zona di oscillazione della falda o **zona epifreatica**), il cui spessore

⁵Molti termini sono presi dall'idrogeologia classica, quella delle rocce porose. La superficie freatica (o superficie piezometrica nelle falde freatiche) è la superficie superiore che divide la zona satura da quella insatura: sotto tutti i vuoti (i pori) sono saturi in acqua, sopra i vuoti contengono aria. Esiste una zona intermedia nella quale, per capillarità, l'acqua di falda imbibisce (nel nostro caso risale) i dotti (nel nostro caso i piani di discontinuità) presenti nel sottosuolo: il liquido risale in misura inversamente proporzionale alla dimensione dei dotti.

In carsologia quindi, la superficie freatica unisce i punti di massima altezza delle acque all'interno di un massiccio carsificato, ovviamente nello stesso momento.

Fig. 3.27 Finchè l'acqua circola con regime laminare l'ampliamento dei vani è lento, appena si passa al regime turbolento il moto dell'acqua, movimentata la CO_2 , favorisce la diffusione delle sostanze nel liquido ed annulla l'effetto impacchettamento. Inoltre entra in gioco l'erosione ed i vani si ampliano sempre più e la fase prettamente erosiva prende addirittura il sopravvento sulla semplice dissoluzione (tratto da De Waele et al., 2009).



dipende dal regime idraulico locale e dal variare della superficie piezometrica. Cioè dalla quantità d'acqua che entra nel sistema e dalla permeabilità complessiva, ossia dalla velocità con cui le acque defluiscono dal sistema.

È così possibile inquadrare, dal punto di vista genetico-evolutivo e descrittivo, le morfologie a parità di agente genetico prevalente. Ben si comprende come le caratteristiche litologiche (litotipi più o meno o per nulla carsificabili), quelle tettoniche (pieghe,

faglie, ecc.) e la distribuzione spaziale delle discontinuità (frequenza e assetto spaziale) condizionino in maniera determinante i morfotipi ipogei e lo sviluppo, la tipologia e l'entità dei fenomeni carsici.

Né va dimenticata, nell'analisi delle morfologie, l'influenza sull'evoluzione del carsismo delle vicissitudini evolutive ed in particolare di quelle tettoniche e di quelle climatiche che, dati i lunghi tempi necessari alla compiuta evoluzione, sono forse le vere modelatrici dei morfotipi carsici.

Nel tempo infatti, e nelle varie condizioni geologico-strutturali e geografiche succedutesi durante la carsogenesi, vanno inquadrati, analizzati e compresi quelli che sono i risultati dell'azione singola o combinata dei tre principali agenti morfogenetici:

a) l'azione delle acque scorrenti o stagnanti, in quanto capaci di corrodere la roccia (creando i vuoti quando aggressive) e/o di ri-depositare roccia sotto forma di concrezione (riempiendo più o meno completamente i vuoti quando sovrassature);

b) l'azione delle acque in quanto capaci (per energia derivante dalla velocità) di erosione meccanica (e quindi di creare vuoti all'interno della massa rocciosa o dei sedimenti), di trasporto e di deposito di materiale (e quindi di modifica, in positivo ed in negativo, dei vuoti) di varie dimensioni se non di vario tipo (morene spinte all'interno dai ghiacci, alluvioni trasportate all'interno dai corsi d'acqua superficiali e/o ipogei);

c) l'azione della gravità, cioè dei processi di modifica delle morfologie originarie tramite crolli da volte e da pareti di porzioni di roccia o di altro materiale, con l'imposizione di nuove condizioni di stabilità (e quindi di nuove forme dei vuoti).

In sintesi, ogni cavità è composta da vani, le cui caratteristiche spaziali sono integrate nella realtà geologica ed evolutiva, che hanno una loro morfologia tipica e sono interessati a loro volta da morfotipi particolari.

Nell'analisi delle morfologie ipogee giova quindi distinguere, come detto innanzi, quelle originatesi nella zona freatica dette **morfologie dirette o singenetiche**, da quelle originate in nella zona di percolazione e dette **morfologie indirette o paragenetiche**. Nella zona intermedia di oscillazione in cui occasionalmente il livello di base carsico si innalza le morfologie che si creano sono miste, dirette ed indirette.

Le morfologie dirette sono le forme la cui genesi è dovuta all'azione corrosiva ed erosiva delle acque esercitata in tutte le direzioni durante l'allagamento del vano ipogeo saturo.

Morfotipo classico è la **condotta freatica** o condotta forzata. È una galleria più o meno inclinata e rettilinea, più raramente meandriforme, lungo la quale, quasi un tubo di comunicazione, le acque si trasferiscono a velocità variabile al di sotto del livello di base, locale e momentaneo o generale e stabile.

L'azione corrosiva si esplica sulle pareti e lungo la direttrice di flusso in ogni direzione e quindi la sezione trasversale avrà morfologia ideale circolare o avrà forma ovaloide conseguente all'eventuale diversa corrodibilità della roccia nei diversi punti. Sempre tuttavia, la dimensione longitudinale, quella nel senso della corrente e dello sviluppo della condotta, prevale nettamente su quella laterale e verticale. Fra le morfologie dirette andrebbero anche inseriti i **pozzi**, cavità a pre-

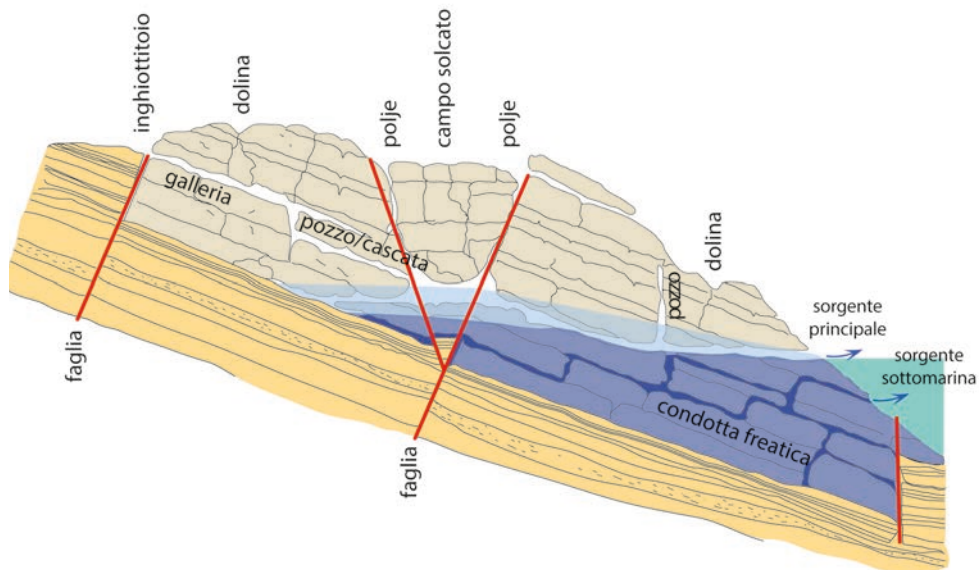
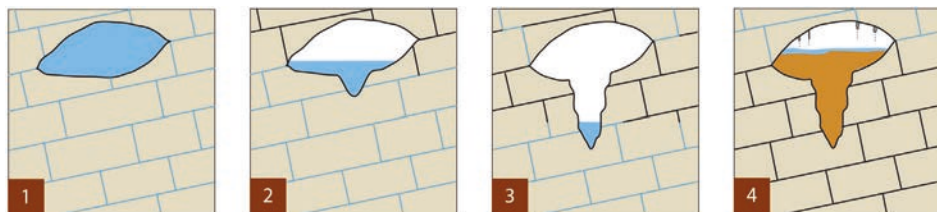


Fig. 3.28 Schema idrogeologico teorico sintetico di un acquifero carsico. In grigio le rocce calcaree (aquifer), in ocra le rocce impermeabili (aquiclude), in celeste le acque di falda. (modificato da Cucchi et al., 2012).

Fig. 3.29 Evoluzione di una cavità dalla fase iniziale di condotta freatica a quella più matura di cavità a forra riempita da depositi alluvionali (tratto da Cucchi et al., 2012). 1) L'acqua riempie tutti i vani e li allaga completamente; 2) l'acqua scorre a pelo libero; 3) L'acqua scava una forra al centro della galleria, inizia la formazione degli speleotemi; 4) si modifica il regime idrico e si innescano processi di sedimentazione. L'acqua scorre su depositi di riempimento della galleria, continua la formazione degli speleotemi.



valente, se non assoluto, sviluppo verticale, molto allungata sull'asse maggiore e dalla sezione trasversale variabile da circolare a ellittica. Si originano nella zona satura solamente come condotte freatiche subverticali in pressione, in quanto solitamente si evolvono impostandosi su superfici di discontinuità subverticali nella zona vadosa. Si ampliano per percolazione lungo le pareti, per moti convettivi di aria satura di umidità, per caduta d'acqua. Si possono distinguere i "**pozzi classici**", a forma subcilindrica con sezione simmetrica rispetto ad un piano verticale terminanti verso l'alto con un soffitto a forma di campana anche molto allungata, ed i "**pozzi cascata**", originati da afflussi idrici provenienti da condotte laterali più o meno inclinate ed intersecanti una struttura verticale.

Particolari morfologie dirette di dimensioni contenute che interessano le volte o le pareti delle gallerie o dei pozzi, sono gli *scallops*, le cupole, i canali di volta e le mensole rocciose.

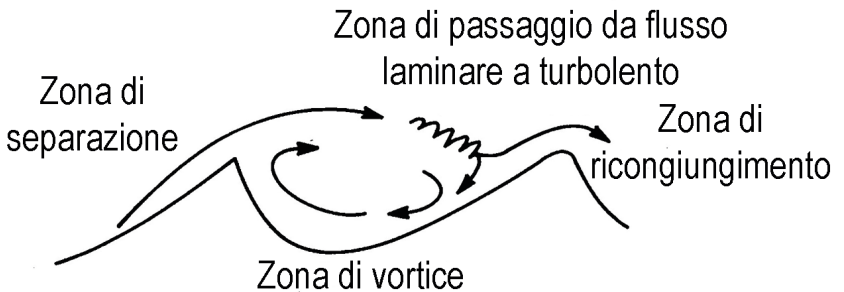
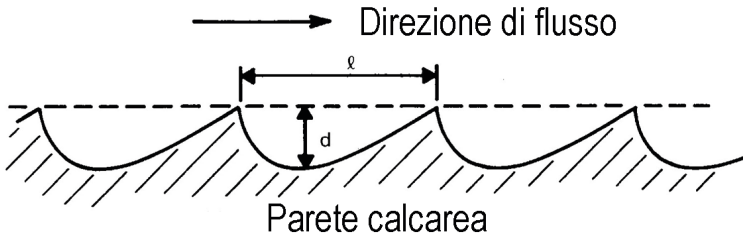
- gli **scallops** sono sculture alveolari ondulate (quasi delle "cucchiolate"), di dimensione da centimetriche a decimetriche, chiamate anche "impronte di corrente". Sono dovute all'escavazione per corrosione (ed eventualmente anche per abrasione) della roccia da acqua corrente in condizioni freatiche ed in regime di circola-

zione turbolenta e vorticosa. Le concavità sono asimmetriche nel senso della corrente, con la cresta e la parte più scavata verso monte. Sono forme interessanti specie dal punto di vista idrogeologico, perché le dimensioni consentono di stabilire la velocità della corrente e l'asimmetria la direzione del flusso idrico.

- le **cupole di corrosione** (dette anche **marmitte inverse**) sono cavità emisferiche evolutesi sul soffitto o sulle pareti delle gallerie, di dimensioni da decimetriche a metriche, impostate di solito in corrispondenza di incroci di discontinuità. Possono formarsi in condizioni vadose per condensazione da aria satura in umidità e in condizioni freatiche per variazione della concentrazione di CO_2 nelle acque, per miscela di acque del flusso principale con altre provenienti da fratture/canalicoli minori presenti nel soffitto, o, molto più raramente, per l'azione di moti turbolenti dell'acqua stessa o per ristagno di aria/gas sul soffitto. Nella loro formazione ed ancor di più nelle loro dimensioni, talora (non nel Carso) intervengono acque ipogeniche, gassose e/o termali, che accelerano la dissoluzione.

- i **canali di volta** sono morfologie da flusso idrico lento, legate allo scorrimento obbligato e in pressione di acque a contatto con la volta delle gallerie suborizzontali

Fig. 3.30 a) e b) Scallops sulla volta di una galleria della grotta Gualtiero Savi, all'interno del M. Stena in destra della Val Rosandra. L'incavo è una cupola di corrosione. c) I disegni sono modificati da White, 1988.



a seguito del quasi totale riempimento del vano da parte di materiali argillosi alluvionali, quindi in condizioni di semi-freaticità. Sono generati anche da flussi d'acqua in un interstrato (ma può essere anche una discontinuità qualsiasi) suborizzontale aperta/bean-te particolarmente persistente e continua. L'andamento può essere dipendente (andamento a zig-zag) o indipendente (andamento sinuoso o meandriforme) dalle discontinuità della massa rocciosa. Le dimensioni sono variabili in altezza, lunghezza e larghezza: si va da pochi metri a decine di metri nel senso della corrente, con sezioni trasversali alte ed allargate da pochi centimetri al metro. Particolari morfotipi di genesi analoga sono i **pendenti**, sporgenze relitte di roccia che scendono dal soffitto: si formano per intreccio di filetti idrici che percorrono depositi di riempimento ghiaioso-limosi corrodendo il soffitto delle cavità.

- le **mensole** infine, sono sporgenze longitudinali laterali delle gallerie, che testimoniano fatti di erosione e/o corrosione selettiva o sono originati da variazioni del regime di scorrimento idrico e dalla presenza di depositi di riempimento parziale poi asportati.

Le morfologie indirette

sono tutti quei morfotipi che modificano la forma dei vani o che sono

il risultato della modifica dei vani a morfologia diretta per fatti gravitativi, deposizionali fisici e chimici, tettonici. Molto spesso le morfologie indirette sono il risultato della concomitante (o distribuita nel tempo) azione dei diversi fattori morfogenetici.

L'erosione porta all'approfondimento per corrosione ed erosione da parte delle acque scorrenti in regime vadoso sul pavimento delle gallerie, con la formazione di forre, di solchi di incisione, di marmitte, cioè di forme molto simili a quelle che si generano in ambiente epigeo fluviale. Frequente è lo scalzamento al piede di depositi preformati (mensole, crolli e mobilitazioni di depositi chimici o fisici, ecc.) per erosione, movimentazione e trasporto in altre zone della cavità.

La sedimentazione consiste nella formazione di depositi più o meno grossolani abbandonati dalle acque scorrenti in funzione della loro diminuita capacità di trasporto: ghiaie, sabbie, limi, argille. Talvolta nelle cavità si incuneano anche depositi glaciali quali morene. Si hanno quindi depositi "autoctoni", derivati da smantellamento, trasporto e deposito di materiali presi in carico all'interno della massa rocciosa, e depositi "alloctoni", costituiti da materiali introdotti dall'esterno attraverso gli inghiottitoi. Questi depositi possono restare sciolti o appena addensati, come divenire parzialmente cementati divenendo veri e propri conglomerati.

I **crolli** per gravità sono il risultato di processi graviclastici che elaborano,

con fatti microclastici o con episodi macro-gravitativi, i vuoti che non sono più in equilibrio geostatico per portare a forme più stabili. Oltre alla caduta di piccoli volumi rocciosi, si verificano grandi crolli da soffitto (che possono dar luogo a doline di crollo se sufficientemente superficiali) o ribaltamenti dalle pareti in sale e in gallerie. Frequenti sono anche i cedimenti di pavimenti per anastomosi di gallerie, i ribaltamenti per scalzamento al piede, le fratture di tensione. Si possono formare così accumuli anche notevoli di materiale vario sciolto (e talvolta successivamente cementato) più o meno grossolano: merita tenere presente nelle analisi evolutive che i detriti occupano maggior volume del materiale in posto.

Studi recenti, svolti confrontando l'età di alcuni grandi crolli in cavità europee, hanno riscontrato una certa corrispondenza fra grandi modifiche

climatiche esterne e grandi crolli. Una spiegazione è legata alla propagazione in profondità delle dilatazioni termiche cristalline, che fungono da fattori scatenanti una situazione geologicamente predisposta (geometria della fratturazione favorevole, incarsimento avanzato e decadimento delle caratteristiche geomeccaniche).

Altri crolli imponenti sono sicuramente dovuti anche all'improvviso irrompere di acque in forte pressione in vani dai quali il deflusso è decisamente inferiore all'afflusso: quasi dei "colpi di ariete" dagli effetti dirompenti su pareti e/o volte dei vani.

Fra i depositi fisici oltre a quelli alluvionali (ghiaie, sabbie, limi più o meno cementati) merita segnalare i cosiddetti **plastici**, associazioni di solchi, creste e piramidi, formati in depositi di argille e limo più o meno sabbioso, in seguito all'azione ripetuta di allagamento e di successivo

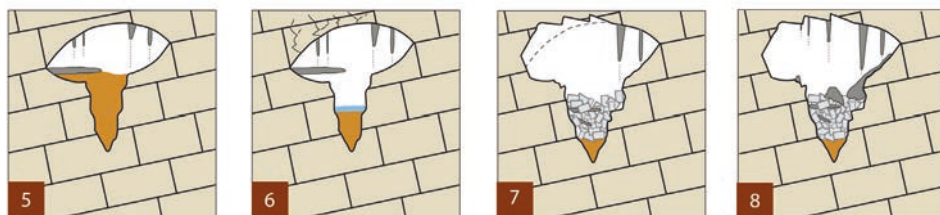


Fig. 3.31 Evoluzione di una cavità dalla fase di forma matura a quella di cavità matura. 5) Si formano speleotemi complessi ed inizia l'erosione dei depositi di riempimento; 6) continua l'erosione e la formazione di speleotemi; 7) iniziano i crolli per adattamento graviclastico; 8) crolli, concrezioni, depositi di riempimento modificano la forma del vano originario (tratto da Cucchi et al., 2012).

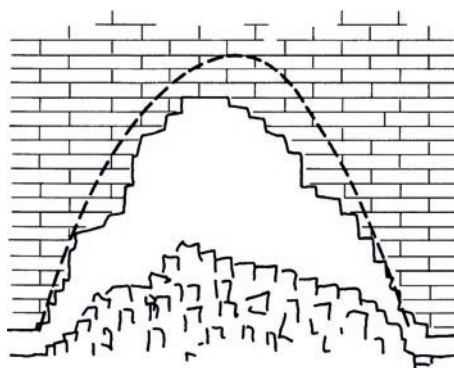


Fig. 3.32 Genesi di una sala per crollo dalla volta in un vuoto. Se nel crollo la volta si apre in superficie, si viene a formare una dolina di crollo (tratto da White, 1988).



Fig. 3.33 La "Caverna A.F. Lindner", l'ampio vano al fondo dell'Abisso di Trebiciano è parzialmente riempito da crolli e depositi alluvionali. La bassa galleria illuminata dagli speleologi è il cosiddetto "sifone d'entrata" (foto A. Maizan).

svuotamento di una cavità da parte delle acque o del gocciolio dalla volta. Le **vermicolazioni argillose**, o “pelli di leopardo”, sono particolari depositi pellicolari sottili di materiale incoerente argilloso depositato sulle pareti. Per evaporazione e per attrazione elettrostatica (secondo alcuni anche per attività batterica) le particelle argillose si agglutinano e formano degli aggregati irregolari, discontinui di esiguo spessore e di piccole dimensioni.

Il **concrezionamento** (deposizione chimica) consiste nella ricristallizza-

zione di un determinato sale (solitamente carbonato di calcio, ma in occasioni speciali anche altri carbonati) per sovrassaturazione, quasi sempre in ambiente vadoso. La forma e la struttura delle concrezioni (dette **speleotemi**) dipendono dal “tipo di moto” dell’acqua mineralizzata: provenienza puntuale o diffusa, gocciolio o scorrimento, portata costante o variabile, scorrimento su pareti o su fondo, scorrimento laminare o turbolento, correnti d’aria, variazioni di umidità assoluta, arricchimenti minerali o termali, sono alcuni dei fattori che condizionano la morfologia delle

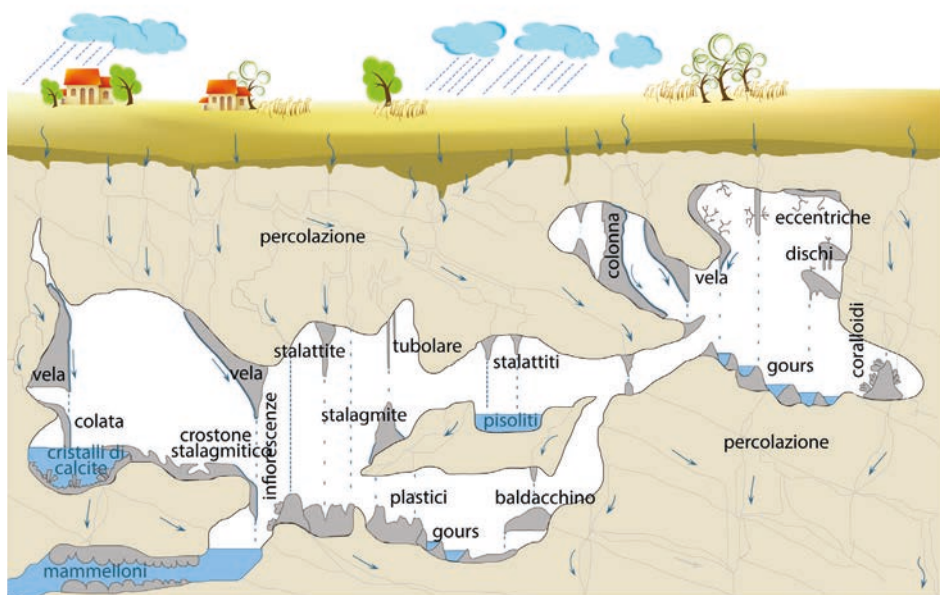


Fig. 3.34 Tipi di speleotema in funzione del regime idrico (modificato da Cucchi et al., 2012).

diverse forme. Ovviamente anche la direzione dei flussi aerei o idrici prevalenti influenza la forma ed il tipo di cristallizzazione.

Che quindi possiamo/dobbiamo leggere in funzione tanto di modello genetico, quanto di testimonianza di passati regimi idrici e/o climatici.

Fra i meccanismi principali di deposizione possiamo ricordare:

- a) deposizione da gocciolamento (**tubolari, stalattiti, veli o cortine, stalagmiti**);
- b) deposizione da scorrimento (**colonne, colate, crostoni stalagmitici, gours**);
- c) deposizione da capillarità (**dischi, eccentriche, infiorescenze**);
- d) deposizione in condizioni subacquee (mammelloni, **pisoliti**);
- e) deposizione da acque salienti (gaysermiti);
- f) deposizione da condensazione (*rimas, baffi*).

Le stalattiti e le stalagmiti rappresentano le forme più comuni di concrezionamento di grotta. Esse si generano per effetto della deposizione di cristalli di calcite (CaCO_3) per evaporazione dell'acqua durante lo stillicidio. Le **tubolari** sono stalattiti particolari il cui diametro rimane costante e coincidente con quello della goccia d'acqua che le genera (0,4 - 0,6cm). Il gocciolio è sufficientemente lento da permettere la deposizione di materiale a corona circolare, ma è abba-

stanza veloce da non consentire cristallizzazioni all'interno del tubolare.

Le **stalattiti** si formano sulla volta delle cavità: la goccia, perdendo per diffusione anidrite carbonica nell'atmosfera, deposita sul bordo cristalli di calcite. L'acqua percola attraverso un canalicolo centrale (il che contribuisce alla crescita verticale) e lungo la superficie esterna, depositando sottili veli concentrici che fanno accrescere radialmente lo speleotema.

Nel punto di caduta (di solito sul pavimento) di una goccia si forma la **stalagmite**, la cui forma cilindrica con l'apice ogivale è dovuta al fatto che la deposizione è massima nel punto di impatto e tende a diminuire radialmente di mano in mano che ci si allontana dal punto di caduta. La forma della stalagmite dipende oltre che dalla velocità di caduta (e quindi dall'altezza), dalla quantità d'acqua e dal suo regime (e quindi dal tipo di clima esterno).

L'unione di una stalattite con una stalagmite forma una **colonna**, che si evolve poi come una colata.

Il segmento verticale stalattite - goccia che cade - stalagmite resta fotografato dall'asse di accrescimento della stalagmite: i "basculamenti", cioè le variazioni di posizione nello spazio del volume roccioso che contiene la cavità, sono così "registrati" dalle successive bande di accrescimento della stalagmite. Analizzando la forma delle bande di accrescimento e le deviazioni dalla verticalità de-

Fig. 3.35 Crescita di una tubolare o cannula (modificato da Cucchi et al., 2012).

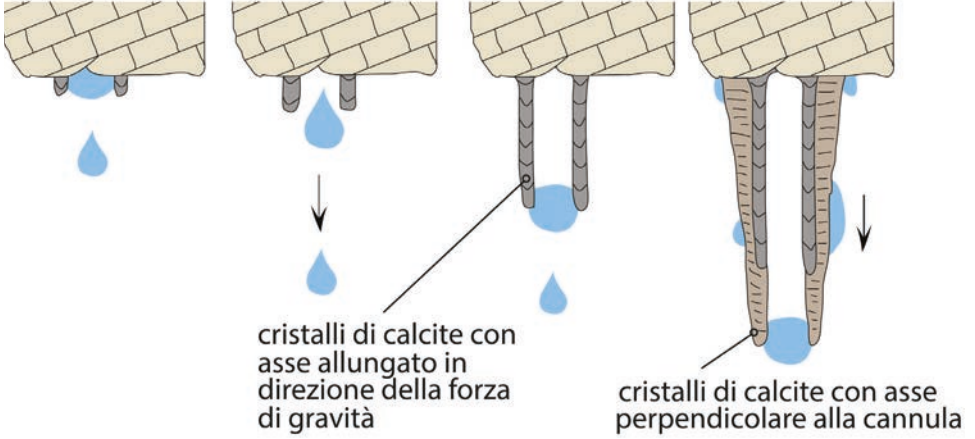
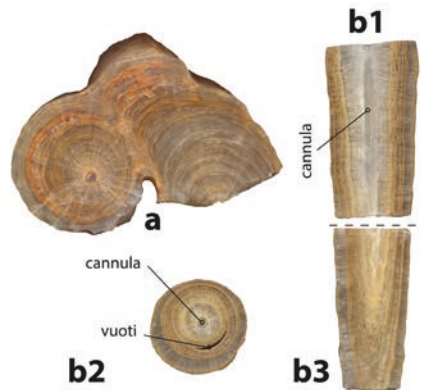
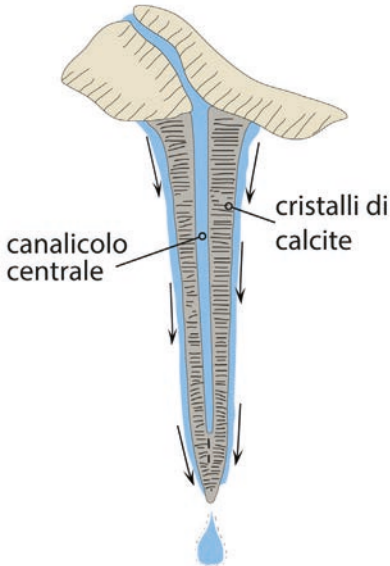


Fig. 3.36 Formazione di una stalattite (modificato da Cucchi et al., 2012).



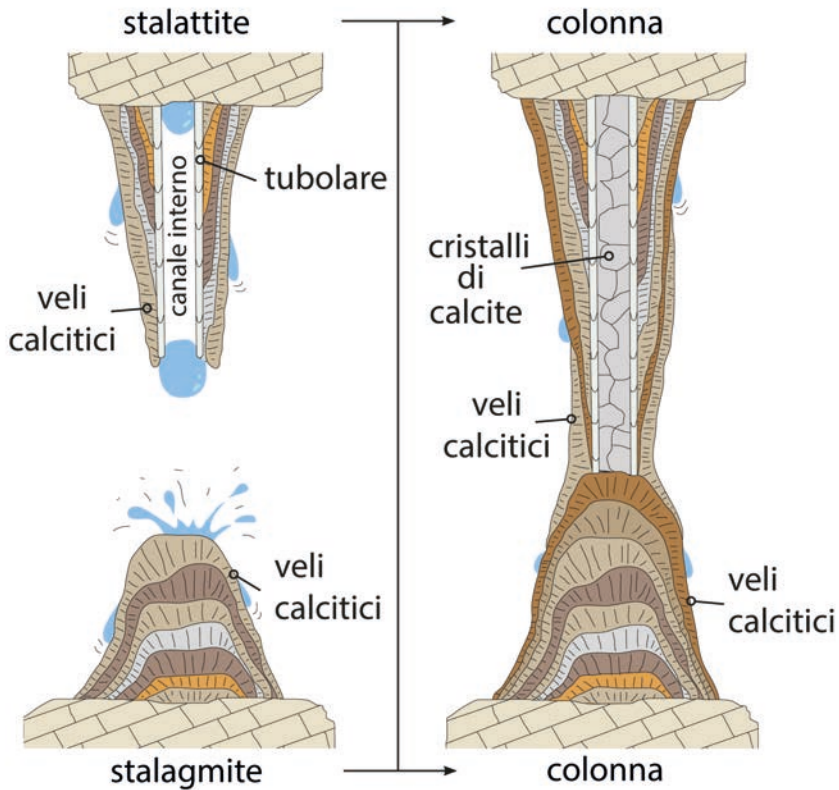


Fig. 3.38 Crescita di una stalagmite (a sinistra) fino alla formazione di una colonna (a destra) (modificato da Cucchi et al., 2012).

Fig. 3.37 a, sezione trasversale di due stalattiti coalescenti; b1 e b3 sono le sezioni trasversali di una stalattite, al centro di b1 si nota ancora la cannula originale che in b3 è concrezionata. b2 sezione trasversale (tratto mancante tra b1 e b3) in cui si notano al centro la cannula e tutto attorno fasce di cristalli di diverse dimensioni in funzione dell'entità del percolio. Si noti come fra una fase di concrezionamento e l'altra possono crearsi vuoti. Le variazioni di colore dipendono dalla presenza di sostanze organiche, ioni metallici e sostanze pigmentanti. (Cucchi et al., 2009)

gli assi di accrescimento, si possono ricostruire alcuni avvenimenti geologici quali i movimenti recenti della crosta più superficiale (spesso accompagnati da sismicità) e il mutare del clima.

Le **vele**, o cortine, sono concrezioni a forma di drappo, che si formano, per gocciolio e/o scorrimento di acque in una data direzione, dapprima lungo la parete, poi staccandosene.

Le **colate**, che si depositano con grande varietà di forme su superfici da subverticali a suborizzontali, debbono la loro origine ad un sottile velo d'acqua che fluendo sopra le superfici deposita cristalli di calcite (ad asse di accrescimento perpendicolare alla superficie). Anche le colate, specie quelle parietali, hanno morfologia legata alla dinamica del flusso ed alla quantità d'acqua e possono essere complicate da stalattiti o gours.

I **gours** sono vasche pensili sbarrate da dighe di concrezione; le dimensioni sono variabili da pochi millimetri in altezza e larghezza (micro-gours), a decine di metri in larghezza ed alcuni metri in altezza. Nella zona di tracimazione si instaurano condizioni di turbolenza con conseguente rilascio di CO_2 e deposizione della concrezione stessa per sovrasaturazione: l'andamento è solitamente sinuoso in funzione delle irregolarità del substrato e dell'energia cinetica dei deflussi.

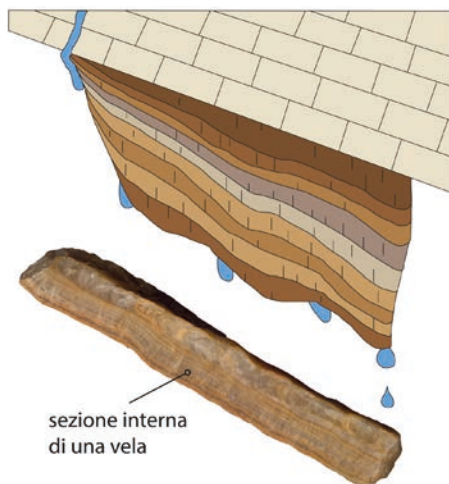


Fig. 3.39 Crescita di una vela, o cortina, e sua sezione (modificato da Cucchi et al., 2012)

I **dischi** sono concrezioni ovoidali o subcircolari, costituite da due piatti (spessi ciascuno 1-5 centimetri) separati da un piano di discontinuità centrale. Il piano rappresenta l'estrusione nel vano della cavità di una frattura interna alla roccia, l'acqua affiora dalla frattura per capillarità e fuoriesce in tutte le direzioni.

Le **eccentriche** sono concrezioni che si sviluppano in ogni direzione senza essere apparentemente influenzate dalla gravità. Esse si sviluppano su o da un substrato poroso che permette l'evoluzione di un canalicolo di alimentazione interno con diametro

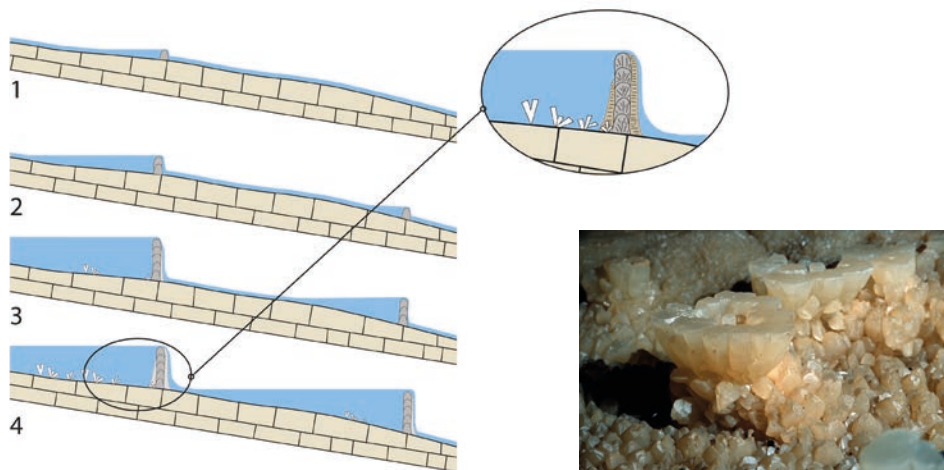


Fig. 3.40 a) Formazione di vasche per sbarramento da gour e di maxicristalli calcitici (modificato da Cucchi et al., 2012); b) alcuni macrocristalli sul fondo di un gour nella Grotta Impossibile (Foto: Franco Cucchi).

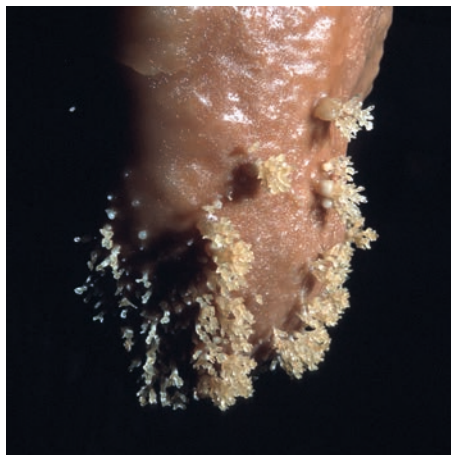


Fig. 3.41 a) Eccentriche e b) infiorescenze su stalattiti nella Grotta Impossibile. (Foto: Franco Cucchi)

dell'ordine dei centesimi di millimetro: l'acqua raggiunge la sommità per capillarità, è poca e la geminazione dei cristalli non risente di tensioni di flusso. Se a condensare non è l'acqua ma l'aerosol, si possono avere eccentriche aciculari dette "baffi".

A loro volta, anche le **infiorescenze** sono date dal "fiorire" di cristalli calcifici per capillarità dalle pareti.

Le **pisoliti**, o perle di grotta, sono concrezioni libere costituite da bande concentriche sviluppatesi su un nucleo di deposizione. La forma più comune è quella sferica, con diametro variabile da pochi centesimi di millimetro (**ooliti**) ad una decina di centimetri.

Si trovano solitamente in gruppi all'interno di vaschette alimentate da acqua sovrasatura.

3.2.3 Le ricerche speleologiche

Il termine "speleologia" entra nella letteratura scientifica solamente alla fine dell'800, ad opera del francese Emile Riviére, Infatti lo studio scientifico e sistematico delle cavità e delle acque sotterranee nasce, a partire dalla prima metà dell'800 sia nei territori del Carso classico, sia in Francia, nel corso del secolo, essenzialmente ad opera principalmente di Eduard Alfred Martel (1859-1938).

Tuttavia, già a partire dalla seconda metà del '600 erano stati dati alle stampe i primi testi che descrivevano le cavità sotterranee e che cercavano di dare, pur sulla base delle cono-

scenze dell'epoca, spiegazioni sulla loro formazione e sulla genesi di stalattiti e stalagmiti.

Il primo trattato di speleologia è datato 1664: si tratta del volume "Mundus Subterraneus" del gesuita Athansius Kirchner, che in una mappa rappresenta le quattro bocche da cui, a quei tempi, scaturiva il Timavo. Agli inizi del '700 il botanico francese Joseph de Tournefort pubblicò una strana teoria sull'origine vegetale delle concrezioni, la cui pietrificazione avrebbe preso origine da semi.

Una figura molto importante nella nascita della speleologia scientifica nell'area del Carso è Janez Vaikard Valvasor, che nel 1687 inviò una nota alla Royal Society di Londra descrivendo l'idrogeologia del lago di Circonio (*Cerkniško jezero*) e dei territori circostanti. Anche l'opera più famosa di Valvasor, "La gloria del Ducato della Carniola" contiene le descrizioni delle grotte più famose del territorio carsico, quali quella di Postumia (Postojna) e quella San Canziano (*Skocjan*). Già da tempo si riteneva che le acque che entrano in queste grotte fossero le acque che fuoriuscivano da San Giovanni di Duino e che il loro percorso sotterraneo passasse alle spalle della città di Trieste.

La nascita della Speleologia nel territorio del Carso Classico è strettamente legata con alcuni aspetti della vita economica di Trieste. La concessione dello status di Porto Franco da parte dell'imperatore Carlo VI nel 1719, fu

il fattore che portò ad un sensibile aumento dei traffici navali e quindi all'importanza della città: si stima che nel 1780 per Trieste passasse un quarto di tutto il commercio dell'Impero austriaco. Nel giro di circa un secolo, a partire dalla metà del '700 la città subì importanti trasformazioni: il porto venne ampliato, vennero costruiti nuovi quartieri e soprattutto la popolazione crebbe in modo considerevole. Di conseguenza aumentò anche il fabbisogno idrico, specie durante i periodi estivi.

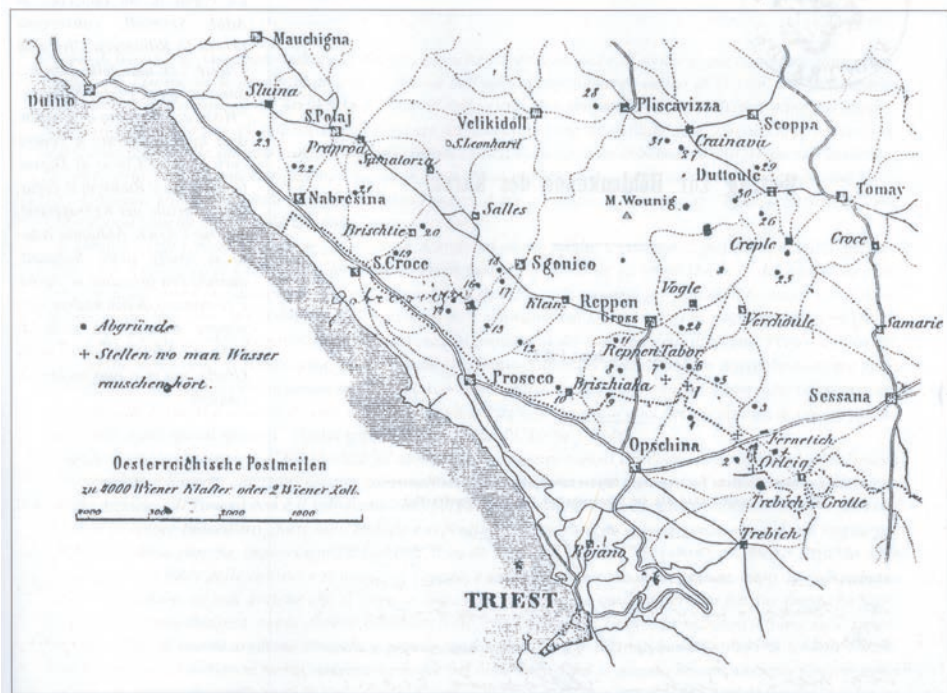
Già a metà del '700 venne costruito l'"acquedotto teresiano", che traeva acqua dai contrafforti in flysch nel rione di San Giovanni e che alimentava delle fontane poste in tre piazze della città. Durante tutto l'800 l'acquedotto teresiano venne man mano potenziato, scavando nuove gallerie, tanto che nel 1902 il tracciato di una galleria venne allungato fino a spingersi per più di 100 metri nel calcare, ma senza incontrare grandi venute d'acqua. La portata dell'acquedotto teresiano non fu però mai così elevata da risolvere definitivamente i problemi dell'approvvigionamento idrico della città e del porto.

La ricerca "speleologica" del corso sotterraneo del Timavo è legata proprio a queste problematiche. Il coinvolgimento del Comune di Trieste e di altri enti pubblici, l'interessamento di alcuni personaggi di spicco della città (Domenico Rossetti, ad esempio) a questo argomento sono ampiamen-

te documentati fin dai primi anni del '800. Nel 1828 venne nominata una "Commissione alle acque" incaricata di valutare le risorse idriche di tutto il territorio, comprese le sorgenti di Aurisina e le acque di San Canziano.

Negli anni successivi vennero eseguite livellazioni definendo quote e dislivelli tra San Canziano e la città per valutare la possibilità di scavare una galleria di 6000 *klafter* (poco più di 11 km) per convogliarvi le acque del Timavo superiore. Nel 1838 Anton Friedrich Lindner avviò una ricerca sistematica sui luoghi dove, durante le piene del Timavo, l'aria veniva espulsa violentemente dal risalire delle acque nella zona di oscillazione della falda sotterranea. Questi siti, successivamente cartografati da Anton Schmidl, venivano chiamati con il termine tedesco "luftloch" (letteralmente foro di areazione), che viene ancora usato dagli speleologi triestini.

L'obiettivo era individuare un punto intermedio lungo il corso sotterraneo del Timavo, da cui effettuare una diramazione in galleria verso la città. A Lindner vengono attribuite due importanti scoperte: la Grotta Gigante e l'Abisso di Trebiciano. Sulla esplorazione della prima cavità ad opera di Lindner non ci sono prove certe, sulle ricerche nell'Abisso di Trebiciano esiste un'ampia documentazione. L'esplorazione fu un'impresa eccezionale per quei tempi: durò 5 mesi di scavi con apertura di strettoie anche con l'utilizzo di mine. Il 5 aprile 1841 Luca Kral di Trebiciano e Antonio



Arich, minatore di Idria, scesero nella grande caverna, sul cui fondo scorreva, a 326 m di profondità, il Timavo: si aprì così la prima finestra sul suo corso sotterraneo. Durante una delle prime discese vennero trovati alcuni esemplari del coleottero *Pterostichus fasciatopunctatus*, segnalato nella valle del Timavo superiore. Fu una prova scientifica della connessione tra Timavo superiore e Timavo sotterraneo e uno dei primi esempi di tracciante biologico. Dopo pochi mesi la scoperta venne divulgata su una rivista edita a Vien-

Fig. 3.42 La mappa delle cavità conosciute e dei "luftloch" pubblicata nel 1851 da Adolf Schimdl (tratto da Galli, 2000).

na, a fine ottobre anche sul "Giornale dell'I.R. Istituto Lombardo di Scienze lettere ed Arti di Milano. L'anno successivo, nel 1842, Domenico Rossetti presenterà la scoperta a Padova, durante la Quarta Riunione degli Scienziati Italiani. La notizia fece il giro dell'Europa, tanto che fino all'inizio del XX secolo la grotta fu considerata la più profonda del mondo. Ma la scoperta non risolse i problemi

idrici della città, la quota (12 m s.l.m.) era troppo bassa. Venne finanziata la costruzione di scale fisse e per un anno si studiarono le caratteristiche delle acque e il livello del fiume per valutare fino a che quota potesse risalire l'acqua. Negli anni successivi la costruzione della "ferrovia meridionale" aggravò ulteriormente il problema dell'alimentazione idrica, il progetto di derivazione dalla cavità del Carso fu abbandonato e venne deciso di sfruttare le sorgenti di Aurisina. Nel 1883 venne fondata la "Commissione Grotte" della Società Alpina

delle Giulie, associazione alpinistica, ma zeppa di speleologi, legata all'Irredentismo. Negli stessi anni vennero fondati ed iniziarono ad operare sul territorio alla ricerca ed alla esplorazione di cavità, altri gruppi speleologici collegati a gruppi nazionali. Nel 1893 Eduard Alfred Martel visitò l'Abisso di Trebiciano e nell'articolo redatto nell'anno successivo citò anche la Grotta dei morti e la Grotta di Padriciano, da lui considerata la seconda grotta più profonda al mondo. La prima esplorazione ampiamente documentata della Grotta Gigante risale invece al 1895 e già nel 1908 venne inaugurata al pubblico divenendo "grotta turistica".

Agli inizi del '900 attraverso una serie di esperimenti con traccianti chimici, con coloranti e con la marcatura radioattiva delle acque, l'ing. Timeus dimostrò il collegamento idrico tra l'inghiottitoio di San Canziano, l'Abisso di Trebiciano e le Sorgenti di San Giovanni di Duino. Fu la conferma scientifica delle tante ipotesi e dei tentativi, spesso empirici, che si erano susseguiti per tre secoli, iniziando da quelli effettuati dal farmacista Ferrante Imperato alla fine del '500.

La fine della Prima Guerra Mondiale rappresentò un cambiamento epocale per la città di Trieste e, ovviamente, anche per gli studiosi del Carso: negli anni succes-

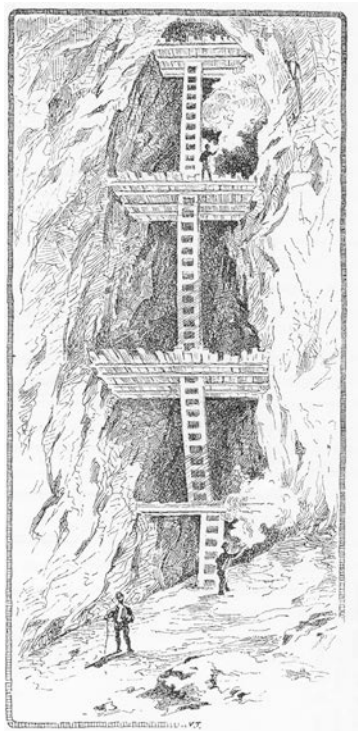


Fig. 3.43 Le scale fisse in legno nell'Abisso di Trebiciano (Caprin 1895 tratto da Galli, 2000).

sivi acquistarono sempre maggior importanza le figure di Luigi Bertarelli e di Eugenio Boegan che nel 1926 diedero alle stampe il volume "2000 Grotte", una sintesi delle conoscenze speleologiche di allora e soprattutto il primo tentativo di stilare un elenco completo delle cavità del Carso Classico.

Negli anni successivi Boegan approfondì e sintetizzò le conoscenze sul corso sotterraneo del Timavo e nel 1938, l'anno prima della sua morte, pubblicò "Il Timavo", volume che è rimasto per decenni uno dei migliori esempi di "studio sull'idrografia carsica subaerea e sotterranea", come recita il sottotitolo.

Il dopoguerra ha visto un incremento delle esplorazioni nel territorio delle province di Trieste e Gorizia volte ad ampliare le conoscenze speleologiche, ma soprattutto con l'obiettivo di scoprire altre cavità che raggiungessero il corso sotterraneo del Timavo. Negli anni '50 iniziarono, ad opera di Walter Maucci, insegnante di scienze in uno dei Licei cittadini, le prime esplorazioni speleosubacquee nei due sifoni dell'Abisso di Trebiciano. Negli anni '60 la collaborazione tra il mondo speleologico e l'Università ha stimolato anche un nuovo approccio alla ricerca scientifica, avvicinando gli speleologi a geologi, zoologi, archeologi.

Nel settembre del 1966 la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia promulgò una legge regionale che istituì il "Catasto regionale delle Grotte" ed

iniziò a finanziare iniziative di ricerca sui fenomeni carsici e di divulgazione dei risultati delle attività speleologiche. È stata la prima norma in Italia a riconoscere e istituzionalizzare l'importanza della Speleologia per le conoscenze dei territori carsici.

Solamente alla fine del secolo scorso, nel 1991, con l'indipendenza della Slovenia ed il suo ingresso in Europa nel 2006 si è potuto aprire un nuovo capitolo su degli studi sul bacino del Timavo, riprendendo le ricerche sull'andamento delle acque e sulla geologia di tutto il Carso Classico con accattivanti risultati.

Attualmente sono attivi sul territorio delle province di Trieste e Gorizia 14 gruppi speleologici, la maggior parte dei quali aderiscono alla Federazione Speleologica Regionale. Il numero complessivo di cavità nel Catasto Speleologico Regionale raggiunge quasi le 4000 unità.

Va infine ricordato che questo territorio non è solamente la culla della Speleologia scientifica, ma anche del Turismo speleologico. Il primo libro delle firme dei visitatori delle grotte di San Canziano risale al 1819, ma esiste un documento del 1633 che indica che il Conte Petazzi, proprietario del terreno in cui si apriva la Grotta di Corgnale (*Jama Vilenica*, presso *Lokev*) cedeva alla comunità locale parte dei proventi ricavati dalle visite della grotta stessa, che quindi si può vantare di essere la prima grotta turistica al mondo.

BIBLIOGRAFIA E ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO

CUCCHI F., RICCAMBONI R., BANDI E. (Ed.) (2012) *Acqua e vita nelle grotte della Val Rosandra*. 141 pp. LINDT (Trieste-Slovenia), ISBN 978-88-8190-281-1.

DE WAELE J., FORTI P., PICCINI L. (2009) *Speleogenesi in rocce carbonatiche*. Progetto Powerpoint 2009, Società Speleologica Italiana.

FORD D.C. & WILLIAMS P.W. (2007) *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley and Sons Ltd, 562 pp.

FORTI P. (2000) *I depositi chimici delle grotte*. Quad. Did. Soc. Speleol. Ital., 7, 36 pp.

GALLI M. (2000) *La ricerca del Timavo sotterraneo*. Museo Civico di Storia Naturale, 175 pp., Trieste.

JAKUCS, L. (1977) *Morphogenetics of karst regions: variants of karst evolution*. (Translated by B. Balkay). Bristol: Adam Hilger, 284 pp.

JENNINGS, J.A. (1985) *Karst geomorphology, second edition*. Oxford: Basil Blackwell, 293 pp.

PANIZZA M. (2014) *Geomorfologia*. Pitagora Ed. 408 pp.

PICCINI L. (1999) *Geomorfologia e speleogenesi carsica*. Quad. Did. Soc. Speleol. Ital., 1, 40 pp.

TRUDGILL S.T. (1986) *Solute processes*. Ed. Wiley and sons, 512pp.

WHITE W.B. (1988) *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford University Press, 464 pp.

4. IDROLOGIA

4.1 Concetti di idrogeologia generale

Nell'immaginario collettivo, l'idea di Carso viene associata a un'arida pietraia priva di acque superficiali e di vegetazione. Questa immagine talvolta è veritiera, e la presenza nei pressi di Duino di un'imponente sorgente di acque sotterranee rappresenta un contrasto così forte, rispetto all'ambiente circostante, che colpisce e ha colpito tutti i viaggiatori che nel presente e nel passato si sono trovati a transitare su questi territori. Ma in un'area così arida, da dove arriva tutta l'acqua che dà vita al breve corso del fiume Timavo? Per rispondere a questa domanda bisogna comprendere i meccanismi che regolano i fenomeni di ricarica e di deflusso dell'acquifero del Carso e di chiarire alcuni concetti alla base della circolazione delle acque sotterranee.

Innanzitutto cerchiamo di comprendere dov'è contenuta l'acqua nel sottosuolo e come essa circoli in profondità.

4.1.1 Porosità e permeabilità

Ogni roccia sia lapidea che sciolta è costituita non solo da materiale solido, ma anche da vuoti (pori, interstizi o meati). Il parametro che permette di quantificare quanto siano significativi i vuoti rispetto alla parte solida è la **porosità**, intesa come volume complessivo dei pori rispetto al volume totale della roccia ed espresso

in percentuale ($n=V_v/V_t$). La porosità può essere **primaria** quando i pori si generano contemporaneamente alla formazione della roccia, mentre si parla di porosità **secondaria** quando questa proprietà è la conseguenza di tutti i processi (tettonica, metamorfismo, azione degli agenti esogeni, ...) che possono intervenire dopo la litogenesi. La porosità secondaria dipende quindi dalla fessurazione, dalla fratturazione, dalla suddivisione della massa rocciosa e dalla dissoluzione chimica ed erosione meccanica che la roccia subisce.

La porosità consente ad ogni roccia di essere potenzialmente un serbatoio che può contenere l'acqua. Se il quantitativo di acqua che una roccia può contenere è legato alla porosità, la facilità con la quale l'acqua sotterranea può attraversare una roccia non è legato solo al valore di questo parametro, ma anche e soprattutto alla forma, alla dimensione e all'intercomunicabilità dei meati presenti nella roccia. Quindi non basta la porosità per comprendere la potenzialità di una roccia da un punto di vista idrogeologico, ma si deve introdurre il concetto di **permeabilità**. La permeabilità è la capacità di una roccia o di un terreno nel suo insieme di lasciarsi attraversare dall'acqua.

In prima battuta saremmo portati dunque a ritenere che all'aumento della porosità si osservi un conse-

guente aumento della permeabilità, ma ciò è vero solo in parte. Infatti quando i pori della roccia sono molto piccoli (al di sotto di $0,5 \mu\text{m}$) l'acqua presente nei meati è legata alla roccia da forze di attrazione molecolari ed è inamovibile. Fenomeni di adsorbimento legano le molecole dell'acqua ai singoli granuli della roccia (acqua igroscopica) e su quest'ultima si genera un'ulteriore pellicola trattenuta per fenomeni di adesione (acqua pellicolare). Con il termine di acqua di ritenzione della roccia si indica la somma del volume dell'acqua igroscopica e pellicolare.

È questo ad esempio il caso dell'argilla, sedimento con elevatissima porosità (40-50%), ma con bassissima permeabilità: tutta l'acqua presente

nei pori è acqua di ritenzione e quindi non libera di muoversi sotto effetto della forza di gravità, in questi casi infatti si parla di terreni impermeabili. Quando i pori invece hanno dimensioni maggiori l'acqua di ritenzione presente è solo una minima parte di quella contenuta nei meati (solo quella attorno a ciascun granulo della matrice) e tutto il resto è libero di muoversi (**acqua gravifica**). In ambito idrogeologico allora si è soliti suddividere la porosità totale di una roccia in 2 componenti: la ritenzione specifica (n_r) e la porosità utile o portata specifica (n_u) con porosità totale pari a $n_t = n_r + n_u$.

L'unità di misura della permeabilità è il m/s e convenzionalmente si considera impermeabile un terreno/roccia

Mezzo roccioso	Porosità totale [%]	Porosità utile [%]	Permeabilità [m/s]
Ghiaia	25÷45	10÷35	$10^{-3} \div 1$
Sabbia	20÷40	10÷35	$10^{-6} \div 10^{-2}$
Limo	30÷50	2÷30	$10^{-9} \div 10^{-5}$
Argilla	40÷50	0÷5	$10^{-13} \div 10^{-9}$
Calcare	0,5÷15	0÷10	$10^{-9} \div 10^{-2}$
Arenaria	5÷25	2÷15	$10^{-10} \div 10^{-6}$
Marna-Argillite	10÷50	0,2÷5	$10^{-13} \div 10^{-9}$

Tab. 4.1 Valori di porosità e permeabilità (modificato da Civita, 2005)

con un valore inferiore a 10^{-9} m/s e permeabili le unità con valori superiori a 10^{-4} m/s; i valori intermedi sono attribuiti alle formazioni semipermeabili.

4.1.2 Zonazione di un acquifero

Una volta che l'acqua si infiltra nel sottosuolo sfruttando i pori intercomunicanti, inizia il suo percorso in profondità fin tanto che non incontra un orizzonte impermeabile. In funzione del grado di saturazione e dei movimenti dell'acqua il sottosuolo può quindi essere suddiviso in 2 zone.

La prima, detta di **aerazione** o **insatura**, è caratterizzata da una circolazione prevalentemente verticale.

La seconda, dove tutti i vuoti sono saturi d'acqua, è detta zona **satura** e presenta una circolazione delle acque con percorsi prevalentemente suborizzontali verso le zone di sorgenza ("acqua di falda").

La zona di aerazione può a sua volta essere suddivisa in 3 subzone:

- La zona di *evapotraspirazione*, è quella più superficiale, nella quale l'acqua che si è infiltrata può tornare in atmosfera per processi di evaporazione e traspirazione delle piante. Si tratta di una zona variabile, che alle nostre latitudini presenta uno spessore di 1-3 metri.
- Più in profondità si trova la zona di *ritenzione* caratterizzata da deflussi perlopiù verticali verso il basso, che in funzione degli even-

ti infiltrativi presenta contemporaneamente pori saturi e aria.

- Subito prima di raggiungere la zona satura si può rilevare un settore caratterizzato dalla presenza della *frangia capillare*. Si tratta di acque che risalgono per fenomeni di capillarità dalla zona satura con spessori variabili da pochi centimetri a 3-4 metri in ragione inversa della dimensione dei pori.

4.1.3 Gli acquiferi

Il termine **acquifero** (*aquifer* in inglese) deriva dal latino aqua (acqua) e fero (portare) e sta ad indicare una formazione geologica permeabile sufficientemente estesa da consentire l'accumulo e il trasferimento di consistenti masse d'acqua. Come asserito da Freeze e Cherry (1979) però, *tra tutte le parole del lessico idrologico, probabilmente nessuna ha più sfumature del termine acquifero. La parola acquifero assume diversi significati a seconda delle persone che lo utilizzano e, forse, pure significati differenti per la stessa persona in tempi successivi. Ci si riferisce ad un acquifero per indicare singoli livelli geologici, intere formazioni e addirittura gruppi di formazioni. Il termine deve essere sempre visto in riferimento alla scala e al contesto di utilizzo. La migliore definizione di acquifero potrebbe essere la seguente: unità geologica permeabile e satura che può permettere il flusso di significative quantità di acqua se sottoposta a ragionevoli gradienti idraulici.*

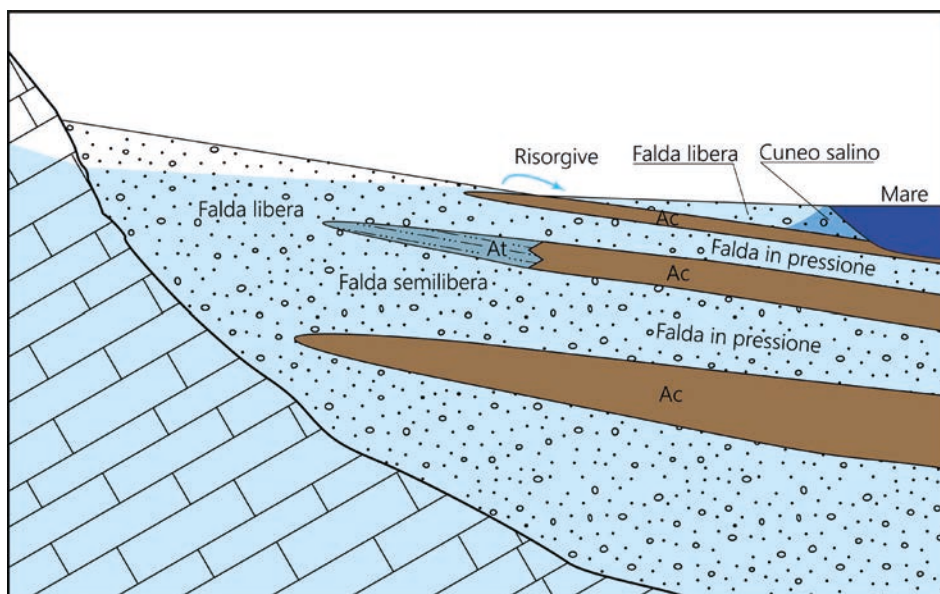
Di contro un'unità geologica satura a bassissima permeabilità che è incapace di lasciar fluire significative quantità di acqua anche se sottoposta a ragionevoli gradienti idraulici è detta **acquicludo** (*aquiclude* in inglese). Le unità geologiche con caratteristiche intermedie tra gli acquiferi e gli acquicludi vengono chiamate **acquitardi** (*aquitard* in inglese). Queste sono formazioni abbastanza permeabili da permettere un flusso d'acqua, ma non tale da consentire il loro sfruttamento.

Dalle caratteristiche dei meati nei quali fluisce l'acqua, gli acquiferi vengono suddivisi in porosi, quando

costituiti da materiale sciolto (ghiaie, sabbie, ...) e in *fessurati/carsici* se costituiti da ammassi rocciosi permeabili per fratturazione e/o carsismo. Inoltre in funzione dei rapporti geometrici tra acquicludi, acquitardi e acquiferi, si possono distinguere 3 diversi tipi di acquifero:

- gli **acquiferi confinati** o in pressione, cioè quelli che sono limitati al tetto (superiormente) e al letto (inferiormente) da acquicludi. L'acqua contenuta al loro interno si trova in pressione e il livello piezometrico è maggiore rispetto alla base del confinante superiore. Quando il livello piezometrico dell'acqua supera il piano cam-

Fig 4.1 Esempio di acquifero multifalda (disegno P. Turpaud).



pagna si parla di falda *artesian*a o *fluente*;

- gli **acquiferi liberi** o freatici sono quelli limitati solo inferiormente da un substrato a bassa permeabilità, mentre sono liberi di fluttuare nel corso dell'anno in funzione del regime pluviometrico e di alimentazione;
- gli **acquiferi semiconfinati** o semiliberi sono quelli che contengono una falda in pressione, ma limitati inferiormente e/o superiormente da un acquitardo oppure una falda libera limitata inferiormente da un acquitardo.

4.1.4 La circolazione idrica sotterranea

All'interno dell'acquifero le acque fluiscono con un moto prevalentemente suborizzontale dalle aree di ricarica verso la zona di emergenza (sorgenti). In generale negli acquiferi porosi si osserva un movimento di massa delle acque attraverso i pori che interessano a piccola scala in modo omogeneo tutto il sistema. Negli acquiferi fessurati e/o carsici invece, il flusso avviene attraverso percorsi obbligati legati all'orientazione e all'interconnessione delle discontinuità (fratture, faglie, giunti di strato...) presenti all'interno della massa rocciosa.

In ogni caso il moto e le modalità di emersione delle acque ipogee sono legate non solo alle caratteristiche dell'acquifero, ma anche al reciproco rapporto tra unità permeabili, imper-

meabili e all'eventuale presenza di limiti idrostrutturali.

In tal senso si definisce **limite di permeabilità** un piano o una zona di passaggio tra due complessi idrogeologici dei quali quello più permeabile giace su quello meno permeabile. La geometria del limite è congruente alla prevalente direzione di deflusso delle acque sotterranee.

Si parla invece di **soglia di permeabilità** quando il piano di passaggio tra i due complessi idrogeologici a diversa permeabilità è tale da opporsi alla prevalente direzione di flusso.

L'**area di alimentazione** consiste in quella porzione dell'idrostruttura dove si formano e si rinnovano le riserve idriche che alimentano la portata sorgiva.

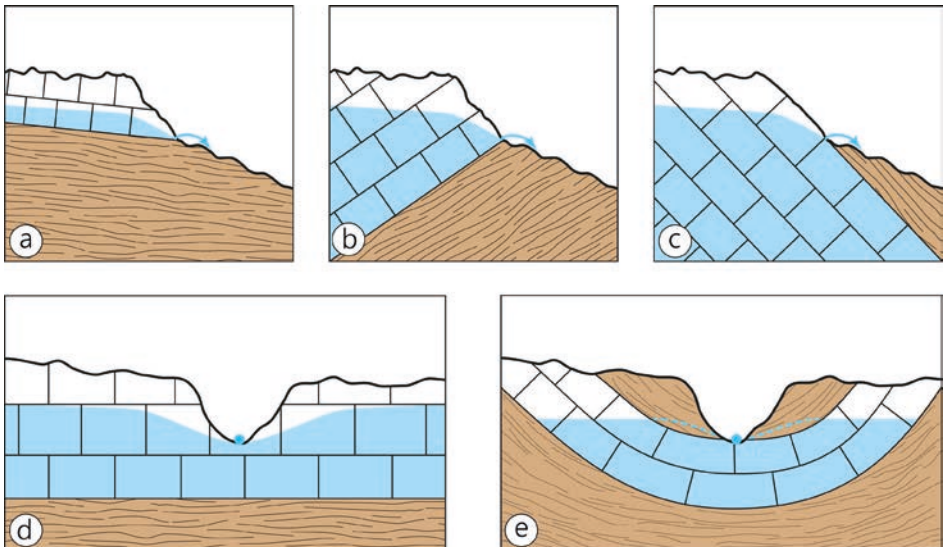
Sorgenti

Sorgente è un punto o un'area ristretta in corrispondenza dei quali le acque sotterranee vengono a giorno per cause naturali. In funzione del regime della portata si possono suddividere in sorgenti *perenni* (che non si estinguono mai) e *temporanee*. Sia le sorgenti perenni che quelle temporanee possono presentare notevoli variazioni della portata nel ciclo idrogeologico.

In funzione dei fattori idrogeologici prevalenti che guidano la venuta a giorno delle acque sotterranee, Civita (1973) ha suddiviso le sorgenti in 3 tipologie:

- Sorgenti per limite di permeabilità**, quando una sorgente si genera a causa della presenza di un limite di permeabilità. Se il limite è identificabile attraverso un netto contatto tra terreni differenti (stratigrafico, tettonico o di discordanza angolare), si parla di sorgenti per *limite di permeabilità definito*. Nel caso in cui, invece, all'interno di un complesso litologicamente omogeneo, si osservi una fascia che separa un'unità ad alta permeabilità sottostante su una a più bassa permeabilità, si parla di *limite indefinito*.
- Sorgenti per soglia di permeabilità**, quando l'acqua emerge in superficie per la presenza di uno sbarramento sotterraneo al flusso ipogeo. In funzione della geometria della soglia si potranno avere due sottoclassi: la soglia di *permeabilità sottoposta* quando l'unità impermeabile si trova al di sotto dell'acquifero e la soglia di *permeabilità sovrapposta* quando l'impermeabile si trova al di sopra dell'acquifero.

Fig 4.2 Sorgenti per limite (a), sorgenti per soglia sottoposta (b) sovrainposta (c), Sorgenti per affioramento di acquifero libero (d) e di acquifero in pressione (e) (disegno P. Turpaud).



- **Sorgenti per affioramento della piezometrica**, che si verificano per la presenza di una falda poco profonda rispetto al piano campagna e per la presenza di un'incisione/depressione topografica (solchi vallivi, esarazione glaciale, conche lacustri, ...) che interseca la superficie piezometrica. Se l'acquifero che alimenta la sorgente è libero, otterremo delle *sorgenti per affioramento di acquifero libero*, se invece l'acquifero è confinato, si genereranno delle *sorgenti per affioramento di acquifero in pressione*.

4.1.5 Idrogeologia degli acquiferi carsici

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti, l'acqua è il "motore" che genera e sviluppa il fenomeno carsico. La circolazione delle acque sotterranee in un ammasso roccioso, è condizionata dal numero, dall'orientazione e dall'interconnessione dei sistemi di discontinuità (giunti di strato, faglie, fratture,..) presenti. L'acqua di precipitazione si infiltra nella roccia, che di per sé è impermeabile, solo grazie alla presenza delle discontinuità. Nelle fasi iniziali della carsificazione, la circolazione avviene dapprima in modo diffuso sull'intero acquifero, interessando tutte le discontinuità presenti, ma subito dopo le acque tenderanno a fluire più facilmente dove la permeabilità è maggiore e cioè lungo quelle discontinuità che risultano più aperte e dove le perdite di

carico sono ridotte. Lungo questi percorsi preferenziali il processo carsico si evolve più velocemente: le discontinuità si allargano e viene favorita una circolazione con deflusso turbolento che porta ad avviare i processi erosivi oltre a quelli corrosivi. Si tratta di un processo autoalimentante che nel tempo porta a generare all'interno dell'ammasso roccioso un sistema estremamente eterogeneo con settori nei quali sono presenti discontinuità di ampio diametro e quindi ad elevatissima permeabilità chiamati *condotti* ed altri, chiamati *blocchi*, nei quali la permeabilità e la trasmissività sono decisamente inferiori. La genesi e lo sviluppo di questa rete di discontinuità eterogenea ed anisotropa è legata non solo all'orientazione e alla permeabilità delle singole discontinuità, ma anche alle modalità di ricarica dell'idrostruttura e ai reciproci rapporti tra unità permeabili ed impermeabili.

In funzione delle modalità di circolazione delle acque un acquifero carbonatico carsificato può essere suddiviso in 3 settori.

L'area di alimentazione e l'epicarso

Con il termine area di alimentazione si identifica l'intera superficie del sistema carsico che può ricevere apporti.

L'infiltrazione può essere *diffusa o primaria* (ricarica autogenica) quando è legata alle sole precipitazioni. La velocità e l'efficienza con la quale l'acqua è drenata in profondità dipende dalla

presenza, dallo spessore e dalla tipologia degli eventuali terreni eluvio-colluviali presenti in superficie, oltre che dalla permeabilità della porzione più superficiale della massa rocciosa. Quest'ultima fa parte di quello che viene chiamato epicarso, cioè quella porzione più superficiale della massa rocciosa (in genere, nel nostro Carso, 2-5m), che per decompressione e azione degli agenti esogeni presenta una permeabilità maggiore rispetto alla sottostante massa rocciosa. Grazie a queste caratteristiche l'epicarso permette una rapida infiltrazione delle acque superficiali che poi, con un certo ritardo, vengono trasferite alla zona vadosa (non satura).

L'acquifero può essere alimentato anche da acque di ruscellamento superficiale provenienti da terreni non carsici che attraverso uno o più inghiottitoi (anche in subalvea) vengono drenate dall'idrostruttura carsica. Si parla in questo caso di infiltrazione *concentrata* o *secondaria* (ricarica allogenica).

La zona vadosa

Una volta nel sottosuolo le acque fluiscono perlopiù con percorsi verticali lungo pozzi e meandri all'interno della zona vadosa. Con la profondità il reticolo carsico è sempre più gerarchizzato e le acque tendono ad accumularsi in una serie di collettori che possono presentare anche flussi perenni e tendono ad essere sempre più suborizzontali, finché si raggiunge la zona satura.

La zona satura

Nella zona satura (detta anche zona freatica) il flusso avviene in condotti e gallerie suborizzontali di dimensione variabile in funzione delle portate e con presenza anche di tratti sifonanti. La geometria delle gallerie e dei condotti è strettamente collegata all'orientazione delle famiglie di discontinuità e si sviluppa anche per decine di metri sotto la superficie piezometrica. L'estensione orizzontale e verticale del reticolo sommerso è legata alla posizione delle sorgenti ed alla profondità degli acquicludi/acquitardi oltre che al carico idrostatico.

La zona satura è di solito caratterizzata da notevoli variazioni del livello idrico in quanto gli apparati sorgentiferi non sempre riescono a drenare tutto il quantitativo di acque che si infiltrano durante le precipitazioni intense. Il livello piezometrico si innalza repentinamente anche di decine di metri invadendo tratti della zona vadosa che solitamente non sono interessati dalla circolazione idrica. L'aria contenuta in questi tratti di pozzi e meandri viene spinta fuori dalle acque in risalita creando delle correnti d'aria talvolta molto intense e rilevabili sia dentro il reticolo carsico che in superficie. Per inciso, questi flussi, carichi di umidità, contribuiscono all'allargamento delle discontinuità interessate.

L'area compresa tra il livello idrico minimo e quello massimo è chiamata zona epifreatica o zona di oscillazione, ed è estremamente importante nello sviluppo del processo carsico.

Fig 4.3 Schematizzazione di un sistema carsico con circolazione a dreno dominante (modificato da Vigna, 2009).

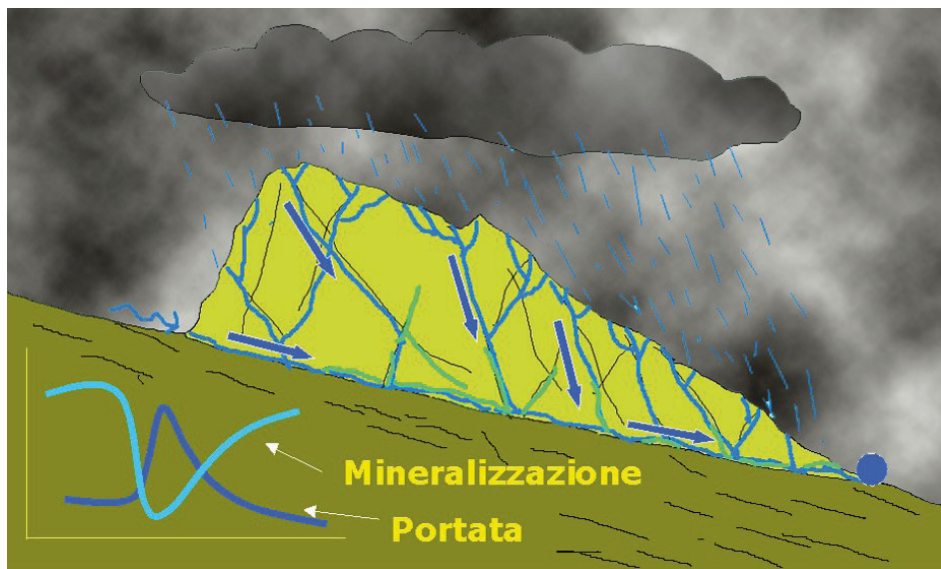
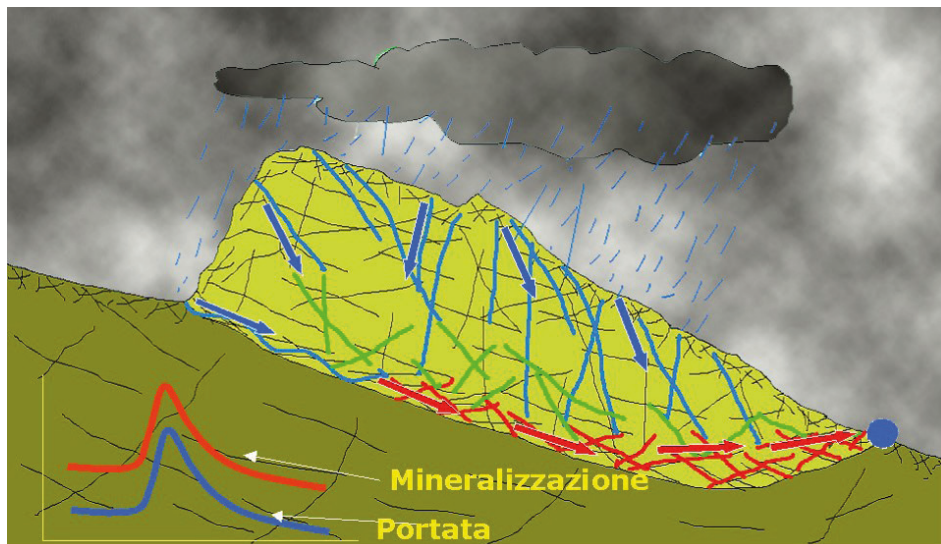


Fig 4.4 Schematizzazione di un sistema carsico con circolazione a dreni interdipendenti (modificato da Vigna 2009).



In questa zona infatti si verificano miscele di acque differenti (di neoinfiltrazione e di riserva) che ne aumentano l'aggressività e gli elevati gradienti favoriscono i processi erosivi. È questo forse il settore più dinamico di tutto l'acquifero, dove si generano condotti e gallerie con dimensioni anche di decine di metri di diametro.

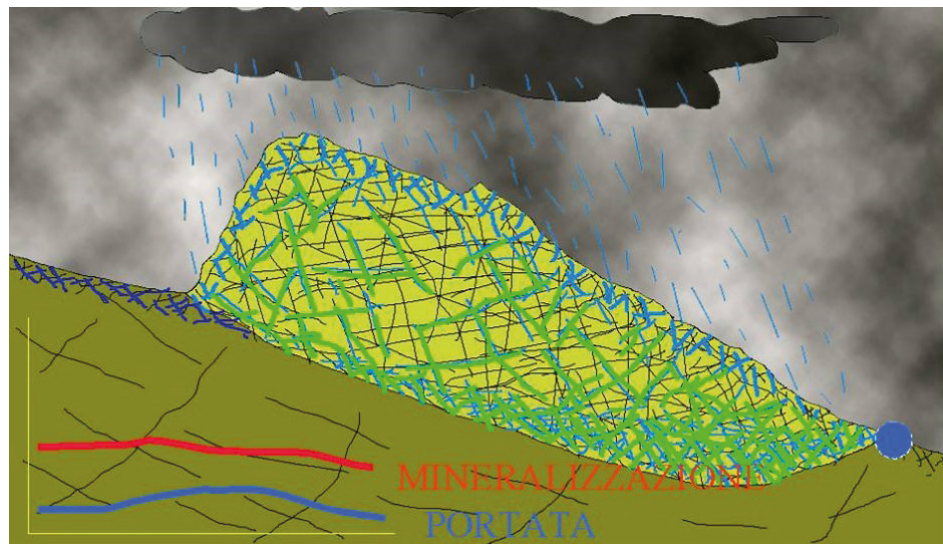
Attraverso questi condotti e gallerie le acque fluiscono verso le aree sorgentifere. Queste si originano nelle aree topograficamente più basse dell'idrostruttura carsica, e la loro genesi è condizionata dall'assetto geologico e strutturale del sistema, che dà luogo, ad esempio, a soglie o limiti di permeabilità. In prossimità di sor-

genti permanenti (più raramente di sorgenti temporanee) si possono osservare delle sorgenti di troppopieno che si attivano solo quando il livello piezometrico si innalza e le emergenze di base non sono in grado di smaltire tutta l'acqua che si infila nell'acquifero.

4.1.6 La classificazione dei sistemi carsici

In un sistema carsico la velocità di deflusso e le variazioni dei parametri chimico-fisici delle acque, sono legate alle caratteristiche fisiche e geometriche del serbatoio che le contiene e allo sviluppo del processo carsico. A questo proposito, lo studio del regime delle portate, congiunta-

Fig 4.5 Schematizzazione di un sistema carsico a circolazione dispersiva (modificato da Vigna 2009).



mente al monitoraggio delle variazioni dei parametri chimico fisici delle acque in una sorgente o in genere in un "punto acqua", permette di comprendere quale sia l'architettura del reticolo carsico e di individuare se questa è caratterizzata dalla presenza di ampi collettori o di una rete di discontinuità poco carsificate. Seguendo la schematizzazione proposta da Vigna (2001) i sistemi carsici possono essere schematizzati in tre modelli concettuali.

Sistemi con circolazione a dreno dominante

Sono caratteristici di acquiferi che si sono sviluppati in ammassi rocciosi massicci, poco suddivisi e intensamente carsificati. In tali sistemi si sviluppa un reticolo carsico ben gerarchizzato con una rete di drenaggio impostata su ampi collettori spesso ubicati in prossimità del substrato impermeabile. Non si può parlare di una vera e propria zona satura, ma nei settori profondi del reticolo sono presenti anche tratti sifonanti completamente allagati che rappresentano la via di drenaggio preferenziale delle acque verso le sorgenti. L'elevata permeabilità della rete di collettori che caratterizza questo sistema permette un rapido deflusso delle acque in occasione degli eventi infiltrativi. Alle sorgenti si osservano dei repentini incrementi della portata (anche di 3 ordini di grandezza rispetto alla portata ordinaria) e un brusco calo della mineralizzazione delle acque per

l'arrivo all'emergenza delle acque di neoinfiltrazione, che per i brevi tempi di residenza nell'acquifero sono poco conduttive. Queste acque fluiscono all'interno dell'acquifero in tempi molto rapidi e tendono a sostituire quelle già presenti nell'idrostruttura.

Sistemi con circolazione a dreni interdipendenti

Si tratta di un sistema che si sviluppa in ammassi rocciosi ben suddivisi e localmente piuttosto carsificati. La zona satura è molto estesa e caratterizzata dalla presenza di diversi condotti e fratture variamente carsificate collegate tra loro. Come nel caso precedente, in occasione delle piene alle sorgenti si osservano importanti incrementi della portata, anche se con variazioni più contenute e una risposta più ritardata rispetto ai sistemi a dreno dominante. Essendo un sistema caratterizzato da notevoli riserve, la curva di decremento (curva di svuotamento) della portata può rimanere su valori elevati per lunghi periodi. Le acque di neoinfiltrazione che entrano nel sistema, rimobilizzano le acque presenti nei settori meno permeabili del reticolo e alle sorgenti si osserva il tipico effetto di pistonaggio, con incremento della mineralizzazione.

Sistemi a circolazione dispersiva

Sono peculiari di ammassi rocciosi carbonatici caratterizzati da un'intensa fratturazione e una carsificazione diffusa tanto da assimilare la circola-

zione a quella di un acquifero poroso. La circolazione delle acque è lenta e diffusa nel reticolo di discontinuità e non esistono dei collettori principali. Alle sorgenti non si osservano degli incrementi di portata legati ai singoli eventi infiltrativi, ma piuttosto delle variazioni a lungo periodo legate alla stagionalità. Data la circolazione lenta, la mineralizzazione è mediamente elevata e relativamente costante nel tempo (fenomeno di omogeneizzazione), così come i valori della temperatura.

Il riconoscimento di uno dei 3 modelli proposti da Vigna (2001) permette di determinare l'entità del processo carsico e quindi di poter descrivere le modalità di circolazione delle acque sotterranee. Si deve comunque tenere in considerazione che la circolazione nei massicci carbonatici è spesso complessa, e ci si può trovare in condizioni intermedie tra i vari modelli. Tuttavia, il riconoscimento dei fenomeni idrologici precedentemente descritti (di sostituzione prevalente, di pistonaggio e di omogeneizzazione), rappresenta una chiave di lettura fondamentale nella comprensione della circolazione ipogea e nella valutazione della carsificazione dei sistemi carsici, siano essi abbastanza ben conosciuti, siano essi compiutamente non ancora esplorati dagli speleologi.

4.2 L'acquifero del Carso Classico

L'acquifero del Carso Classico si estende per oltre 750 km² dal fiume Isonzo, al mare Adriatico e fino quasi all'abitato di Postumia.

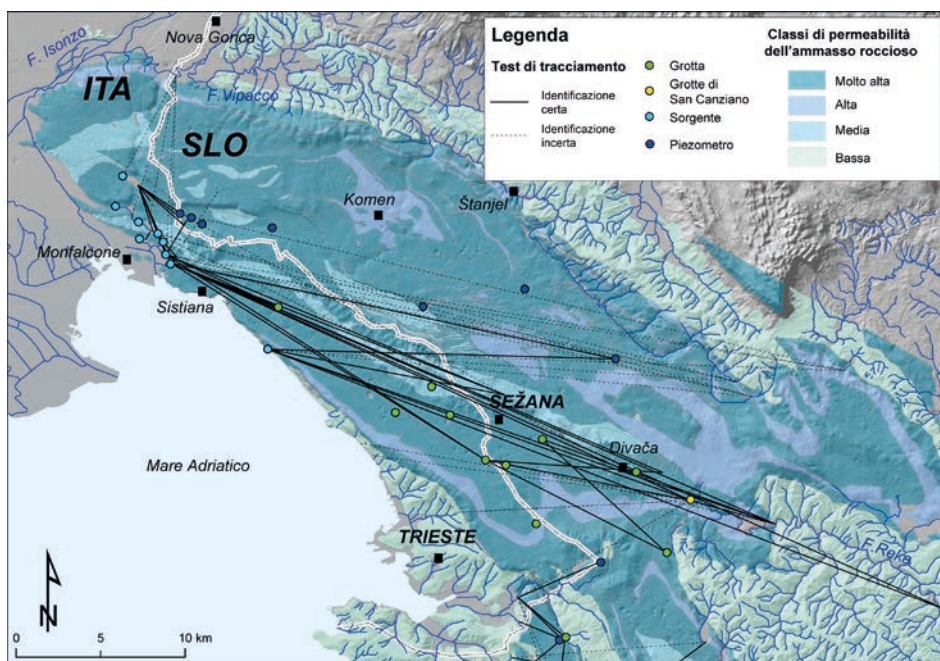
Dal punto di vista idrogeologico è caratterizzato dalla presenza di due unità idrogeologiche ben distinte: le rocce carbonatiche cretacic-terziarie, estremamente carsificate e ad elevata permeabilità per fessurazione e carsismo, e le arenarie e marne del flysch eocenico, caratterizzato complessivamente da una bassa permeabilità. Il forte contrasto di permeabilità tra queste due unità congiuntamente ai gradienti idraulici che si generano in seno al Carso giocano un ruolo importante nelle modalità di ricarica, di deflusso e di emersione delle acque del sistema. La presenza delle unità arenaceo marnose nei settori settentrionali e meridionali dell'anticlinorio infatti, costituisce due barriere idrogeologiche laterali che guidano lo sviluppo del carsismo e il deflusso delle acque sotterranee. Solo dove lo sbarramento fornito dal flysch si trova al di sotto del livello del mare le acque possono fuoriuscire dall'idrostruttura e dar vita alle sorgenti. E' ciò che si verifica in tutto il settore compreso tra Aurisina e Monfalcone, dove si possono rilevare decine di sorgenti con portate da pochi litri al minuto a migliaia di metri cubi al secondo.

4.2.1 La ricarica dell'acquifero

L'acquifero è alimentato principalmente da tre distinti contributi: l'infiltrazione efficace, le acque dei fiumi Reka e Raša e i travasi dalla falda isontina.

Data l'estensione dell'altopiano carsico e le cospicue precipitazioni che insistono su questa regione, l'infiltrazione efficace rappresenta il principale contributo all'alimentazione dell'acquifero del Carso Classico. Il Carso, infatti, si trova in un'area di transizione tra il clima mediterraneo e quello continentale, e la piovosità media

varia da circa 1000 mm/anno lungo la costa ai 1800 mm/anno all'interno, con un tasso di evapotraspirazione medio che varia da 450 a 750 mm/anno. Grazie all'intensa e diffusa carsificazione della massa rocciosa, alla scarsa copertura vegetale e all'assenza di suoli potenti non si genera un reticolo di deflusso superficiale, ma le acque piovane si infiltrano rapidamente e vanno ad alimentare la falda di fondo. Civita et al. (1995) hanno stimato che l'infiltrazione efficace contribuisca all'alimentazione dell'acquifero con un valore medio di 20.6 m³/s.



Il secondo contributo si riscontra nel settore nord occidentale dell'idrostruttura del Carso tra gli abitati di Merna e Sagrado dove le acque dei fiumi Isonzo e Vipacco e della falda da loro alimentata, sono a diretto contatto con i calcari. In quest'area sono presenti una serie di inghiottitoi superficiali e sotterranei che consentono il travaso delle acque superficiali e di falda verso l'acquifero carsico. Le acque si infiltrano in più punti e in questo modo hanno creato un articolato reticolo ipogeo caratterizzato da numerosi condotti interdipendenti gli uni dagli altri. Lungo il percorso verso le sorgenti, questi condotti sono alimentati anche dalle acque di precipitazione attraverso il diffuso sistema di cavità e fratture a minore conducibilità idraulica presenti nell'area del Carso goriziano.

Il contributo delle acque isontine non è costante durante tutto l'anno, ma dipende dal regime idrogeologico. Quando il Carso è interessato da intense precipitazioni le acque di infiltrazione carsica fanno innalzare velocemente la falda carsica e il conseguente carico idraulico che si genera impedisce alle acque dell'Isonzo e del Vipacco di fluire all'interno dell'idrostruttura. Talvolta succede addirittura che in alcuni settori si invertano le direzioni di drenaggio. Nei periodi di magra invece il contributo della falda

isontina è prevalente e il suo influsso si osserva in tutto l'apparato sorgentifero, dalle Mucille fino al Timavo stesso. Mediamente è stata stimata un'alimentazione da parte delle acque isontine di circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il terzo contributo all'alimentazione all'acquifero è dovuto ai fiumi Raša e Notranjska Reka (Timavo Superiore). Questi corsi d'acqua scorrono in superficie fin tanto che transitano sui flysch, ma quando raggiungono i calcari una serie di inghiottitoi ne drenano le acque in profondità. Le portate del Raša sono relativamente modeste ed anche per lunghi periodi l'alveo rimane in secca, mentre quelle del Reka sono decisamente importanti e rappresentano mediamente più di un quarto della ricarica dell'intero acquifero carsico. Il contributo del Reka (Timavo Superiore) è stimato in $8.26 \text{ m}^3/\text{s}$, ed è estremamente variabile con portate molto esigue e quasi ininfluenti in magra, ma particolarmente intense durante le piene.

4.2.2 Il Reka-Timavo

Il fiume *Notranjska Reka*, chiamato Timavo Superiore in italiano, nasce alle pendici del monte Dletvo al confine tra Slovenia e Croazia, e drena un bacino di oltre 400 km^2 su cui insiste una piovosità media compresa tra i 2000 e i 2600 mm/anno. Il corso d'acqua scorre per oltre 50 km su terreni in facies di flysch finché passa sui calcari circa 7 km a monte delle grotte di San Canziano. In questo tratto del

fiume il processo carsico è attivo e il Reka perde parte delle acque che si infiltrano in subalveo. Talvolta si aprono dei veri e propri inghiottitoi profondi anche diversi metri che catturano tutte o parte delle acque. Questi sinkholes, che nel passato venivano immediatamente “tappati” artificialmente per non interrompere l'attività dei mulini, oggi vengono riempiti in modo naturale dal fiume stesso con le sue alluvioni durante le piene successive. Tali inghiottitoi, anche se riempiti, però continuano a funzionare e a drenare in profondità le acque

del fiume. È ciò che accade nei pressi di Gornje Vreme dove l'inghiottitoio apertosi improvvisamente nel 1981 e riempito poche settimane dopo, continua a svolgere il suo compito tanto che durante i periodi siccitosi ancor oggi riesce a drenare tutte le acque del Reka, lasciando l'alveo a valle totalmente secco.

Quando la portata è superiore a circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ l'inghiottitoio di Vreme non riesce a catturare tutte le acque del fiume e si ha un flusso continuo fino ad arrivare all'inghiottitoio delle grotte di San Canziano (*Škocjanske jame*).



Il *Notranjska Reka* entra nelle grotte di San Canziano, lunghe complessivamente più di 6 chilometri, alla quota di 317 m s.l.m., attraversa alcune doline di crollo molto profonde (la Mala dolina ha 120 metri di profondità e la Velika dolina ne ha più di 165) e dopo aver percorso i circa 3,5 chilometri di una gigantesca forra larga da 10 a 60 m e alta oltre 100 con una trentina di cascate/rapide, scompare nel sifone del Lago Morto a 212 m s.l.m.

Il *Notranjska Reka* ha una portata estremamente variabile, compresa tra gli oltre 380 m³/s in piena e i 0.18 m³/s in magra. Le portate possono essere così elevate che talvolta il sifone terminale non riesce a drenare tutte le acque del fiume, e la grotta e parte della dolina maggiore vengono riempite dall'acqua.

Fig 4.7 L'idrostruttura del Carso Classico con i principali punti d'acqua: SKO Grotte di San Canziano (Škocjanske jame), KAC Abisso dei Serpenti (Kačna jama), KAN Grotta di Kanjaducah (Jama 1 v Kanjaducah), SKI Grotta Claudio Skilan, STR Brezno v Stršinkni dolini - Jama Sežanske Reke, TRE Abisso di Trebiciano (Labodnica Jama), LAJ Grotta Lazzaro Jerko, GRG Grotta Gigante, RUP Abisso di Rupingrande, OPI piezometro di Opicina, MAS Abisso Massimo, LIN Grotta Lindner, AUR sorgenti di Aurisina, TIM Sorgenti del Timavo, LIS sorgenti del Lisert, SAB lago di Sablici, PET lago di Pietrarossa e DOB lago di Doberdò. Le frecce blu identificano i diversi contributi all'alimentazione dell'acquifero e la freccia rossa la portata media degli apparati sorgentiferi (modificato da Zini et al., 2022).

Dall'inghiottitoio di San Canziano si dipartono alcuni ampi condotti a drenano dominante che, con tratti a pelo libero, segmenti sifonanti e condotte al di sotto del livello del mare, collegano efficientemente la grotta con gli apparati sorgentiferi di Aurisina, del Timavo e del Sardos. Solo altre 5 cavità permettono di osservare direttamente questi collettori del reticolo ipogeo del Reka-Timavo: il complesso ipogeo dell'Abisso delle tre generazioni - Abisso dei Serpenti (*B3C Brezno treh generacij - Kačna jama*), la Grotta di Kanjaducah (*Jama 1 v Kanjaducah*), l'Abisso presso la dolina Stršinkna (*Stršinkna Dolina-Jama Sesanke Reke*), l'Abisso di Trebiciano (*Jama Labodnica*) e la Grotta meravigliosa di Lazzaro Jerko.

L'**Abisso dei Serpenti** (*Kačna jama*) è un grandioso complesso ipogeo che si sviluppa nei calcari cretaci a circa un km ad ovest dell'abitato di Divača. L'abisso si apre a quota 435 metri s.l.m. e si presenta con un pozzo di accesso profondo 186 metri che conduce ad un sistema più vasto di gallerie distribuite su due livelli.

Il livello superiore è idrogeologicamente inattivo ma riccamente concrezionato; in questo tratto le gallerie finora esplorate si sviluppano per circa 1,5 km ad una quota di circa 250 metri s.l.m. Il livello inferiore, a cui si accede dal livello superiore attraverso una serie di pozzi e gallerie, si sviluppa sub-orizzontalmente e consiste in un articolato sistema di condotte dove, in condizioni sia di magra che

di morbida, scorre a pelo libero il Reka-Timavo fino ad un sifone posto alla quota di 156 m s.l.m. Durante le piene più significative, il livello delle acque può risalire di oltre 100 metri ed allagare anche il livello superiore di gallerie.

Nel 2010 è stato scoperto l'**Abisso delle tre generazioni** (*Brezno treh generacij*) che si collega con il lago Phare situato all'estremità sud-orientale delle gallerie nuove dell'Abisso dei Serpenti formando così un sistema ipogeo di oltre 20 km di sviluppo. Il suo nome lo deve al fatto che nei lavori di disostruzione della cavità sono state ritrovate tracce di vecchie opere di scavo probabilmente realizzate alla fine dell'Ottocento.

Cinque km a valle dell'Abisso dei Serpenti si trova la **Grotta di Kanjaducah** o **Grotta di Kanjaduce** (*Jama 7 v Kanjaducah*). Si tratta di una cavità profonda 330 metri con uno sviluppo di 1,5 km. Sul fondo alla quota di circa 20 metri s.l.m. è presente un ampio condotto epifreatico di notevoli dimensioni (600 m di lunghezza per 50 di larghezza e 60 d'altezza) in cui scorrono le acque del Reka-Timavo. Dopo ulteriori 2,6 km si raggiunge il sistema ipogeo **Jama Sežanske Reke - Brezno v Stršinkni dolini** sul fondo del quale le acque del Reka-Timavo scorrono a circa 15 m s.l.m. La grotta ha due entrate distinte: la prima *Jama Sežanske Reke* si apre a 354 m s.l.m. e conduce al sifone d'entrata, mentre la seconda, *Brezno v Stršinkni dolini* (344 m s.l.m.), permette di rag-

giungere il sifone d'uscita. Da questa grotta attraverso una serie di sifoni in buona parte ancora sconosciuti si raggiunge l'**Abisso di Trebiciano** (*Labadnica Jama*). Questa è la grotta più nota tra quelle presenti sul Carso ed ha avuto un ruolo molto importante nelle indagini sull'idrogeologia carsica, essendo divenuta un importante laboratorio scientifico sotterraneo già nel secolo scorso.

La cavità ha uno sviluppo planimetrico complessivo di oltre 2400 m, una profondità di 370 m e consta di una ventina di pozzi, profondi dai 2 ai 50 m, attraverso i quali si accede alla Caverna Lindner e a numerose diramazioni secondarie. L'ampio vano finale, lungo il quale scorre un ramo del Timavo, è per la gran parte riempito da depositi alluvionali e di crollo. Recenti esplorazioni speleosubacquee hanno accertato la presenza di ampi vani allagati che raggiungono i 40 m in profondità e diverse centinaia di metri in lunghezza.

L'ultima cavità che intercetta il corso del Timavo è la **Grotta Meravigliosa di Lazzaro Jerko**, che si apre a Zolla di Monrupino alla quota di 302 m s.l.m. e a 3.5 km a nord dell'Abisso di Trebiciano. L'esplorazione, iniziata nel 1987, ha comportato notevoli fatiche e difficili lavori di scavo che sono stati condotti dagli speleologi della Commissione Grotte "E. Boegan". Questi lavori sono stati abbandonati e ripresi più volte fino a concludersi nel 1999



Fig. 4.8 Il Reka-Timavo sul fondo dell'Abisso di Trebiciano (foto A. Maizan).

con il raggiungimento del Timavo. La cavità è ad andamento prevalentemente verticale, con numerosi pozzi che conducono a due ampie caverne, sul cui fondo ad una quota di circa 4 metri s.l.m. scorre l'acqua.

La connessione tra tutte queste grotte è stata confermata da una serie di marcature delle acque effettuate in diversi momenti e con diversi traccianti. Più recentemente, attraverso il monitoraggio in continuo dei parametri chimico fisici delle acque si sono definiti con maggior dettaglio

i tempi e le modalità di connessione. La Lazzaro Jerko è l'ultima cavità nella quale si possa osservare direttamente il Timavo, e dall'area di Monrupino non si rilevano più neanche i "buchi soffianti" (si veda cap. 3.2.3). Tutto ciò è dovuto probabilmente al fatto che le principali vie di drenaggio del sistema ipogeo del Timavo si trovano al di sotto dell'attuale livello del mare e in condizioni di pieno carico. Durante i periodi di piena però, e in concomitanza con l'aumento delle portate all'inghiottitoio di San Canziano, il

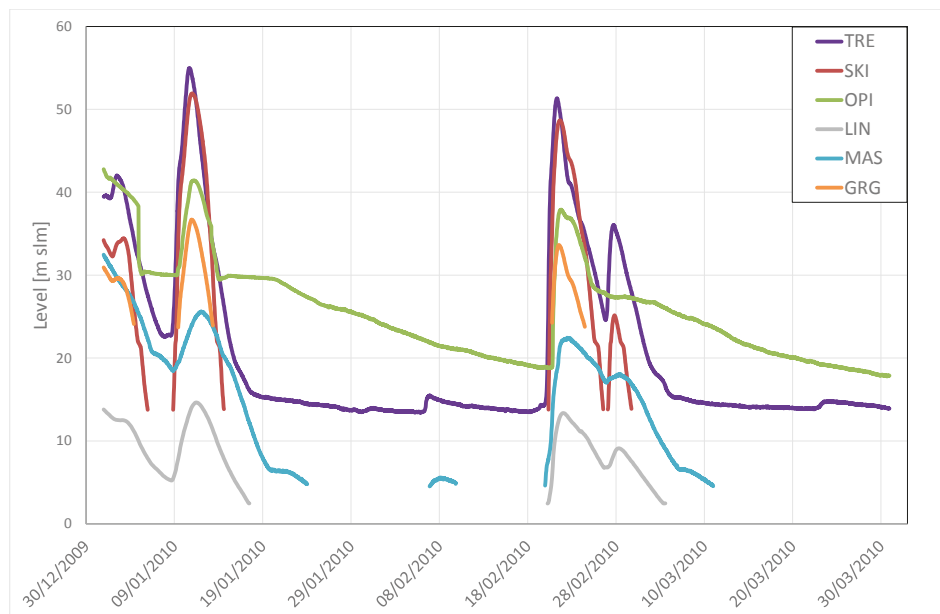
livello della falda si può innalzare di decine di metri (fino ad oltre 100 m) e le acque di falda allagano i vani terminali di alcune delle cavità più profonde del Carso (grotte Skilan, Abisso di Rupingrande, Abisso Massimo, Lindner, Dolenc Jama, Drca Jama).

4.2.3 Le sorgenti

Lungo la linea di costa da Aurisina fino all'abitato di Monfalcone, dove il contatto calcari / flysch si trova a quote topograficamente poco elevate e spesso sotto il livello del mare, si osserva la presenza di numerose sorgenti che drenano le acque dell'acquifero del Carso Classico. Partendo da sud est, la prima fascia sorgentizia che si rileva è rappresentata dalle Sorgenti

di Aurisina. Si tratta di 9 emergenze che si sviluppano su un fronte di circa 350 m, poste in prossimità del contatto calcari / flysch che in quest'area si trova in corrispondenza della spiaggia. Le acque oggi vengono raccolte in una trincea di drenaggio artificiale, posta parallelamente alla linea di costa, che dal 1857 al 1971 serviva per l'approvvigionamento idrico della città di Trieste.

Fig. 4.9 Monitoraggio in continuo del livello in alcune cavità del Carso Italiano: TRE Abisso di Trebiciano, SKI Grotta Skilan, OPI piezometro di Opicina, GRG Grotta Gigante, MAS Abisso Massimo e LIN Grotta Lindner (modificato da Zini et al., 2022).



Da Aurisina Mare fino al Villaggio del Pescatore sono rilevabili altre numerose fuoriuscite, spesso al di sotto del livello del mare e non sempre permanenti, con una portata complessiva media stimata di 0.5-1 m³/s e un deflusso estremamente variabile in funzione del regime. La principale di queste sorgenti è posta ad Ovest della Baia di Sistiana.

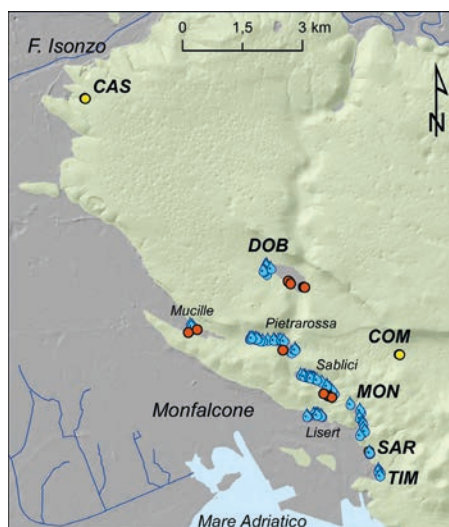
Nell'area più occidentale tra Doberdò e Monfalcone si osserva un articolato sistema di sorgenti, laghi carsici ed inghiottitoi, che danno vita a un sistema idrogeologico e un ecosistema unici. Per queste peculiarità l'area fa parte del sito Rete Natura 2000 IT3341002 - Aree Carsiche della Venezia Giulia e della Riserva Naturale Regionale dei laghi di Doberdò e Pietrarossa.

Il lago di Doberdò rappresenta la più settentrionale di questa serie di laghi carsici che comprende anche quelli delle Mucille, di Pietrarossa e di Sablici. Queste depressioni, il cui fondo si trova a quote comprese tra 1 e 5 m s.l.m., permettono di portare alla luce le acque della falda carsica. Sia nel lago di Doberdò che alle Mucille sono presenti delle aree sorgentifere permanenti e degli inghiottitoi che regolano il regime delle acque. Durante i periodi di piena la portata delle sorgenti cresce velocemente e gli inghiottitoi non riescono a drenare tutta l'acqua che si riversa nei laghi, facendo impennare in poche ore il livello. Nel lago di Doberdò questo è

posto solitamente a una quota di 4.8 m s.l.m., ma durante le piene si raggiungono di norma gli 8 m s.l.m. e nelle piene eccezionali gli 11 m s.l.m. Alle Mucille il livello medio è alla quota di 4.6 m s.l.m. e si innalza a circa 6 m s.l.m. nelle piene ordinarie, ma eccezionalmente può anche superare gli 8 m s.l.m.

I laghi di Pietrarossa e di Sablici vengono alimentati da due fronti sorgivi rispettivamente di una quindicina e di una ventina di punti con portate che variano da pochi litri al minuto a diverse decine di litri al secondo. Complessivamente si rileva una portata complessiva media di 1.2 m³/s.

Fig. 4.10 Sorgenti e punti acqua del settore occidentale del Carso Classico. (Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UNITS)



Il comportamento idrogeologico di questi laghi era del tutto simile a quello di Doberdò fino agli anni '60. Successivamente, una serie di interventi di bonifica e la realizzazione di due canali di drenaggio che hanno tagliato le soglie naturali presenti tra i laghi di Pietrarossa e Sablici e tra quest'ultimo e il canale di Moschenizza, hanno modificato radicalmente l'idrodinamica di quest'area. Questi interventi hanno comportato infatti un cambiamento nel regime idrologico provocando un generale abbassamento del livello piezometrico nei laghi, che si ripercuote su tutta l'area fino al lago di Doberdò. Quest'ultimo è forse il sistema che maggiormente risente di questi cambiamenti. Fino alla prima metà del '900 infatti, il lago di Doberdò si presentava allagato per buona parte dell'anno, ma adesso anche per lunghi periodi è presente solo un ristretto corso d'acqua che collega l'area sorgentifera occidentale con gli inghiottitoi orientali. La carenza d'acqua ha favorito l'incremento della produzione vegetale e dell'accumulo della biomassa che pian piano sta portando a un progressivo interramento di tutta l'area, mettendo a rischio l'intero ecosistema.

La rete di drenaggio di questo territorio è comunque complessa ed articolata con numerose vie di drenaggio, che portano le acque dei laghi, e non solo, ad alimentare un sistema sorgentifero di cui fanno parte le sorgenti delle rogge di Monfalcone, con una portata media di 0.2

m^3/s , le sorgenti del Lisert che drenano parte delle acque del lago di Sablici, con una portata di $1 \text{ m}^3/\text{s}$ e le sorgenti del Vallone di Moschenizza, 8 punti di fuoriuscita delle acque per una portata complessiva media di $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

A San Giovanni di Duino si incontrano le sorgenti del Timavo, che rappresentano la principale emergenza del Carso Classico. Consistono in quattro polle raccolte in tre rami che confluiscono in un unico canale che dopo 3 chilometri sbocca nel mare, nel Golfo di Monfalcone.

L'area sorgentifera che comprende oltre alle sorgenti del Timavo anche le sorgenti Sardos, è stata interessata da diverse opere di captazione delle acque per l'approvvigionamento idrico della città di Trieste. Le sorgenti Sardos, note anche come "sorgenti Randaccio", sono ubicate circa 500 m a nord del Timavo. Sono costituite da cinque scaturigini poste a circa 2.2 m s.l.m., ed erano collegate a una depressione allagata profonda circa 5 metri. L'acqua proviene da un circuito in pressione al di sotto del livello del mare alimentato prevalentemente da acque provenienti dal settore isontino. Sono poi in parte alimentate dalle precipitazioni locali e occasionalmente dal sistema Timavo durante le piene più importanti. La portata media annua rilevata nell'intervallo temporale tra il 1975 e il 1982 è stata di $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$, la minima (13 febbraio 1989) è di $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, quella massima, registrata nel novembre del 1979, fu di 5.6

m³/s. Le diverse emergenze vennero captate nel 1929 per dar vita al primo acquedotto intitolato a Giovanni Randaccio, eroe della prima guerra mondiale e caduto proprio nei pressi delle sorgenti. Successivamente, a causa dell'incremento nella richiesta di acque potabili, vennero integrate nell'acquedotto anche le 4 polle delle sorgenti del Timavo, con la realizzazione di una serie di paratoie mobili e stramazzi per evitare le contaminazioni con le acque marine e per favorire la captazione con la creazione di appositi bacini di raccolta.

Il Timavo ha una portata decisamente notevole con valori medi giornalieri di circa 30 m³/s, minime di 7.4 m³/s e massime di 158 m³/s.

Se da un punto di vista quantitativo le sorgenti del Timavo rappresentavano un'ottima risorsa, non lo erano altrettanto dal punto di vista qualitativo. Le loro acque infatti erano fortemente inquinate da sostanze organiche scaricate nel Reka dagli impianti industriali di Ilirska Bistrica, e dalle torbide che si riscontravano in occasione di ogni piena con valori superiori anche a 200 FTU. Per questo motivo le sorgenti del Timavo sono rimaste in esercizio solo fino agli anni '80, quando la loro captazione è stata sospesa a causa dell'inquinamento e sostituita con una serie di pozzi realizzati nella pianura isontina all'altezza dell'aeroporto di Trieste. La sensibilità ambientale e il mutato assetto geopolitico della Slovenia nel frattempo hanno portato a una serie di inter-

venti che hanno riqualificato le acque del Reka, che ad oggi sono di ottima qualità e di conseguenza lo sono anche le sorgenti del Timavo, che sono diventate per l'acquedotto di Trieste una risorsa strategica da utilizzare in caso di emergenza.

Le sorgenti del Timavo rappresentano lo snodo centrale dell'idrogeologia di tutto il Carso Classico, drenando la maggior parte delle acque che alimentano l'acquifero. Dai tre rami delle sorgenti si diparte infatti un complesso e articolato reticolo di ampi condotti che, raggiungendo la profondità di -82 m s.l.m. ed uno sviluppo di oltre 1500 metri, connettono sia le acque del Reka che si inabissano nelle grotte di San Canziano, sia quelle che si infiltrano dalla pianura nel Carso isontino, sia quelle legate all'infiltrazione efficace dell'intero Carso.

L'idrodinamica dell'acquifero

Il monitoraggio in continuo della portata, della temperatura e della mineralizzazione delle acque attraverso il parametro della conducibilità elettrica, effettuato in diverse sorgenti e cavità del Carso e specificatamente nel Timavo, ha permesso di comprendere come, in funzione del regime idrogeologico nei diversi punti sorgivi, prevalga un contributo rispetto a un altro.

Durante le piene, infatti, si registrano generalmente arrivi d'acqua differenziati, con andamenti di temperatura e conducibilità elettrica che differiscono da episodio a episodio e da punto

a punto. Questi comportamenti sono dovuti al sovrapporsi o al contrapporsi degli impulsi idrici veicolati attraverso vie di drenaggio differenti e a quote diverse, provenienti dal bacino del Reka, dalle perdite laterali dei fiumi Isonzo e Vipacco e dalle precipitazioni che si infiltrano sull'altopiano carsico.

La figura 4.11 (a) mette in evidenza l'intima connessione esistente tra le acque del Reka e quelle delle sorgenti del Timavo durante i periodi di piena. Nel periodo tra metà febbraio 2006 e metà marzo 2006 si sono susseguite delle intense precipitazioni che hanno provocato 4 diverse piene del fiume Reka. I picchi di piena del Reka registrati a San Canziano si osservano in modo del tutto analogo anche presso l'Abisso di Trebiciano, dove normalmente il livello si innalza oltre i 30 metri, e alle sorgenti del Timavo. L'aumento del carico idraulico legato all'infiltrazione delle acque del Reka inghiottite a San Canziano e alle precipitazioni che interessano l'intera area carsica, si ripercuote su tutto l'acquifero provocando l'incremento dei livelli in tutti i punti monitorati in modo quasi sincrono. Questo innalzamento del livello non rappresenta però il reale arrivo delle acque di neoinfiltrazione, ma è legato alla trasmissione delle pressioni all'interno del sistema dei condotti carsici. Se si vuol comprendere le modalità e la velocità reale di trasferimento delle acque di neoinfiltrazione, bisogna analizzare il comportamento della

conducibilità elettrica. In occasione di ogni piena le acque del Reka registrano una brusca decrescita dei valori di conducibilità elettrica che si abbassano dai 350-380 uS/cm ai 250-260 uS/cm. Questo comportamento diventa perciò una firma identificativa delle acque del Reka che ci permette di individuare tutte le grotte e le sorgenti che vengono alimentate da queste acque e, attraverso il computo dei ritardi temporali tra punto e punto, di determinare le velocità apparenti (rapporto tra la distanza in linea retta tra i punti ed il tempo) di transito delle acque.

In fig. 4.11 (b) si può osservare un esempio di quanto appena asserito tra le grotte di San Canziano, l'Abisso di Trebiciano e le sorgenti del Timavo. Durante le piene più importanti la velocità apparente di flusso delle acque tra l'inghiottitoio di San Canziano e l'abisso di Trebiciano può superare gli 800 m/h e nel tratto tra Trebiciano e le sorgenti del Timavo i 600 m/h. Ogni piena ha comunque un comportamento unico, in quanto il deflusso delle acque all'interno dell'acquifero è legato non solo all'entità delle precipitazioni, ma anche alle condizioni idrogeologiche antecedenti il singolo evento (condizioni di magra, morbida...) e alla distribu-

Fig. 4.11 Idrogramma del livello (a) e della conducibilità elettrica (b) registrati a SKO Grotte di San Canziano (Škocjanske jame), TRE Abisso di Trebiciano e TIM Sorgenti del Timavo b) (modificato da Zini et al., 2022).

Fig. 4.11 (a)

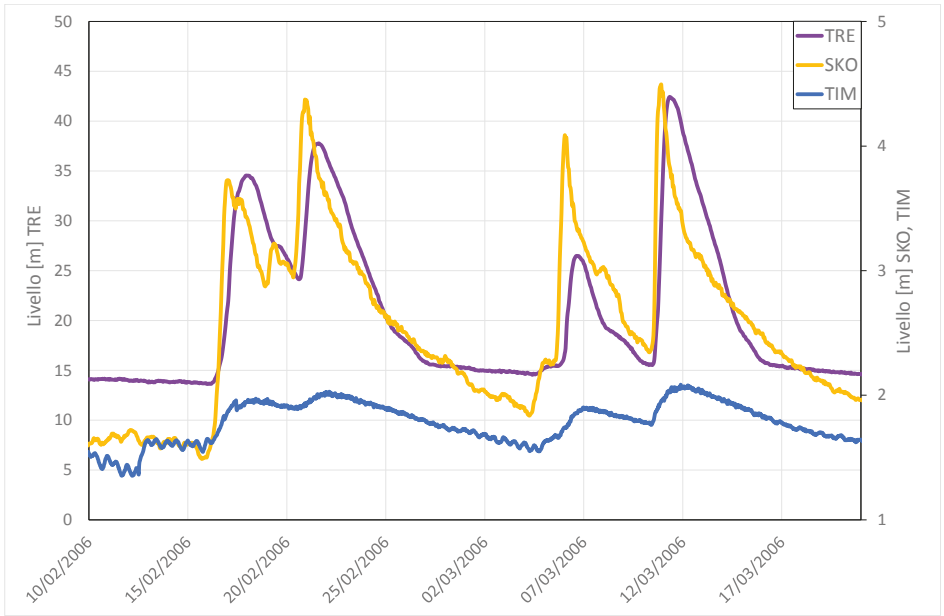
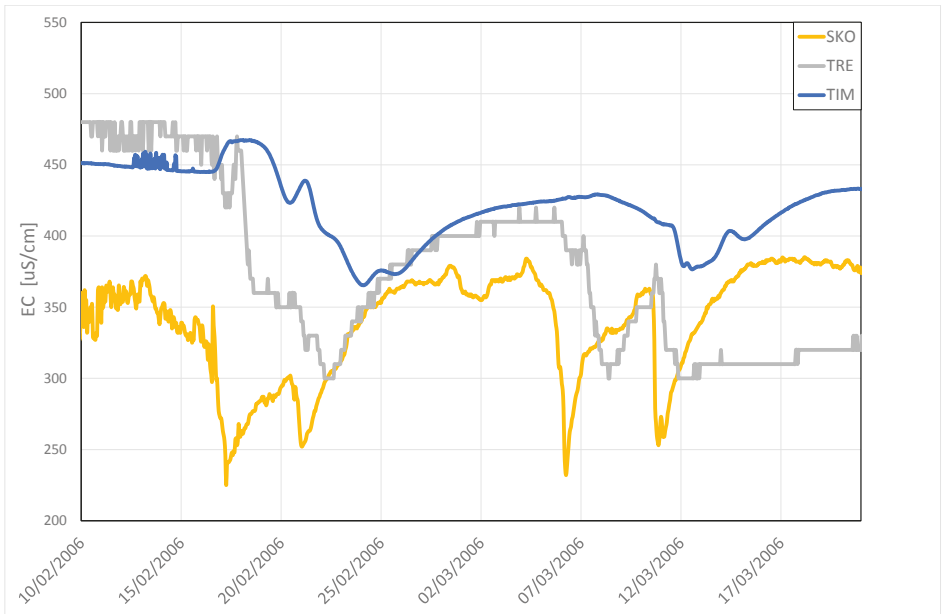


Fig. 4.11 (b)



zione delle precipitazioni sul territorio. L'influsso delle acque del Reka si ripercuote in tutto il settore orientale del Carso, e si osserva chiaramente in tutte le sorgenti da Aurisina fino al Timavo e in occasione delle piene più intense anche alla sorgente Sardos, ma non nel settore occidentale del Carso isontino dove prevalgono altri contributi.

Le acque che fluiscono nel Carso isontino, infatti, sono alimentate fondamentalmente da due apporti: le acque disperse dai fiumi Isonzo e Vipacco, che presentano mediamente una conducibilità elettrica (25°C) di 270 uS/cm, e le acque legate all'infiltrazione efficace (acque carsiche), con valori medi di 530 uS/cm. Il monitoraggio della conducibilità elettrica delle acque in diversi siti tra Sagrado e San Giovanni di Duino ha permesso di osservare come, in funzione del regime idraulico, prevalga un contributo rispetto all'altro. Durante i periodi di magra spostandosi da ovest verso est si osserva un graduale aumento della conducibilità elettrica delle acque ipogee confermando l'importanza dell'alimentazione delle acque del sistema Isonzo-Vipacco rispetto a quelle carsiche. Le acque isontine sostengono le portate di tutte le sorgenti occidentali del Carso e anche del Timavo, che durante i periodi di magra continua ad avere portate elevate (circa 10 m³/s) a fronte di un'alimentazione del Reka che non supera 1 m³/s. La connessione delle sorgenti del Timavo con il reticolo ipogeo ison-

tino è stata verificata anche attraverso una serie di test con immissione di traccianti negli inghiottitoi del lago di Doberdò. In tutti i test la maggior parte del tracciante è defluita verso le Sorgenti del Timavo, e in quantità minori anche alle sorgenti di Sablici, Moschenizze e Sardos e solo in tracce al lago di Pietrarossa.

Durante le piene invece si osserva un comportamento decisamente differente: le acque di precipitazione si infiltrano velocemente nel sistema carsico aumentando il gradiente idraulico, che inibisce o limita significativamente l'alimentazione da parte del sistema Isonzo Vipacco. In tutti i punti acqua si osserva un repentino incremento dei valori di conducibilità elettrica (effetto di pistonaggio), che permane elevato fin tanto che il livello delle acque non ritorna alle condizioni precedenti.

In questo quadro la sorgente Sardos rappresenta il punto di contatto tra il sistema occidentale isontino e quello orientale legato al Reka/Timavo: in questo punto durante le piene più intense si osserva il tipico segnale del Reka con crollo della conducibilità elettrica, nelle altre situazioni il caratteristico effetto di pistonaggio delle acque carsiche.

Fig. 4.12 Idrogramma del livello (a) e della conducibilità elettrica (b) registrati a Lago di Doberdò (DOB), Grotta di Comarie (COM), Pozzo di Castelvechio (CAS), Sorgente di Moschenizze Nord (MON), Sorgente Sardos (SAR) e Sorgenti del Timavo (TIM) (Diagrammi: Luca Zini).

Fig. 4.12 (a)

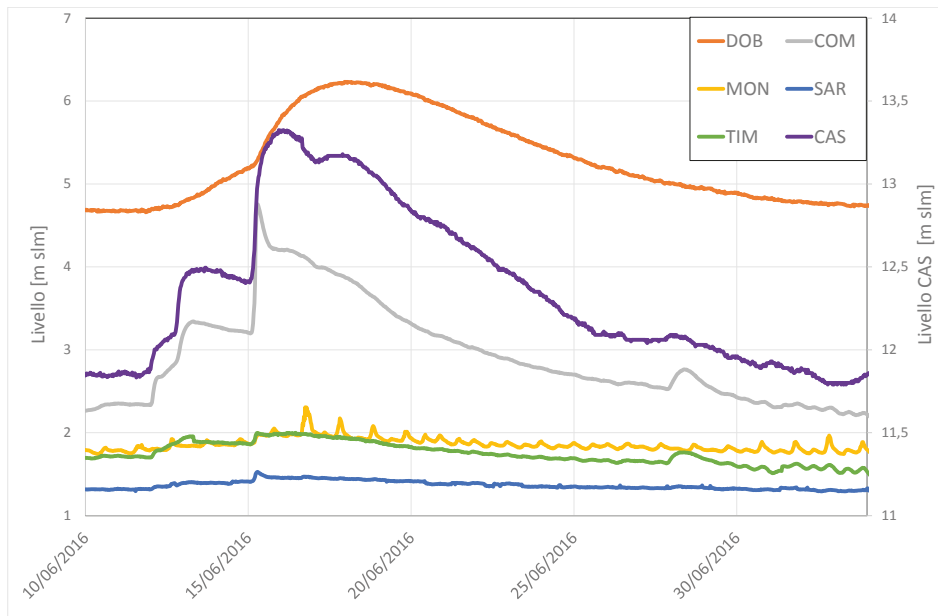
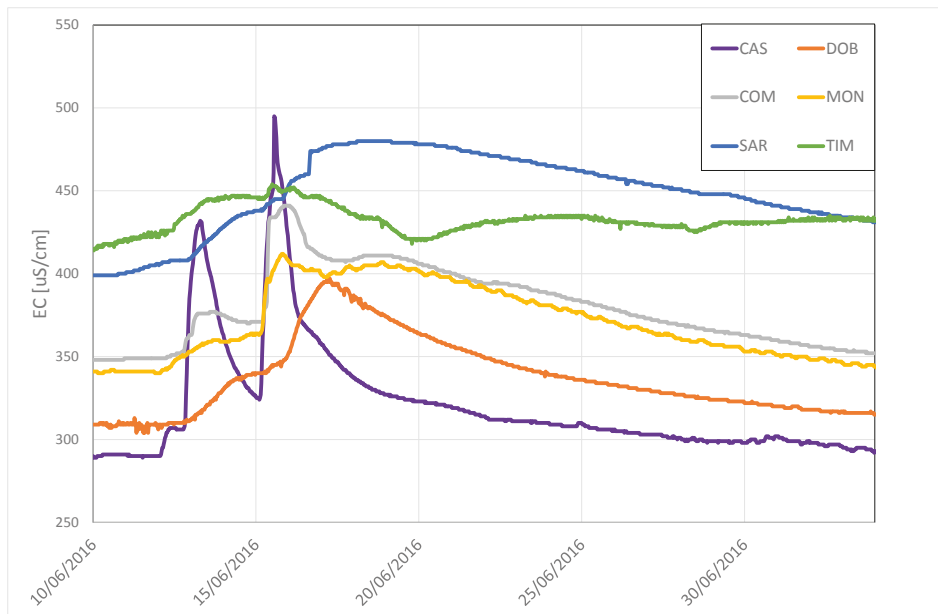


Fig. 4.12 (b)





BIBLIOGRAFIA E ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO

CALLIGARIS C., GALLI M., GEMITI F., PISELLI S., TENTOR M., ZINI L., CUCCHI F. (2019) *Electrical Conductivity as a tool to evaluate the various recharges of a Karst aquifer*. Rendiconti Online della Società Geologica Italiana, 47, 13-17. <https://doi.org/10.3301/ROL.2019.03>

CIVITA M. (2005) *Idrologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana Milano, 794pp.

CIVITA M., CUCCHI F., EUSEBIO A., GARAVOGLIA S., MARANZANA F., VIGNA B. (1995) *The Timavo hydrogeologic system: an important reservoir of supplementary water resources to be reclaimed and protected*. Acta Carsologica, 24, 169-186.

CUCCHI, F. FORTI F. (1981) *La "Cattura" del Timavo superiore a Vreme*. Atti e Mem. Comm. Grotte E. Boegan, 21: 55-64.

CUCCHI, F., ZINI, L., CALLIGARIS C. (eds), (2015) *Le acque del Carso Classico/Vodonosnik klasičnega Krasa*. Progetto/Projekt HYDROKARST, Edizioni Università di Trieste, 181 pp.

FRANCANI V. (2014) *Idrogeologia ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana Milano, 337 pp.

GABROVŠEK F., PERIC B. (2006) *Monitoring the flood pulses in the epiphreatic zone of karst aquifer: the case of Reka river system, karst plateau, SW Slovenia*. Acta Carsologica, 35(1), 35-45.

GEMITI, F. (1995) *Portata liquida e portata solida del Timavo alle risorgive di S. Giovanni di Duino*. Hydrores. 13, 75-88.

GEMITI, F. (2004) *Le sorgenti Sardos e l'approvvigionamento idrico della Provincia di Trieste*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 39, 67-80.

VIGNA B. (2001) *Gli acquiferi carsici*. Quad. Did. Soc. Speleol. Ital., 12, 48pp.

VIGNA B. (2009) *Gli acquiferi in rocce carbonatiche*. Progetto Powerpoint 2009, Società Speleologica Italiana.

ZINI L., CALLIGARIS C., CUCCHI F. (2017) *Il Lacus Timavi*. *Idrogeologia*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", 47, 63-76.

5. GEODIVERSITÀ

5.1 Il concetto

I concetti di geodiversità e di geoconservazione sono stati introdotti nelle Scienze della Terra pochi anni dopo rispetto a quello di "biodiversità". I termini vengono utilizzati da Sharples (1992) a sintetizzare la necessità della conservazione anche degli aspetti abiotici della natura, senza considerarli "la metà dimenticata della Natura". Negli anni successivi il significato di geodiversità viene meglio definito da parecchi autori di area anglosassone che si occupavano di gestione delle aree naturali, intrecciandolo spesso con altri concetti come *Geological heritage* e *Geoconservation* e legandolo ai "geositi": i luoghi dove gli aspetti della geodiversità di un territorio sono evidenti ed esemplificativi. La definizione più classica di geosito è quella di Wimbledon (1996): un geosito può essere definito come località, area o territorio in cui è possibile individuare un interesse geologico e/o geomorfologico significativo e pertanto meritevole di conservazione. Potrebbe sembrare una definizione troppo generica, ma bisogna considerare che il progetto "GEOSITES" dello IUGS che aveva come principale obiettivo quello di elaborare un primo catasto di geositi, era appena all'inizio, e quindi Wimbledon elaborò una definizione volutamente a maglia larga.

In Tasmania e Australia, si è sviluppa-

ta una scuola di pensiero (Kiernan, Dixon) che tende a riconoscere la geodiversità come l'elemento che sta alla base degli ecosistemi, e quindi alla biodiversità, arrivando a definire un concetto olistico, totale di protezione della natura da considerare nella sua interezza. Forse non è un caso che questa concezione della natura si sia sviluppata proprio in paesi relativamente privi di beni culturali e archeologici, con una popolazione nativa fortemente legata in modo simbolico al territorio. A questa impostazione si collegano anche Barthlott et al. (1966) che introducono il concetto di ecodiversità di un territorio come la combinazione tra geodiversità e biodiversità.

È chiaro che i criteri con cui valutare il grado di geodiversità e il grado di biodiversità di un territorio sono diversi, così come sono diverse le modalità di conservazione di un'area. Un esempio banale: se in una zona una specie animale è in pericolo di estinzione, è possibile reintrodurre nuovi esemplari da zone in cui ci potrebbe essere perfino un'abbondanza di individui. In alternativa è possibile la reintroduzione in natura di individui nati in cattività. Un geosito raro non è replicabile, e una volta alterato, per la sua ricostruzione attraverso i normali processi geologici ci vorranno centinaia se non migliaia di anni: una volta distrutto invece, è distrutto per sempre.

In realtà la coscienza della necessità di protezione degli elementi abiotici della natura si era sviluppata nel Regno Unito già a partire dai primissimi anni del dopoguerra. Nei testi che propongono e istituiscono i parchi nazionali (Chubb, 1945) si puntualizza la differente vulnerabilità tra geositi da un lato e flora e fauna dall'altro.

Le modalità di gestione dei geositi sono ampiamente esposte in un manuale edito da "English Nature" (Prosser et al, 2006), in cui vengono sintetizzati i principali rischi che mettono in pericolo l'integrità dei geositi. Oltre allo sviluppo e all'urbanizzazione del territorio, viene puntata l'attenzione sulle azioni della riforestazione e della flora infestante oltre che sulle attività delle cave, paradossalmente anche sul loro eccessivo recupero.

Tale raccolta di definizioni e concetti è necessaria per capire quanto detto in precedenza e condividere le attuali definizioni utilizzate a livello nazionale basandosi su una definizione di geosito che possa diventare di riferimento per tutti, ovvero:

"Un geosito è un luogo, epigeo, ipogeo o subacqueo, spazialmente limitato e chiaramente distinguibile dalle zone circostanti, con caratteristiche geologiche di intrinseco interesse scientifico che permettono di comprendere la storia o l'evoluzione geologica di un territorio; per questo luogo, è possibile individuare un

interesse geologico per la conservazione."

Dove il termine geologico è inteso come comprensivo di tutte le discipline degli aspetti della geologia; quindi la geomorfologia così come l'idrogeologia, la stratigrafia e così via, senza eccezioni (ovviamente in ambito normativo per delimitare la competenza legislativa è doverosa la necessità di esplicitarli) e i concetti di raro, rappresentativo e di esemplificativo sono parte integrante di questa definizione, così come i criteri per il riconoscimento della categoria di interesse del geosito.

Ecco quindi che, in accordo con il Global Geosites Project di Wimbledon et al. (1995 e 1999) e così come adottato negli ultimi anni dalla gran parte dei paesi europei, i geositi sono classificati di interesse internazionale, nazionale, regionale e locale; a questa suddivisione, basata su criteri scientifici, viene poi associata la caratteristica geologica prevalente, per cui un geosito può essere descritto come di interesse geomorfologico, paleontologico, ecc.

Queste caratteristiche definiscono, quindi, anche il patrimonio geologico, inteso come l'insieme delle peculiarità geologiche, note come geositi (ProGEO, 2011 trad. Geremia F. & Bentivenga M., 2013).

Mentre, come esplicito in premessa, molto più vasto è il concetto di geodiversità, la cui definizione adottata a livello europeo è: “la naturale varietà di rocce, minerali, fossili, processi geologici, geomorfologici e pedologici, ovvero di tutti quei processi abiotici che creano le condizioni necessarie allo sviluppo della vita sulla Terra” (ProGEO, 2011 trad. Geremia F. & Ben-tivenga M., 2013).

Il concetto di geodiversità però non deve limitarsi a definire la varietà delle condizioni climatiche, geomorfologiche e geologiche che condizionano le associazioni vegetali e le catene trofiche di un particolare habitat: nella geologia va infatti sempre considerato anche il fattore tempo.

Nel descrivere la geodiversità di un territorio va analizzata la sua evoluzione nei tempi geologici, vale a dire porre attenzione a come attraverso le rocce, i rilievi, le caratteristiche geomorfologiche, sia possibile leggere quali ambienti e quali processi si sono alternati nei tempi della sua storia geologica.

5.2 La geodiversità del Carso Classico italiano

La descrizione della geodiversità del Carso Classico italiano ha implicato e implica l'individuazione di siti che caratterizzino i vari aspetti dei processi carsici su più scale, sia spaziali che temporali.

Nel caso del Carso Classico italiano, ad esempio, le rocce raccontano una

storia geologica durata all'incirca 80 milioni di anni: i calcari cretacei sono testimoni di un mare tropicale di milioni di anni fa, del successivo instaurarsi di un ambiente di acque salmastre, del progressivo annegamento della piattaforma, fino all'arrivo a mare di sedimenti terrigeni provenienti da catene montuose in formazione (si veda il Cap. 2 per un approfondimento del tema).

Dal punto di vista idrogeologico un sistema carsico si può suddividere in tre zone. Una è l'area di ricarica allo-genica, quella in cui i corsi d'acqua dopo un percorso in superficie scompaiono all'interno del massiccio carsico attraverso cavità che agiscono da inghiottitoi.

La seconda zona è l'area carsica in senso stretto, di regola priva di reticolo idrico superficiale sulla quale agiscono le acque meteoriche che si infiltrano in superficie e alimentano la circolazione idrica nel sottosuolo. La terza è l'area delle sorgenti in cui le acque sotterranee vedono la luce.

Per quanto riguarda il territorio del Carso Classico, una zona di ricarica si trova in territorio sloveno, nell'area delle grotte di San Canziano, già valorizzate come sito Unesco; un'altra è in Italia, lungo la fascia in sinistra del Fiume Isonzo che borda l'altopiano a settentrione. L'area sorgentifera, caratterizzata da laghi, polle, sorgenti sottomarine e impetuose risorgive, ha come geosito simbolo le Sorgenti del Timavo, che affiancano all'import-

tanza scientifica, sono fra le sorgenze carsiche più importanti del Mediterraneo, quella archeologica e storica.

La variabilità del paesaggio carsico sull'altopiano è strettamente legata alla geologia, cioè alle differenti caratteristiche petrografiche delle unità litostatigrafiche affioranti, alle eteropie al loro interno, alla giacitura degli strati e alla tettonica. In sintesi sono questi i fattori che modificano l'entità dell'alterazione superficiale, il grado di carsificabilità e quello di erodibilità. Si può quindi suddividere l'altopiano carsico in più zone con un diverso "paesaggio naturale".

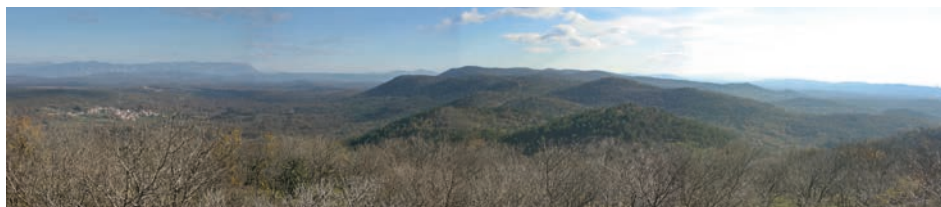
Si riconoscono infatti, scorrendo da occidente verso oriente, un "Carso monfalconese goriziano", l'"Allineamento dei rilievi lungo la Linea di Confine", l'"Allineamento del Ciglione e della Costa alta", il "Settore centrale", la "Val Rosandra".

La caratteristica principale del territorio del Carso monfalconese goriziano è la presenza di un elevato numero di doline di dissoluzione di

dimensioni medie e piccole. Quasi un "campo di doline" vasto una quarantina di km² interrotto verso sud-est dal cosiddetto "Solco del Vallone" e dai rilievi del monte Ermada. Nell'area si aprono numerosissimi ingressi di cavità, quasi tutte però di modeste dimensioni. Basti pensare che delle 200 cavità con profondità o sviluppo orizzontale maggiori di 100 m presenti nel territorio del geoparco, solo 7 si trovano nel settore goriziano. La morfologia prevalente è a carso coperto, molto rari sono i campi solcati.

Queste caratteristiche geomorfologiche sono probabilmente anche legate al fatto che se nel Carso monfalconese-goriziano affiorano le stesse unità litostatigrafiche del Carso triestino, in quest'area esse sono contraddistinte da differenze petrografiche, quasi delle eteropie di facies significative di paleoambienti leggermente diversi all'interno della vasta Piattaforma del Carso durante il Cretacico. Diversa è anche l'organizzazione strutturale, consistente in una blanda anticlinale, quasi un "anticlinorio" ad asse Ovest-

Fig. 5.1 I rilievi di confine dalla cima del Monte San Leonardo verso SW (foto F. Finocchiaro).



Est. Va inoltre considerato il diverso contesto idrogeologico dell'area (Cap. 4.2).

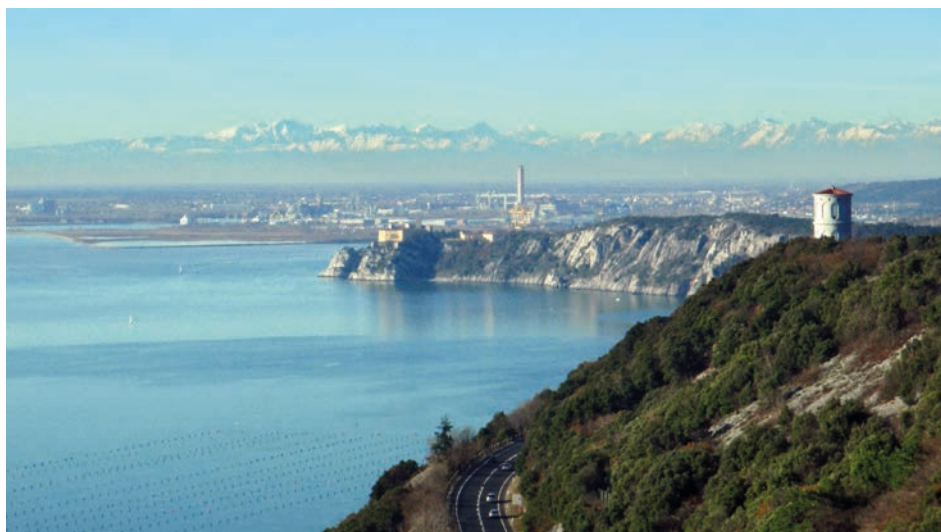
I rilievi lungo la linea di confine sono caratterizzati in Italia da una fascia ampia un paio di chilometri, lungo la quale affiorano calcari, calcari dolomiti, dolomie e livelli di breccie dolomitiche e calcaree appartenenti alla formazione dei Calcari di Monte Coste. Talora sono presenti sacche paleocarsiche.

La giacitura dell'unità in questa area è da suborizzontale a poco inclinata, la suddivisione per fratturazione non è intensa. Si tratta di unità

a medio-bassa se non bassa carsificabilità e, per contrappeso, a media erodibilità. In questa fascia sono quindi riconoscibili numerose linee di displuvio, tracce di corsi d'acqua temporanei, brevi vallecicole che terminano in inghiottitoi dando origine a piccole "valli cieche". La morfologia è a carso coperto, radi sono gli affioramenti, spesso è presente un vero e proprio suolo: sono frequenti sia le aree boschive che i terreni coltivati, tra i quali i predomina la vite.

La Costa alta ed il Cigione carsico caratterizzano il settore meridionale dell'Altopiano, lungo la costa da Duino al Porto di Trieste. L'altezza sul livello mare va da meno di 100 m a Duino ai 300 e più alle spalle della città. Si tratta di una stretta fascia costituita dalla falesia di Duino, la baia di Sistia-

Fig. 5.2 La costa alta tra Duino e Aurisina (foto F. Finocchiaro).



na, i contrafforti di Aurisina, lungo la quale i calcari cretacei scendono fino al mare.

Alla costa alta segue un ciglione con le culminazioni dei monti Babiza, San Primo, S. Paolo, Grisa e Gurca fino alla Val Rosandra lungo il quale i Calcari ad Alveoline e Nummuliti sono coperti al piede dalle torbiditi del flysch. L'assetto strutturale è quello tipico di un fianco esterno di una anticlinale asimmetrica con strati a giacitura da subverticale, se non rovesciata, a molto inclinata a franapoggio più inclinato del pendio, interessato da numerose limitate faglie subverticali perpendicolari alla stratificazione a debole carattere trascorrente e da non sempre evidenti faglie di interstrato e a cuneo.

Ne conseguono morfologie accentuate da alte scarpate, versanti ripidi, grize e detriti di falda verso mare, versanti acclivi e carso a denti e testate di strato verso l'interno dell'Altopiano.

Il “settore centrale” dell'Altopiano, costituisce una fascia larga da due a quattro chilometri, allungata in direzione Nord Ovest – Sud Est per più di 25 km in cui affiorano i Calcari di Aurisina, la formazione più carsificabile del territorio del Geoparco.

I calcari hanno giacitura da suborizzontale a poco inclinata verso mare, hanno generalmente stratificazione da decimetrica a metrica e suddivisione non intensa. La densità di doline e di cavità per unità di superficie, l'ampiezza e varietà dei campi solcati e delle grize, sono in questa formazione decisamente superiori rispetto a quelle delle altre unità litostratigrafiche cretaceo-terziarie. È quindi in questa ampia fascia debolmente inclinata verso occidente, dove le quote vanno dai 380 m s.l.m. di Basovizza ai 110 di Visogliano, che si aprono le doline più ampie e profonde, si incontrano i campi solcati più estesi, si rinvergono gli ingressi delle cavità più profonde ed estese. È il Carso più

Fig. 5.3 Il “Settore centrale” all'altezza di Aurisina. Sullo sfondo Duino e la foce dell'Isonzo (foto F. Finicchiaro).



tipico, con affioramenti continui, bancate che emergono dalla superficie topografica crivellata da doline di tutte le dimensioni ed è quindi questo il settore del Carso in cui sono ubicati i principali geositi. A tal proposito si rimanda a Cucchi et al. (2009) e alla pagina web della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia relativa alla *Geodiversità e catasto dei geositi*.

La Val Rosandra, settore sud orientale confinante con la Slovenia ai margini del territorio del Geoparco, ha carat-

Fig. 5.4 Val Rosandra: la cascata, la chiesa di S. Maria in Sjaris e il crinale (foto F. Finocchiaro).



teristiche diverse dal resto del territorio, in pratica fa caso a sé.

La Valle, come la chiamano i triestini, è infatti un particolare e spettacolare esempio di valle fluviocarsica, dalla morfologia fortemente condizionata non tanto o non solamente dai fenomeni carsici, ma essenzialmente dalla struttura geologica, dalla tettonica, dalla diversa tipologia delle rocce (per i dettagli si veda quanto descritto nell'itinerario proposto nel Cap 6.1).

5.3 Il patrimonio geologico del Carso Classico italiano

Il Carso Classico è il simbolo universale dei fenomeni carsici ed è carat-

terizzato da tutti i tipi di forme carsiche superficiali e sotterranee, con densità, ampiezza e tipologia uniche e da un peculiare reticolo carsico, ma il suo patrimonio geologico presenta ulteriori unicità con interessi che spaziano dalla geomorfologia e idrologia carsica, per l'appunto, alla geologia, con gli olistoliti di Miramare, alla paleontologia, con il sito dei dinosauri del Villaggio del Pescatore e molto altro ancora.

Tali unicità, ovvero i geositi, sono catalogati e descritti tecnicamente nel catasto dei geositi del Friuli Venezia Giulia (in appendice un elenco con descrizione sintetica), che sono stati organizzati in geositi complessi ovvero quei geositi che a loro volta racchiudono una varietà e una molteplicità di geositi (ad es. la Val Rosandra), in geositi multipli, ovvero quelli che rappresentano il medesimo fenomeno distribuito in zone differenti (ad es. le sorgenti a mare), e in geositi singoli. Di seguito vengono descritti alcuni di questi geositi, quelli forse meglio conosciuti e che rappresentano un fiore all'occhiello del territorio carsico.

Il Lago di Doberdò

Il settore meridionale del Carso isontino è interessato da alcune linee tettoniche ad andamento WNW-ESE che danno origine a depressioni allungate (*polje*) occupate da quattro laghi direttamente alimentati dalle acque della falda carsica. Il *polje* più settentrionale e più esteso è il Lago di Doberdò; a meridione due mode-

sti rilievi lo separano dal Lago di Pietrarossa e dai laghetti delle Mucille e di Sablici, posti rispettivamente ad ovest e a sud-est di Pietrarossa. I *polje* si aprono nei calcari, dolomie e brecce del Cretacico inferiore-inizio del Cretacico superiore, in cui la giacitura poco inclinata verso SE è localmente condizionata dalle faglie che hanno carattere prevalentemente trascorrente. Il *polje* del Lago di Doberdò è compreso fra la Faglia del Colle Nero (Jamlje Fault) ed una faglia minore connessa alla Faglia di Brestovizza, gli altri tre sono condizionati da faglie minori e da uno dei lineamenti connessi alla Linea di Palmanova, la linea tettonica a carattere regionale lungo la quale la Piattaforma del Carso è sovrascorsa sulle torbiditi del Flysch.

I laghi sono l'espressione dell'articolato sistema di sorgenti ed inghiottitoi, che danno vita al sistema idrogeologico dell'apparato sorgentifero che caratterizza il settore nord occidentale del Carso Classico. Le acque che fluiscono nel Carso isontino sono alimentate da due apporti: le acque disperse dai fiumi Isonzo e Vipacco e le acque di precipitazione che si infiltrano nell'area. Le prime sono la principale fonte di alimentazione di questo settore del Carso Classico e sostengono le portate di tutte le sorgenti dalle Mucille al canale di Moschenizza. Durante i periodi di forte magra, quando le portate del Reka in Slovenia sono molto basse (poche centinaia di litri al secondo) anche le sorgenti del Timavo sono, in gran parte, alimentate

da questa risorsa. Durante i periodi di piena invece, si osserva un aumento del carico idraulico legato all'infiltrazione delle acque del Reka inghiottite a San Canziano e alle precipitazioni che interessano l'intera area carsica, che porta ad una maggiore influenza delle acque carsiche e timaviche rispetto a quelle isontine.

Il lago di Doberdò, il cui fondo si trova a quote comprese tra 1 e 5 m s.l.m., porta alla luce le acque della falda carsica, solitamente posta a 4.8 m s.l.m. e regolata da alcuni punti sorgentiferi e da parecchi inghiottitoi. Durante le piene la portata delle sorgenti cresce velocemente e gli inghiottitoi non riescono a drenare tutta l'acqua che fa innalzare il livello, durante le piene eccezionali, anche di 6 metri circa in poche ore. La velocità con cui la de-

pressione si riempie e si svuota fa sì che spesso il fondo del lago sia libero dalle acque: Doberdò è quindi considerato un lago temporaneo (*Fig. 5.5*).

Anche alle Mucille sono presenti aree sorgentifere permanenti e inghiottitoi che regolano il regime delle acque. Il livello medio è alla quota di 4.60 m s.l.m. e si innalza di circa 3.5 m circa nelle piene eccezionali.

Due fronti sorgivi rispettivamente di una quindicina e di una ventina di punti con portate che variano da pochi litri al minuto a diverse decine di litri al secondo alimentano i laghi di Pietrarossa e di Sablici. Fino agli anni '60, il comportamento idrogeologico di questi laghi era del tutto simile a quello di Doberdò. In seguito ad una serie di interventi di bonifica e alla re-

Figura 5.5 – Febbraio 2017, vista panoramica del Lago di Doberdò in un periodo di magra. Sullo sfondo a destra il monte Castellazzo con la scarpata dovuta alla Faglia del Colle nero (foto: C. Calligaris).



alizzazione di due canali di drenaggio che hanno tagliato le soglie naturali presenti tra i laghi di Pietrarossa e Sablici e tra quest'ultimo e il canale di Moschenizza, l'idrodinamica di quest'area è stata radicalmente modificata. La rete di drenaggio ipogeo di questo territorio è comunque complessa ed articolata con numerose vie sotterranee che portano le acque dei laghi e della falda ad alimentare un sistema sorgentifero ormai obliterato dal tessuto urbano di Monfalcone.

Per comprendere nel dettaglio la provenienza e il deflusso delle acque, i ricercatori hanno utilizzato in passato, e stanno utilizzando approcci diversi. Uno di questi è il monitoraggio delle acque attraverso la valutazione della conducibilità elettrica quale tracciante naturale. Ad integrazione dei dati ottenuti con questo approccio, dal 2018, sono stati eseguiti dei test di tracciamento con traccianti artificiali iniettati in alcuni degli inghiottitoi del lago di Doberdò. I risultati hanno evidenziato come la maggior parte del tracciante defluisca inaspettatamente dalle sorgenti del Timavo. Le sorgenti del lago di Pietrarossa invece, seppur le più vicine dal punto di vista geografico, sono interessate solo marginalmente dalle acque di Doberdò.

Il geosito del Villaggio del Pescatore

Il geosito del Villaggio del Pescatore, situato nel comune di Duino-Aurisina, è particolarmente rilevante perché in una ex-cava di pietra calcarea,

a partire dalla fine degli anni Novanta, sono stati portati alla luce due fossili completi ed eccezionalmente ben conservati di un nuovo genere di dinosauro, denominato *Tethyshadros insularis*. I due scheletri, ancora articolati, cioè aventi tutte le ossa in connessione anatomica, sono stati soprannominati "Antonio" e "Bruno" e sono ora esposti al Museo Civico di Storia Naturale di Trieste. Nel sito del Villaggio del Pescatore sono stati rinvenuti anche altri fossili appartenenti allo stesso genere di dinosauro e anche altri animali come coccodrilli, pesci teleostei e invertebrati, tra cui crostacei decapodi. L'organizzazione stratigrafica delle rocce del geosito, che sono esposte con gli strati quasi verticali, è complessa, ma si possono riconoscere due tipologie principali di rocce. La prima è costituita da calcari grigi che possono essere riferiti ai tipici calcari a rudiste del Cretacico superiore e contengono abbondanti frammenti di rudiste. L'altra tipologia di roccia comprende, invece, calcari finemente laminati. Le sottili lamine, di spessore millimetrico, possono essere scure o grigio-biancastre e sono spesso caratterizzate da un complesso ripiegamento. Tale caratteristica testimonia che il sedimento, appena deposto e non ancora litificato, fu soggetto a deformazioni, la cui origine è ancora oggetto di studio da parte dei geologi. I fossili di dinosauro sono stati rinvenuti all'interno di questi calcari a lamina sottile. In particolare, lo stesso scheletro di Bruno



Fig. 5.6 – Bruno, ritratto da Marino Lerman (Comune di Trieste, Fototeca Civici Musei di Storia ed Arte, Museo Civico di Storia Naturale di Trieste - Tutte le immagini sono utilizzate su concessione della Soprintendenza ABAP FVG – MiC e ne è vietata l'ulteriore riproduzione a fini di lucro).

Fig. 5.7 – L'olistolite del porticciolo di Grignano, adiacente al Castello di Miramare in una foto storica (Collezione Tomè, fine del XIX – inizio del XX secolo)

è stato coinvolto nella piegatura della stratificazione, come si può osservare nell'esposizione al museo (Fig. 5.6).

Bruno è l'unico dinosauro al mondo esposto in una piega che ne curva lo scheletro di 180 gradi. Indagini micropaleontologiche hanno consentito di riferire queste rocce al Cretacico superiore (Santoniano-Campaniano) e dati sedimentologici e geochimici suggeriscono che il calcare laminato si sia depositato in un ambiente marino situato vicino alla terra emersa e influenzato dalle acque dolci. Un ambiente che potrebbe essere vicino ai cosiddetti *blue hole* che si trovano

anche nelle moderne piattaforme carbonatiche. (Arbulla, 2017; Dalla Vecchia, 2020).

Gli olistoliti del Castello di Miramare

Il Castello di Miramare sorge su un promontorio che si protende verso sud ovest nel Golfo di Trieste, in vista della città. Nelle vicinanze del Castello, sparsi all'interno del parco che lo circonda e anche lungo la riva, è possibile vedere dei grandi blocchi di calcare biancastro. In totale sono stati individuati un centinaio di blocchi con volumi ragguardevoli che vanno da circa 500.000 m³ a 1.300.000 m³. I blocchi sono costituiti da calcari appartenenti ai Calcari a Foraminiferi.



Due blocchi sono particolarmente notevoli. Uno si trova vicino al porticciolo di Grignano. Lì, si può chiaramente osservare il contatto tra il blocco calcareo e, sul suo lato nord-orientale, le arenarie ben stratificate del Flysch. Gli strati di arenaria, in prossimità del contatto, appaiono deformati in complesse pieghe come se il blocco calcareo vi avesse premuto contro. Fotografie storiche del sito, effettuate prima della realizzazione del muro di pietra che ora si trova al di sotto del blocco calcareo, testimoniano che il Flysch si trova anche al di sotto di esso e adiacente al suo fianco sud-occidentale (*Fig. 5.7*).

L'altro grande blocco calcareo degno di particolare nota si trova tra le scuderie e il Castello, lungo la strada di accesso verso Trieste. In prossimità dell'imbocco di una galleria, si trova, a contatto con il blocco, una breccia argillosa con frammenti calcarei, contenente sparsi fossili di nummulitidi. Questa roccia, completamente diversa dal calcare massiccio del blocco, testimonia anch'essa una forte deformazione avvenuta in prossimità di quest'ultimo e causata dal suo movimento. Un ultimo indizio importante sull'origine dei massi calcarei di Miramare è che la loro mappatura ha rivelato che i depositi di Flysch si trovano anche sopra i blocchi. Ciò significa che essi si trovano all'interno dei depositi di Flysch e dunque che si depositarono contemporaneamente alle arenarie che li contengono. Le

evidenze di deformazione adiacenti ai blocchi hanno permesso di interpretarli come olistoliti. Un olistolite è un termine usato dai geologi per indicare grossi massi rocciosi che fanno parte di un corpo di frana sottomarina. Le deformazioni nel Flysch testimoniano che lo scorrimento dei blocchi avvenne all'interno di arenarie non ancora completamente litificate. L'intero promontorio di Miramare è dunque verosimilmente costituito dal corpo di una grande frana sottomarina che tra i 40 e 48 milioni di anni fa scivolò nel bacino marino dove si stavano depositando le arenarie del Flysch. Il fatto che gli olistoliti di Miramare siano costituiti da calcari appartenenti ai Calcari a Foraminiferi testimonia che nell'evento sono stati coinvolti anche i depositi di piattaforma carbonatica di epoca eocenica, tuttavia, i meccanismi di messa in posto e la provenienza dell'antica frana sono ancora poco chiari e attualmente oggetto di indagine.

I campi solcati di Borgo Grotta Gigante

L'area ad Ovest dell'abitato di Borgo Grotta Gigante, al di là dalla linea ferroviaria, fra la Stazione a Nord ed il Centro sportivo di Prosecco a Sud, è rappresentativa del classico paesag-

Fig. 5.9 – Visione panoramica della grande caverna e della stalagmite detta "colonna Ruggero" (foto Archivio Grotta Gigante)

*Fig. 5.8 – Campi solcato presso Borgo
Grotta Gigante (foto: C. Calligaris).*



gio carsico che si sviluppa su calcari puri, a stratificazione sub-orizzontale o inclinata di pochi gradi, caratterizzati da spessori differenti degli strati. (Fig. 5.8). Nella fattispecie, affiorano i calcari a rudiste, caratterizzati dalla presenza, talora abbondante, di gusci integri o in frammenti di rudiste.

Su una superficie sub-trapezoidale di poco meno di un chilometro quadrato si aprono tre doline di grandi dimensioni e una ventina di dimensioni minori, si estendono i campi solcati più ampi e completi del Carso triestino, si sviluppa il più evidente e raro esempio di *roofless cave* (grotta scoperchiata), si aprono gli ingressi di alcune decine di cavità, fra le quali

una cavernetta che ha restituito centinaia di manufatti risalenti alla preistoria. A poca distanza, ricordiamo, si apre la Grotta Gigante (Fig. 5.9), la più grande caverna turistica al mondo (<https://www.grottagigante.it/>).

Due (dai toponimi Koprivnik e Školudnjek) delle tre grandi doline hanno la tipica forma sub-circolare, un diametro di circa 250 metri, pareti molto acclivi e un fondo piatto a 40 m di profondità dal piano campagna. La terza (la più settentrionale, denominata Murnjak) è ellittica, allungata di 450 m lungo un asse NNE-SSW, larga circa 250 m e profonda 30 m, con il fianco orientale ben più acclive di quello occidentale.

Lungo i margini SW e NE della



Fig. 5.11 – L'ingresso della roofless cave presso Borgo Grotta Gigante (foto: C. Calligaris).



Školudnjek, su vasti tratti del terreno affiorano superfici calcaree sulle quali le acque piovane hanno scolpito con particolare abbondanza e varietà, tutte le forme tipiche dei processi di dissoluzione carsica. Scannellature parallele, ad isola o meandriformi, solchi carsici ampi ed estesi, crepacci profondi che spesso originano piccoli ponti di roccia, fori di dissoluzione ed alveoli di corrosione, forme di dissoluzione sottocutanea, funghi carsici e piccoli torrioni, si susseguono con continuità. Ma la caratteristica principale di questi campi solcati sta nelle

dimensioni e nella frequenza delle *kamenitze* (vaschette di corrosione, *solution pan* in inglese; *škavnica* in sloveno) (Fig. 5.10): complessivamente, nell'area fra le due doline circolari, ne sono state osservate quasi 200, di cui una trentina con un asse maggiore di 1 metro ed un bacino vicino o superiore al metro quadrato. Tanto che molte sono state adattate nel tempo dall'uomo come abbeveratoi. L'alternanza, nella successione sedimentaria, di bancate e strati centimetrici, genera fasce decametriche successive di carso coperto o con piccoli

Fig. 5.10 – Una delle più grandi vaschette di corrosione sui campi solcati di Borgo Grotta Gigante (foto: F. Finocchiaro).

blocchi affioranti e di roccia intensamente carsificata, di prati e grize e di campi solcati, interrotti da doline grandi e piccole che danno luogo ad un paesaggio unico ed affascinante. Sul margine SE della Koprivnik si incontra una sorta di trincea naturale, profonda alcuni metri, larga una decina e lunga una settantina, quanto resta di un'antica galleria, cioè di una cavità sub orizzontale il cui soffitto è stato lentamente asportato dalla corrosione carsica superficiale (*roofless cave o unroofed cave* in inglese) (Fig. 5.11).

Nelle vicinanze della linea ferroviaria, vicino al bordo di una piccola dolina di crollo, si apre una cavernetta, la Grotta della Tartaruga (1688/4530VG) che venne “scoperta” appena nel

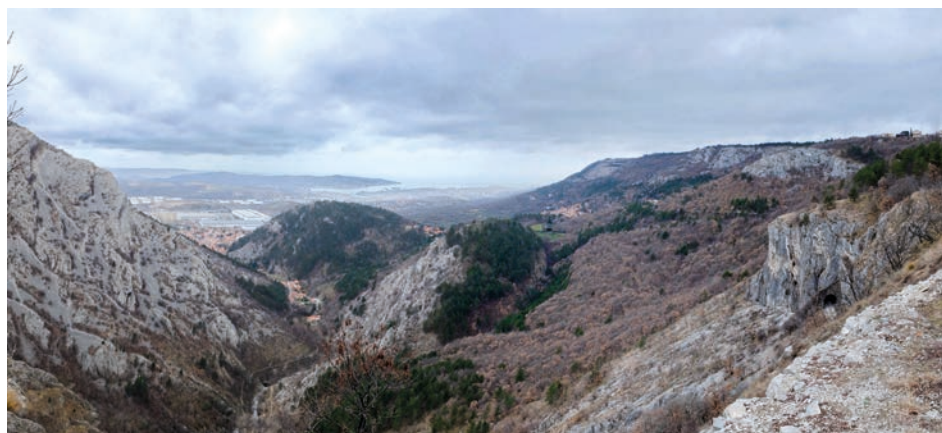
1962 in quanto ostruita da detriti e terra praticamente fino alla volta. La disostruzione portò all'apertura di alcuni piccoli vani in cui sono presenti concrezioni sul soffitto, alcune spesse colonne ed una vaschetta di circa 20 cm di diametro che raccoglie lo stillicidio. Gli scavi misero in luce più livelli di frequentazione dal Mesolitico all'età del Bronzo. Di particolare importanza il livello D, attribuito al Neolitico, in cui vennero trovati abbondanti resti di vasi, numerosi strumenti e manufatti non ritoccati in selce, due lame d'ascia e due asce-scalpelli in pietra levigata.

La Val Rosandra

Ai confini meridionali del Carso Classico italiano è presente l'unico esempio di valle con idrografia superficiale del territorio triestino: la Val Rosandra/Glinščica (Fig. 5.12).

È una valle profondamente incisa in

Fig. 5.12 – La Val Rosandra/Glinščica dalla cima del monte Stena. Sullo sfondo il Golfo di Trieste (foto: F. Finocchiaro).



calcari, marne ed arenarie del Cenozoico dalla morfologia ed idrografia ampiamente condizionate dalla tettonica oltre che dalla litologia, cioè da pieghe, faglie e rocce diverse, su cui l'erosione e la corrosione carsica hanno creato un'idrostruttura particolare. È una delle poche valli fluviocarsiche in Italia ed è un geosito complesso di valenza internazionale. Si tratta di un sito che racchiude al suo interno numerosi altri elementi di specificità geologica quali affioramenti calcarei particolarmente ricchi di Alveoline e Nummuliti, marne ed argilliti intraformazionali, depositi alluvionali e detritici talora cementati, pieghe a corto raggio nel Flysch, imponenti specchi di faglia (la Faglia del Crinale), una cascata ed una forra con marmitte e meandri incassati, una paleofrana ed un corpo di frana antica a grandi massi, un complesso ipogeo a sviluppo chilometrico nel fianco destro ed una caverna ricca di resti animali preistorici in quello sinistro, la sorgente Bukovec e la sorgente carsica dell'Antro di Bagnoli.

Visuali privilegiate della Valle si hanno dalla Vedetta di Moccò e dalla Vedetta di San Lorenzo. Da entrambe sono visibili i versanti che incombono sul torrente Rosandra, quelli in destra del Monte Stena movimentati da scarpate e balze rocciose, strapiombi, guglie, falde di detrito e grandi blocchi mobilizzati, quelli in sinistra impostati sul fianco dell'Anticlinale del Monte Carso e sulla Faglia del Crinale, tutte espressioni di una litologia varia,



Fig. 5.13 – La cascata della Rosandra in condizioni di magra (foto: F. Cucchi).

di una tettonica complessa e di una notevole geodinamicità.

Dalla Vedetta di San Lorenzo si intravedono in sinistra Valle anche l'antica e serpeggiante Via del Sale e la chiesetta di Santa Maria in Siaris, posta all'apice del corpo di una frana di scivolamento planare di strato lungo il fianco settentrionale del Monte Carso. Quest'ultimo, è espressione morfologica di un'anticlinale che verso la pianura evolve in una piega a ginocchio e in un sovrascorrimento sulle torbiditi del Flysch di Trieste.

Ma la Valle è caratterizzata dal torrente Rosandra, le cui acque, sostenute inizialmente dalle marne, dopo Bottazzo/Botač, precipitano in una suggestiva cascata di 30 m che evidenzia il passaggio dal flysch ai calcari (Fig. 5.13).

Dopo la cascata, il torrente scava una profonda forra in roccia, ricca di rapide, marmitte, cascatelle, meandri incassati e vasche. L'alveo cambia spesso direzione seguendo i principali sistemi di fratturazione presenti nella massa rocciosa fino all'abitato di Bagnoli/Boljunec. Lungo il tratto in forra il corso d'acqua è alimentato da numerose piccole sorgenti carsiche. La Valle è anche carsismo ipogeo: il monte Stena ne è un particolarissimo esempio con più di cento cavità esplorate. La Fessura del Vento (930/4139VG) con 143 m di dislivello è la più profonda. La grotta Gualtieri Savi (5080/5730VG), con i suoi 4180 m di lunghezza è quella con lo sviluppo maggiore. Queste due grotte, insieme alla Grotta delle Gallerie (290/420VG) e alla Grotta Martina Cucchi (4910/5640VG) fanno parte di un unico vasto ed articolato complesso di oltre 7 km di sviluppo, risultato di un'evoluzione carsogenetica antica.

La Valle è anche sede di depositi quaternari particolari: di fronte al rifugio CAI, in destra della Rosandra, si eleva una parete subverticale alta una dozzina di metri, costituita da depositi alluvionali torrentizi e di versante più o

meno cementati che rappresenta l'unico affioramento di depositi alluvionali antichi in ambiente carsico della provincia di Trieste.

L'alternanza dei sedimenti a diversa genesi e granulometria, la loro successiva incisione da parte del Torrente, testimoniano la complessità dell'evoluzione geologica dell'area, legata sia alla tettonica che ai cambiamenti climatici plio-quaternari.

A poche centinaia di metri dall'uscita della valle, ai piedi del rilievo del Monte Carso, si apre una fessura obliqua da cui fuoriesce costantemente dell'acqua: si tratta dell'Antro di Bagnoli, cavità che drena le acque carsiche del Monte Carso e dell'Altopiano di San Servolo.

La Caverna Pocala

La Caverna Pocala (173/91VG) è uno dei più interessanti siti paleontologici del Friuli Venezia Giulia. È una cavità protetta, in cui sono stati rinvenuti abbondantissimi resti di animali pleistocenici, soprattutto ossa dell'orso delle caverne (*Ursus speleus*). Si sviluppa per poco più di un centinaio di metri ed è larga da 20 a 40 m. L'ingresso (protetto da una cancellata) si apre in una dolina allungata, residuo di una grotta scopercata come messo in luce da concrezioni presenti sulle pareti. Consta di un'unica galleria inclinata dal fondo accidentato in depositi di riempimento e di crollo su cui sorgono alcune concrezioni. Esplorata per la prima volta nel 1893 da Ludwig Karl Moser e Gio-

vanni Andrea Perko, divenne famosa per l'elevatissimo numero di reperti di orso delle caverne scoperti nelle numerose campagne di scavo. Tra il 1903 e il 1929 scavarono nella cavità importanti protagonisti delle ricerche archeologiche del tempo quali L. K. Moser, Carlo Marchesetti, Eugenio Neumann e Raffaello Battaglia. Dal 1998 il Museo Civico di Storia Naturale di Trieste ha intrapreso nuovi scavi, con l'apertura di una trincea sotto la direzione di Ruggero Calligaris, allora conservatore del Museo, e Gernot Rabeder, dell'Università di Vienna,

raggiungendo gli strati non rimaneggiati che si pensava ormai impossibili da ritrovare.

La composizione faunistica nella cavità è rappresentata per il 97,5% da resti appartenenti all'orso delle caverne e da poche ossa di altri animali. Il leone delle caverne (*Panthera leo spelaea*) è il secondo animale più rappresentato (0,75% dei resti), seguito dai caprini

Fig. 5.14 – La caverna e i depositi oggetto di scavo all'interno della Caverna Pocala (Foto: Museo Civico di Storia Naturale di Trieste, Luciano Gaudenzio e Sandro Sedran)



(*Capra hircus vel Ovis aries*), dai bovini (*Bos taurus*) dal lupo (*Canis lupus*) e dal cervo (*Cervus elaphus*).

Oltre ai resti di animali, nella cavità sono stati trovati numerosi manufatti in selce musteriani, appartenenti cioè alla cultura dei Neanderthal.

La fauna della Pocala, del Pleistocene Superiore, è stata datata a circa 60.000 anni fa sulla base dello studio della dentatura degli orsi delle caverne. Recentemente alcuni reperti sono stati datati con il metodo del radiocarbonio: quattro hanno una datazione superiore a 45.000 anni, che è il limite del metodo di datazione (cioè sono più vecchi di 45.000 anni, ma non si sa di quanto) e un campione invece è datato 36.500-34.500 anni fa.

I reperti della Caverna Pocala sono esposti al Museo Civico di Storia Naturale di Trieste (<http://www.museo-storianaturaletrieste.it/>).

BIBLIOGRAFIA E ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO

ARBULLA D. (2017) – *Ritrovamenti paleontologici. Il sito del Villaggio del Pescatore*. Atti Mem. Comm. Grotte “E. Boegan”, 47, 87-107.

BATTAGLIA R. (1930) - *Notizie sulla stratigrafia del deposito quaternario della caverna Pocala di Aurisina (campagne di scavo negli anni 1926 e 1929)*. Istituto italiano di speleologia, gennaio-marzo, Le Grotte d'Italia, 4 (1), A. VIII, pag. 17-44.

BARTHLOTT W., LAUER W., PLACKE A. (1996) - *Global distribution of species diversity in vascular plants: towards a world map of phytodiversity*. Erdkunde, 50 (4), pp. 317-327.

CHIARENZA A.A., FABBRI M., CONSORTI L., MUSCIONI M., EVANS D.C., CANTALAPIEDRA J.L., FANTI F. (2021) – *An Italian dinosaur Lagerstätte reveals the tempo and mode of hadrosauriform body size evolution*. Scientific Reports, 11, 23295.

CHUBB, L. (1945). *National Geological Reserves in England and Wales*. Conference on Nature Preservation in Post-War Reconstruction. Natural History Survey of Great Britain, pp. 1-45. Londra: The Society for the Protection of Nature Reserves.

CONSORTI L., ARBULLA D., BONINI L., FABBI S., FANTI F., FRANCESCHI M., FRIJIA G., PINI G.A. (2021) – *The Mesozoic paleoenvironmental richness of the Trieste Karst*. Geological Field Trips & Maps, 13, 2.2.

CUCCHI F., FINOCCHIARO F., MUSCIO G. (a cura di), (2009) *Geositi del Friuli Venezia Giulia*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (ed.), Tipografia Arti Grafiche Friulane/Imoco spa, Udine; 383 pp.

CUCCHI F., ZINI L., CALLIGARIS C. (2015) - *Le acque del Carso Classico*, Progetto HYDROKARST. EUT, ISBN 978-88- 8303-621-7.

DALLA VECCHIA F.M. (2009) - *Tethyshadros insularis, a new Hadrosauroid dinosaur (Ornithischia) from the Upper Cretaceous of Italy*. J. Vertebrat. Paleontol., 29, 1100-1116.

DALLA VECCHIA F.M. (2020) - *The Unusual Tail of Tethyshadros Insularis (Dinosauria, Hadrosauroidea) from the Adriatic Island of the European Archipelago*. Riv. Ital. Paleontol. S., 126, 583-628.

GEREMIA F. & BENTIVENGA M. (2013) - Geoconservazione: principi di base e rilevanza sociale *Geologia dell'Ambiente*, N. 3/2013, pp. 27-32.

LAZZARO G. (2003) - *La popolazione di Ursus spelaeus della Grotta Pocala*. Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Trieste, n. 49 (suppl.), pag. 59-78

MARCHESETTI C. (1907) - *Relazione sugli scavi paleontologici eseguiti nel 1904 dal dr. Carlo Marchesetti*. Bollettino della Società Adriatica di Scienze Naturali in Trieste, 23, pp. 233-235.

MARCHESETTI C. (1908) - *Relazione sugli scavi preistorici eseguiti nel 1905*. Bollettino della Società Adriatica di Scienze Naturali in Trieste, 24, pp. 185-187.

PARONUZZI P., ARBULLA D. (2019) - *Guerra tra archeologi. Le ricerche di L.K. Moser nelle grotte del Carso*. Comune di Trieste, pag. 174

ProGEO (2011) - *Conserving our shared geoheritage: a protocol on geoconservation principles, sustainable site use, management, fieldwork, fossil and mineral collecting*. [www].10 pp,

PROSSER C., MURPHY M., LARWOOD J. (2006) *Geological conservation. A guide to good practice*. English Nature, 70 pp.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA (2021) - *Geodiversità e catasto dei geositi*; <https://www.regione.fvg.it/rafvfg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/geologia/FOGLIA06/>

ROSSI M., SANTI G. (2015) - *Observation on the Ursus gr. spelaeus remains from the Pocala cave (Trieste, Friuli Venezia Giulia, N. Italy)*. Revue de Paléobiologie, Genève, n. 34, pp. 77-84.

SHARPLES, C., 1992: *Geology; Geomorphology; In: Harries, D.N. (ed.), Forgotten Wilderness: North West Tasmania; A Report to the Australian Heritage Commission by the Tasmanian Conservation Trust Inc., Hobart*, pp. 95-125 & 127 - 163

TESTA A., ROMANDINI M., ARBULLA D., BENAZZI S. (2022) - *Analisi tafonomica preliminare di un campione di resti di orsi delle caverne della Caverna Pocala (Duino-Aurisina, TS) nel Carso triestino*. Atti del Museo Civico di Storia Naturale di Trieste, n. 63, in stampa.

WIMBLEDON W.A.P., BENTON M.J., BENVIS R.E., BLACK G.P., BRIDGLAND D.R., CLEAL C.J., COOPER R.G. & MAY V.J (1995) - The development of a British methodology for selection of geological sites for conservation: Part 1. *Modern Geology*, 20, pp. 159-210.

WIMBLEDON W.A.P. (1996) *Geosites – a new conservation initiative*. *Episodes*, 19,3, pp. 87-88.

WIMBLEDON W.A.P., ANDERSENS., CLEAN C.J., COWIE J.W., ERIKSTEAD L., GEONGRIJP G.P., JOHANSON C.E., KARIS L.O. & SUOMMEN V. (1999) - Geosites. A global comparative site inventory to enable prioritisation for conservation. In: *Second Int. Symp.on the conservation of our Geological Heritage/world heritage: Geotope conservation world-wide, European and Italian experiences*. *Mem. Descr. Cart. Geol. It., Serv. Geol. It.*, pp. 45-60.

ZINI L., CALLIGARIS C., CUCCHI F. (2022) - *Along the hidden Timavo*. *Geol. F. Trips Maps*, 14 (1.3), 69 pp., (<https://doi.org/10.3301/GFT.2022.03>), ISSN: 2038-4947.

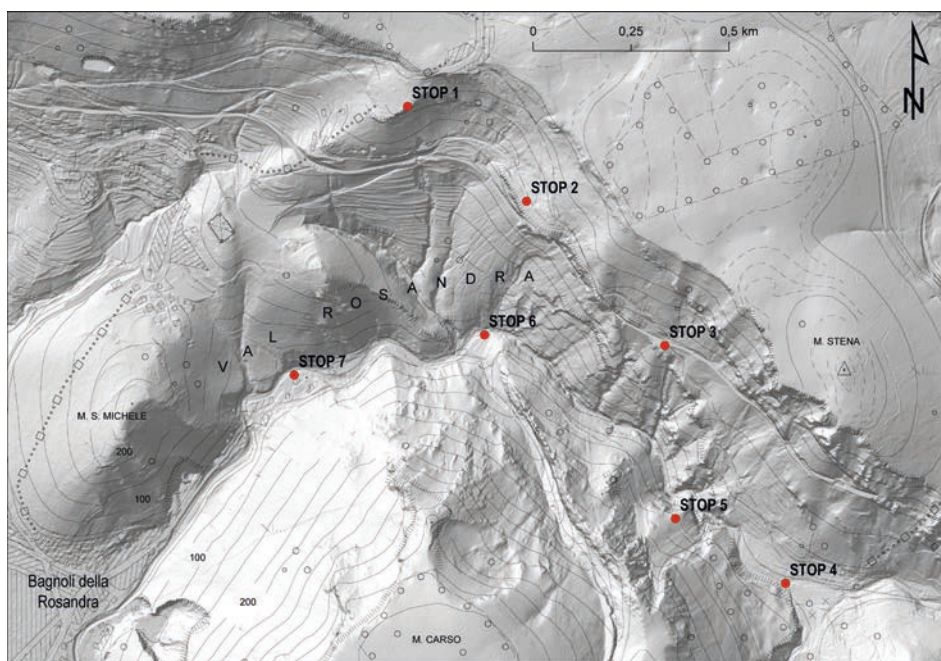
6. ITINERARI GEODIDATTICI NEL GEOPARCO

6.1 Itinerario 1: La Val Rosandra

La Val Rosandra, sita ai confini meridionali del Carso Classico italiano è l'unico esempio di valle fluviocarsica con idrografia superficiale del territorio triestino. È una delle poche in Italia ed è un geosito complesso di valenza internazionale, si tratta cioè di un sito che racchiude numerosi altri elementi di specificità (cascata e forra, paleofrana, complesso ipogeo del Monte Stena, marne e argilliti, sorgenti dell'Antro di Bagnoli, sorgente Bukovec, faglia del Crinale, depositi alluvionali e detritici, Caverna degli

Orsi). È una valle profondamente incisa in calcari del Terziario, dalla morfologia condizionata dalla tettonica e dalla litologia, cioè da faglie e da rocce diverse su cui l'erosione selettiva ha creato un'idrostruttura particolare.

L'escursione prevede un primo STOP in corrispondenza della Vedetta di San Lorenzo da cui è possibile godere del panorama dell'intera Valle. La discesa verso Bottazzo permette di entrare poi in contatto con le marne e le argilliti e con la vista della grande frana su cui sorge la chiesetta di San-



ta Maria in Siaris. Dopo aver camminato sul Flysch di Tireste in corrispondenza dello STOP 4, la passeggiata in Valle prosegue verso la Fonte Oppia e i depositi quaternari antistanti il rifugio Premuda, ultima tappa del percorso proposto.

Fig. 6.1 Mappa con l'inquadramento dell'escursione proposta e in rosso i relativi STOP. (Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS, base catalogo IRDAT - RAFVG).

Stop 1 – La Vedetta di San Lorenzo

Una visuale privilegiata della Valle si ha sia dalla Vedetta di Moccò che dalla Vedetta di San Lorenzo. Da entrambe sono visibili i versanti che incombono sul torrente Rosandra, tutti movimentati da scarpate e balze rocciose, strapiombi, guglie, falde di detrito e grandi blocchi mobilizzati, espressioni di una litologia varia, di una tettonica complessa e di una notevole geodinamicità. Sono infatti le numerose faglie che imprimono ai versanti alta energia, consentendo all'erosione selettiva ed al carsismo di esacerbare le forme.

Nei dintorni della Vedetta di San Lorenzo affiorano i Calcari ad Alveoline e Nummuliti, risalenti all'Eocene inferiore in cui sono visibili, anche ad occhio nudo, numerosi fossili di organismi marini. Tra essi, grosse alveoline, foraminiferi bentonici tipici delle piattaforme carbonatiche cenozoiche di tutto il mondo. I Calcari ad Alveoline e Nummuliti testimoniano una fase dell'evoluzione della paleogeografia dell'area del Carso in cui la sedimentazione carbonatica in acque basse avveniva mentre la catena Dinarica era già in sollevamento più a nord est.





Fig. 6.3 Sezione geologica della Valle. In corrispondenza del monte Stena sono stati messi in evidenza i sistemi ipogei. In arancione scuro le marne e argilliti, in arancione chiaro i calcari, in rosso gli elementi strutturali. In viola la Grotta Savi, in rosso la Grotta delle Gallerie, in blu la Grotta Martina Cucchi e in verde la Fessura del Vento. (Modificato da: Cucchi et al., 2012)

Fig. 6.2 Panoramica della Val Rosandra (la Valle) scattata dalla Vedetta di San Lorenzo. A destra dell'immagine il monte Carso con il solco vallivo in cui affiora il Flysch di Trieste, testimonianza della "faglia del Crinale"; a sinistra il monte Stena e le gradonate carbonatiche (evidenziate dalla linea gialla). (Foto: Franco Cucchi)

Stop 2 – Le marne e argilliti

Dalla vedetta di San Lorenzo, nei pressi della Trattoria Al Pozzo, si scende lungo il sentiero che porta a Bottazzo, dopo una decina di minuti di camminata, si raggiunge il secondo STOP.

Già poco dopo avere imboccato il sentiero affiorano marne e argilliti di colore prevalentemente grigio

o marroncino. Queste rocce sono chiaramente più erodibili dei Calcari a Nummuliti ed Alveoline e appaiono sottilmente stratificate. L'aspetto stratificato ed intensamente suddiviso dipende sia dall'originale stratificazione, sia dal clivaggio cioè dalla fratturazione dovuta alle deformazioni avvenute durante il sollevamento della catena. Le rocce marnose e argillose, infatti, essendo meno competenti dei calcari e più fittamente stratificate sono interessate da deformazione in modo particolarmente intenso. Le marne e argilliti testimoniano un aumento significativo della batimetria e la fine della sedimentazione carbonatica di mare basso nell'area nel Lutetiano (Eocene). Questo fenomeno

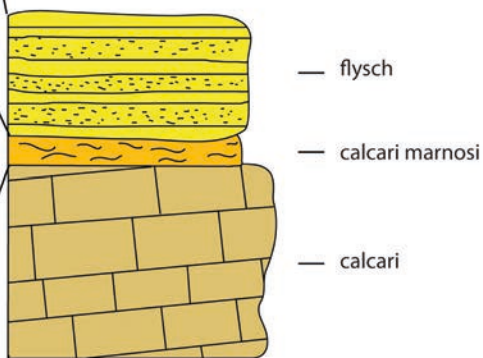


Fig. 6.4 La successione stratigrafica. (Cucchi et al., 2012)

dagli stratigrafi viene chiamato annessamento.

Le marne e le argilliti non affiorano in maniera continua nell'area del Carso e sono soggette a significative variazioni di spessore. Da un punto di vista paleontologico contengono foraminiferi planctonici (Globigerine) che testimoniano l'aumento della profondità dell'ambiente sedimentario. Inoltre, è presente una significativa proporzione di materiale terrigeno (di provenienza, cioè, continentale) che testimonia l'attivo sollevamento della catena e prelude all'arrivo del-

le torbiditi del Flysch di Trieste. Le marne e argilliti, dal punto di vista stratigrafico, si trovano quindi tra i Calcari ad Alveoline e Nummuliti e la facies torbiditica più tipica del Flysch di Trieste, per cui sono anche dette Strati Transizionali. Quando il sentiero si ricongiunge alla strada che scende a Bottazzo, quest'ultima corre su uno spalto naturale dove è particolarmente evidente l'annegamento della piattaforma cenozoica. Le marne e argilliti, infatti, poggiano con contatto, apparentemente, netto sui Calcari ad Alveoline e Nummuliti. Il versante,



Fig. 6.5 Uno degli affioramenti di marne e argilliti che si possono ammirare lungo il percorso. (Foto: Franco Cucchi)

modellato nelle marne, più recessive, ha pendenza relativamente dolce, mentre i calcari danno luogo a pareti verticali.

Stop 3 – Casello Modugno

Procedendo lungo la strada asfaltata in direzione Bottazzo, si giunge al Casello Modugno, ex casello ferroviario sito lungo la linea Trieste – Erpelle - Lubiana. Da qui è possibile ammirare il versante in sinistra del torrente Rosandra. Quasi di fronte al casello, è visibile la chiesetta di Santa Maria in Siaris posta all'apice del corpo di un'antica frana generatasi per scioglimento planare di strato lungo il fianco settentrionale del Monte Carso. Quest'ultimo, per inciso, è l'espres-

sione morfologica del fianco di un'anticlinale che verso la pianura evolve in una piega a ginocchio, a sua volta sovrascorsa sulle torbiditi del Flysch di Trieste.

Anche nei pressi del Casello Modugno, in direzione Trieste, è possibile osservare il passaggio tra i Calcari ad Alveoline e Nummuliti e le marne e argilliti poste alla base del Flysch di Trieste.

Fig. 6.6 Panoramica dal Casello Modugno della paleofrana. All'apice, la chiesetta di Santa Maria in Siaris. (Foto: Franco Cucchi)



Fig. 6.7 Strati verticalizzati di flysch in corrispondenza dell'alveo del torrente Rosandra.
(Foto: Chiara Calligaris)



Stop 4 – Ponte sul Rosandra

La strada porta poi all'abitato di Bottazzo ed in prossimità del confine con la Slovenia si attraversa il torrente Rosandra, corso d'acqua guidato in grande da una sinclinale al cui nucleo vi sono le marne ed arenarie e che ha origine dalla confluenza di due corsi d'acqua, le cui sorgenti si trovano in Slovenia: il rio Grisa ed il torrente Rosandra.

Qui affiorano e si possono osservare le areniti, peliti e argilliti del Flysch di Trieste. Si tratta della facies più tipica di questa unità litostratigrafica che caratterizza in larga parte l'area dove sorge la città.

I flysch sono costituiti da torbiditi, ossia dalle rocce derivanti dall'accumulo di frane sottomarine scivolote nel bacino di avanfossa. Un evento di frana sottomarina porta all'accumulo di sedimenti che possono dare origine a una tipica "sequenza di Bouma" che, in termini molto semplificati, alla base registra l'arrivo della frazione più grossolana e progressivamente il depositarsi dei sedimenti via via più fini.

Dal punto di vista litologico il Flysch di Trieste è costituito da arenarie, peliti e argilliti in proporzioni variabili. Il contenuto paleontologico, non particolarmente abbondante, è in prevalenza costituito da foraminiferi

planctonici e nannoplankton. Spesso sono presenti accumuli di frustoli carboniosi che testimoniano la presenza di un ambiente continentale ai margini del bacino in cui le torbiditi si depositavano. Si osservano anche bioturbazioni e altre tracce fossili, dette *casts*, che in inglese significa "stampi", dovute all'effetto di erosione prodotto da una frana sottomarina sui sedimenti sottostanti e al successivo riempimento delle depressioni prodotte da parte del sedimento trasportato dalla torbida stessa. Ne consegue che i *cast*, di vario tipo come *flute casts* e *groove casts*, hanno rilievo negativo e indicano la polarità della successione, cioè qual è la parte inferiore di uno strato di arenaria. I "cast" forniscono inoltre indicazioni sulle direzioni dei flussi delle correnti di torbida. Sulla base del contenuto paleontologico, il Flysch di Trieste è stato datato al Luteziano (Eocene).

Stop 5 – La cascata e i complessi ipogei

Proseguendo verso valle, superata un'imponente falda detritica sovralimentata e quindi in precario equilibrio geostatico, ci si ferma lungo il sentiero ad ammirare il torrente Rosandra, le cui acque, sostenute dalle marne precipitano in una suggestiva cascata di 30 m che evidenzia il passaggio dal flysch ai termini calcarei sottostanti.

Dopo la cascata, il torrente scava una profonda forra in roccia, ricca di ra-

pide, marmitte, cascatelle, meandri incassati e vasche. L'alveo cambia continuamente di direzione seguendo i principali sistemi di fratturazione presenti nella massa rocciosa fino all'abitato di Bagnoli della Rosandra. Durante il suo percorso verso valle, lungo il tratto in forra, il corso d'acqua è alimentato da numerose piccole sorgenti carsiche.

Da questa posizione si ha una visione privilegiata del monte Stena in cui, date le peculiari caratteristiche geologiche e geomorfologiche e la storia geologica, si aprono imponenti fenomeni di carsismo ipogeo. Andando più nel dettaglio, sono state esplorate una cinquantina di cavità che si sviluppano per quasi 20 km complessivi. La Fessura del Vento con 143 m di dislivello è la più profonda. La grotta Gualtiero Savi, con i suoi 4180 m di lunghezza è quella con lo sviluppo più lungo. Le due grotte, insieme alla Grotta delle Gallerie e alla Grotta Martina Cucchi, vanno considerate come facenti parte di un unico vasto ed articolato complesso di oltre 7 km di sviluppo, risultato di un'evoluzione carsogenetica antica, guidata dalle passate condizioni geologiche ed ambientali. La maggioranza dei tratti di cavità è riconducibile ad antiche condotte carsiche a pieno carico che drenavano le acque indirizzandole all'interno del massiccio verso nord e nord-est. È difficile stabilire dimensioni e forme del territorio che costituiva un tempo il bacino di

alimentazione di queste acque, ma all'interno del massiccio sono riconoscibili ben quattro livelli di incarsimento, con cavità sviluppate a quote via via decrescenti ed ubicate fra quota circa 400 m e quota circa 220 m s.l.m. Nella Grotta Savi, nella Fessura del Vento e nella Grotta delle Gallerie sono presenti morfologie dirette quali *scallops* e condotte freatiche a pieno carico che indicano totale riempimento dei vani da parte delle acque, e sia sulle pareti che sulla volta si rinvengono depositi alluvionali anche grossolani più o meno cementati che a loro volta indicano fasi alterne di riempimento e svuotamento delle gallerie. Le dimensioni dei vani, con gli *scallops* che suggeriscono portate complessive superiori ai 10 m³/s, e i sedimenti, costituiti da sabbie e ciottoli provenienti dalle aree in cui affiorava il flysch, indicano flussi idrici notevoli, tumultuosi con continuo evolversi delle condizioni esterne. Un rapido e significativo abbassamento del livello di base ha poi fatto partire un'importante fase erosiva ipogea che ha generato i meandri e le forre dei rami inferiori nella Grotta Savi ed una serie di approfondimenti nella Fessura del Vento e nella Grotta delle Gallerie.

Di grotte però non ce ne sono esclusivamente nel monte Stena, ma anche all'interno del monte Carso. Tra le altre, si ricordano, la Grotta degli Orsi e l'Antro di Bagnoli. La prima di queste cavità, non accessibile perché protetta, ospita fra le concrezioni i resti os-

sei di una fauna preistorica risalente al Pleniglaciale würmiano con orsi spelei e le loro prede, con tracce di frequentazione di leoni, leopardi e di cacciatori neandertaliani.

L'Antro di Bagnoli (76/105VG) è una interessante risorgiva carsica che fuoriesce da un'unica fenditura subverticale raggiungibile facilmente da una stradina che dalla piazza al centro dell'abitato porta alle pendici del monte Carso. La risorgiva è condizionata dalla piega a ginocchio che verticalizza i calcari ad Alveoline e Nummuliti che favoriscono il drenaggio preferenziale mentre le marne transizionali ed il Flysch fungono da livello impermeabile. La cavità si addentra nel rilievo per una decina di metri e termina in un sifone meta di speleobacquei. La sorgente drena le acque del sovrastante altopiano tramite gli inghiottitoi di Becca e Occisla in Slovenia.

Stop 6 – La Fonte Oppia

Continuando lungo il sentiero, si attraversa il corpo di frana recente della chiesetta di Santa Maria in Siaris, mentre a destra, si possono osservare le balze rocciose del fianco del monte Stena legate alle faglie inverse favorite dalle marne transizionali, cercando gli ingressi delle cavità utilizzate fin dalla preistoria per il controllo dei traffici lungo la cosiddetta Via del sale (che è quella che si sta percorrendo). Si abbandona il sentiero per scendere al greto ove da una serie di fratture



sgorga l'acqua dolce della Fonte Oppia, un tempo utilizzata per l'acquedotto romano che alimentava Trieste.

Si riprende la Via del sale e si supera un tratto in cui affiorano le marne ed arenarie a giacitura sub-verticale che hanno favorito la Faglia del Crinale sul fianco settentrionale dell'anticlinale del monte Carso (vedi sezione geologica STOP 1).

Stop 7 – I depositi quaternari del rifugio Premuda

Si continua la discesa per giungere allo STOP 7 costeggiando i resti dell'acquedotto romano e lembi di detrito di falda cementato alternati ad affioramenti di calcari terziari.

Di fronte al rifugio CAI, in destra del torrente si eleva una parete subverticale, costituita da depositi alluvionali e di versante più o meno cementati che rappresenta l'unico affioramento di depositi alluvionali antichi in ambiente carsico della provincia di Trieste. L'erosione del torrente ha messo in luce una scarpata sub verticale alta quasi 12 metri, costituita da un'alternanza di livelli limoso argillosi rossastri, talora con limiti erosivi, e livelli di ghiaie e ciottoli con clasti calcarei ed arenacei da sub-angolari a sub-arrotondati in matrice limoso sabbiosa. In uno dei livelli grossolani sono

anche presenti rari blocchi calcarei decimetrici.

La sequenza dei livelli, testimonia intense fasi di trasporto, alternate a fasi di dinamica fluviale più attenuate e a fasi di crolli. L'evoluzione temporale di processi fluviali e gravitativi così diversi per intensità testimonia come il variare delle fasi climatiche quaternarie e i processi di neotettonica influenzino i processi di accumulo dei sedimenti.

Il confronto tra dati granulometrici e mineralogici ha portato ad identificare tre unità:

Unità basale, al piede della scarpata: livelli alluvionali di media ed alta energia alternati a livelli detritici calcarei. La datazione di un frammento vegetale proveniente dall'unità basale indica un'età maggiore di 45.000 anni BP.

Unità intermedia, caratterizzata da depositi fini in cui si alternano livelli detritici e gravitativi a depositi alluvionali, che termina con un livello a blocchi.

Unità superiore, in cui sono nuovamente presenti depositi alluvionali di alta energia.

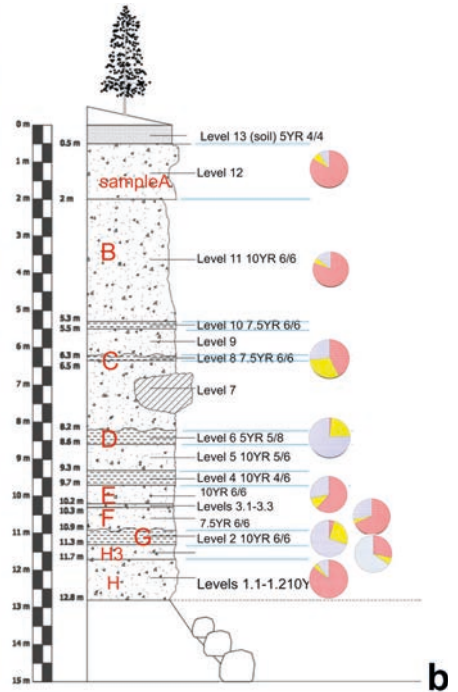


Fig.6.9 I depositi quaternari del rifugio Premuda. Nei diagrammi a torta in rosso le ghiaie, in giallo le sabbie, in grigio i fanghi. (Tratto da: Furlani et al., 2015)

BIBLIOGRAFIA E ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO

BORSATO A., CUCCHI F., FRISIA S., MIORANDI R., PALADINI M., PICCINI L., POTLECA M., SAURO U., SPOTL C., TUCCIMEI P., VILLA I.M., ZINI L. (2005) *Ricostruzione climatica degli ultimi 17.000 anni da una stalagmite della Grotta Savi (Trieste, Italia)*. Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol., 80, 111-125.

CUCCHI F., MEREU A., OBERTI S., PIANO C., ROSSI A., ZINI L. (2005) *Geology and geomorphology of the "Rosandra" valley for a cultural enhancement*. Il Quaternario-Italian Journal of the Quaternary Sciences 18/1, 183-194.

CUCCHI F., RICCAMBONI R., BANDI E. (Ed.) (2012) *Acqua e vita nelle grotte della Val Rosandra*. LINT editoriale, Trieste, ISBN: 978-88-8190-281-1, 141 pp.

FURLANI S., FINOCCHIARO F., BOSCHIAN G., LENZA D., BIOLCHI S., BOCCALI C., MONEGATO G. (2015) Quaternary evolution of the fluviokarst Rosandra Valley (Trieste, NE Italy). Available online <http://amq.aiqua.it>. ISSN (print): 2279-7327, ISSN (online): 2279-7335.

STOYKOVA D., SHOPOV Y., SAURO U., BORSATO A., CUCCHI F., FORTI P. (2003) *High-resolution luminescence speleothem records from Savi Cave, Trieste, NE Italy*. Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol., 80, 169-173.

ZINI L., VISINTIN L. CUCCHI F., BOSCHIN W. (2011) *Potential impact of a proposed railway tunnel on the karst environment: the example of Rosandra valley, Classical Karst Region, Italy-Slovenia*. Acta Carsologica, 40/1, 207-218.

6.2 Itinerario 2: Da Padriciano a Borgo Grotta Gigante

Il percorso proposto è pensato per avere una durata giornaliera e si sviluppa nel settore orientale del Carso Classico Italiano, da Padriciano a Monrupino fino a rientrare, al termine dell'escursione con l'ultima fermata presso Prosecco, sulla strada Napoleonica. Prevede nel suo complesso sei fermate (STOP) ciascuna delle quali dà la possibilità all'escursionista curioso di ammirare alcune delle peculiarità che rendono l'area un patrimonio geomorfologico e geologico importante e che le hanno fatto meritare l'appellativo di Carso Classico

italiano. È un viaggio inizialmente a ritroso nel tempo attraverso la storia geologica di questa porzione di territorio che parte dall'osservare gli affioramenti dei Calcari Liburnici a Padriciano, visibili in corrispondenza di un intaglio autostradale per poi spostarsi verso le rocce più antiche della successione: i Calcari di Aurisina con la parte inferiore dell'unità, quella caratterizzata da morfologie spettacolari come i torrioni di Monrupino. Si scopre poi la parte sommitale di quest'ultima formazione, quella maggiormente carsificata, ammirando gli splendidi campi solcati di Borgo Grotta Gigante, geosito di inte-



resse internazionale. L'ultimo STOP è meno geologico-stratigrafico-geomorfologico ma più strutturale: lungo la strada Napoleonica affiorano infatti i Calcarei ad Alveoline e Nummuliti (l'unità stratigrafica più recente incontrata durante l'intera escursione) che sono stati verticalizzati dallo sovrascorrimento del Carso, un importante lineamento tettonico orientato in direzione NW-SE.

Stop 1 – Intaglio stradale nei pressi dell'Area di Ricerca

Il punto di partenza dell'escursione è previsto presso il parcheggio sterrato del Parco Globojner nelle vicinanze dell'Area di Ricerca a Padriciano.

L'intaglio stradale realizzato per lo svincolo dell'uscita "Padriciano" dell'Autostrada rappresenta uno dei più ampi e continui affioramenti della successione carbonatica del Carso Classico italiano: la sezione di Padriciano. La giacitura delle rocce è verso sudovest, dunque le rocce più antiche si trovano nella parte nord-est dell'affioramento, verso l'Area di Ricerca e quelle recenti verso sudovest, in direzione Trieste.

Le rocce nella prima parte della sezione appartengono ai Calcarei Liburnici.

Questa unità litostratigrafica presenta età Cretacico superiore – Paleocenica e rappresenta una fase nell'evoluzione del paleo ambiente del Carso caratterizzata da condizioni di mare basso (profondità di pochi metri) in cui erano frequenti episodi di emersione o vicine all'emersione. Le rocce sono in prevalenza calcaree scure, talora laminati, e in subordine sono presenti livelli marnosi/argillosi che tendono a divenire meno frequenti verso l'alto (stratigrafico). Frequenti sono gli accumuli di organismi bentonici (foraminiferi, ostracodi, gasteropodi, alghe dasicladali, coralli solitari) e le evidenze di ambiente paràlico (ossia caratterizzato da alterne e reciproche influenze di acque continentali e marine) quali presenza di *Microcodium*, oltre a livelli di breccie sedimentarie mono- e poligeniche. Ai Calcarei Liburnici seguono, con passaggio transizionale, ma rapido, i Calcarei ad Alveoline e Nummuliti di età Paleocene superiore – Eocene inferiore. Da un punto di vista dell'osservazione macroscopica, l'evidenza del passaggio a questa unità è rappresentata dalla comparsa di foraminiferi che sono visibili ad occhio nudo ed anche all'osservazione con la lente appaiono di grandi dimensioni. I più caratteristici sono appunto i foraminiferi bentonici alveolinidi ("Alveoline"), talora riconoscibili per la loro struttura caratterizzata da avvolgimenti concentrici di camere circolari e i nummulitidi ("Nummuliti"), che invece si presentano come "lenticchie" e, in sezione, come forme

Fig. 6.10 Mappa con l'inquadramento dell'escursione proposta e dei relativi STOP. (Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS, base RAFVG)

a losanga più o meno schiacciata. Da un punto di vista ambientale, l'evoluzione generale rappresentata dal passaggio dai Calcarei Liburnici ai Calcarei a Nummuliti descrive un progressivo approfondimento dell'ambiente con ritorno di condizioni francamente marine. Nel quadro dell'evoluzione paleo-tettonica dell'area del Carso questo approfondimento si collega al generale e progressivo aumento della subsidenza connesso all'avanzare, da nord-est, della Catena Dinarica, in sollevamento fin dal Cretacico superiore.

È opportuno menzionare che nella sezione di Padriciano era affiorante fino a pochi anni fa il passaggio tra il Cretacico e il Paleogene (K/Pg) in uno dei pochi casi al mondo in cui questo è registrato in rocce depositate in ambienti marini di acque basse.

I lavori di realizzazione dello svincolo autostradale hanno ben esposto i calcari al di sopra del limite K/Pg, ma, sfortunatamente, hanno portato alla sua copertura.

Verso l'imbocco dell'autostrada, ma in area di complicata accessibilità perché situata sulla rampa di uscita, affiorano calcari di età cretacica caratterizzati dalla presenza di rudiste e di faune a foraminiferi che contengono *Raphydionina liburnica*, un foraminifero tipico del Cretacico sommitale, entrambe estinte al passaggio K/Pg. Dopo un intervallo di alcune decine di metri in cui non affiorano rocce, si trovano poi calcari scuri

che presentano faune tipicamente Paleoceniche.

Stop 2 – Cave di Zolla

Dal parcheggio del Parco Globojner, con la macchina, si raggiunge Opicina, per proseguire verso il valico di Monrupino. In prossimità dell'abitato di Zolla (a sud di Col), si svolta a destra lungo la strada che porta all'autoporto di Ferneti. Appena superato il ponte sulla ferrovia si parcheggia per raggiungere, sulla sinistra, una stradina sterrata che conduce a delle cave abbandonate.

Queste si aprono nella porzione basale dei Calcarei di Aurisina, questi ultimi abbondantemente utilizzati come pietra ornamentale e da costruzione. Nel tempo i cavaatori hanno dato alle varietà cavate nomi che sono divenuti tradizionali come ad esempio Aurisina Fiorito, Fior di mare, Granitello e Repen.

I Calcarei di Aurisina sono una potente successione di rocce calcaree del Cretacico superiore derivanti da sedimenti depositati in ambiente di piattaforma carbonatica quando l'area del Carso si trovava a latitudini tropicali ed era occupata da un mare poco profondo (fino a poche decine di metri). Da un punto di vista paleontologico, l'elemento più tipico dei Calcarei di Aurisina è la presenza, talora molto abbondante, di fossili di rudiste, grandi bivalvi a guscio spesso che nel Cretacico fiorirono nei mari con acque calde. L'accumulo di gusci di rudiste fu così abbondante

che esse assunsero ruolo litogenetico, ossia esistono rocce che sono in gran parte costituite da frammenti di gusci di questi molluschi. Nel Calcari di Aurisina le rudiste si presentano prevalentemente in accumuli in cui i gusci sono disarticolati e frammentati, talora invece si rinvencono esemplari integri e in posizione di vita. Le rudiste sono particolarmente abbondanti e di grandi dimensioni nella porzione superiore della successione. La parte inferiore dell'unità, invece, è caratterizzata da esemplari di minori dimensioni (requienidi) e da *Chon-*

drodonta joannae, un altro genere di grandi bivalvi con guscio piatto e di aspetto "palmato" che possono raggiungere diversi centimetri di lunghezza.

A Zolla, sugli antichi fronti di cava, oggi in parte utilizzati come palestra

Fig. 6.11 Calcari Liburnici (di età paleoce-nica) nella sezione di Padriciano. Nell'immagine è ben visibile la stratificazione inclinata di circa 40° verso Sud Ovest (verso il mare), di potenza variabile che può raggiungere anche il metro di spessore. (Foto: Marco Franceschi)



di roccia, si notano alcune cavità sub-verticali (risultato di anastomosi di pozzi impostati su fratture persistenti) e fossili di rudista. La massa rocciosa è generalmente poco suddivisa dalla stratificazione sub orizzontale, spesso indistinta, e da due famiglie di fratture sub verticali.

Stop 3 – I torrioni di Monrupino

Saliti in macchina, ci si trasferisce poco distante presso il monumento ai caduti scolpito nel cosiddetto “Torrione di Monrupino”, *hum* residuale. Con una breve passeggiata nella bo-

scaglia, si raggiungono alcuni torrioni ed alcuni fronti di cave abbandonate. I torrioni sono grandi blocchi di pietra, molto resistenti alla degradazione, alti più di 10 metri, costituiti da calcari brecciati facenti parte dei Calcari di Aurisina. Rappresentano una testimonianza davvero unica in quanto relitti delle antichissime superfici carsiche, evidentemente molto più elevate di quanto non lo siano ai nostri giorni. I blocchi sono rimasti isolati per l'azione dissolutiva delle acque meteoriche sulle rocce circostanti, maggiormente solubili.

Fig. 6.12 Mappa con gli STOP della zona di Monrupino. STOP 2: Cave di Zolla; STOP 3: Torriani di Monrupino; STOP 4: Rocca di Monrupino (Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS, base catalogo IRDAT - RAFVG).

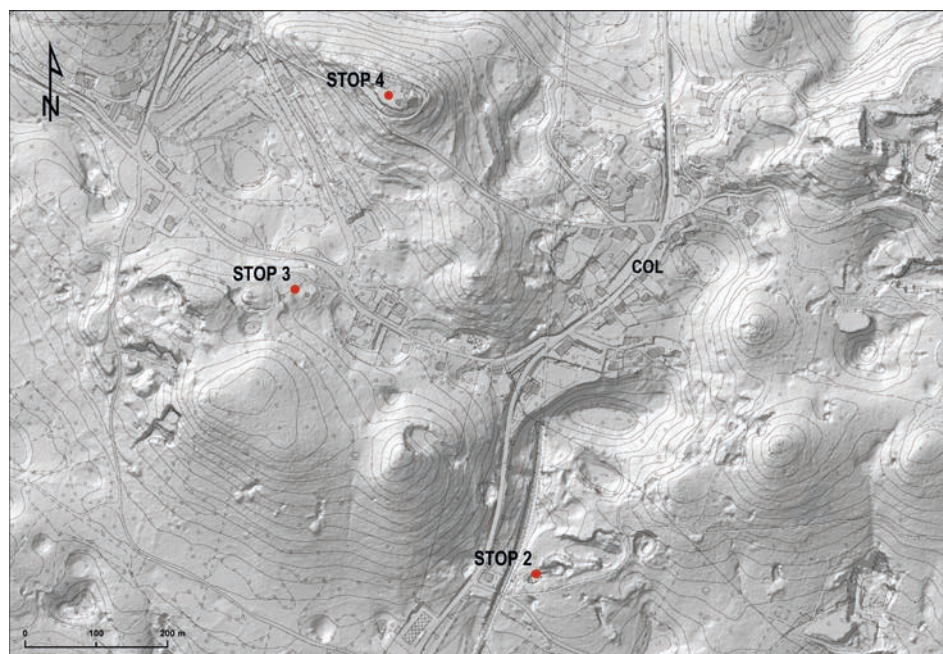
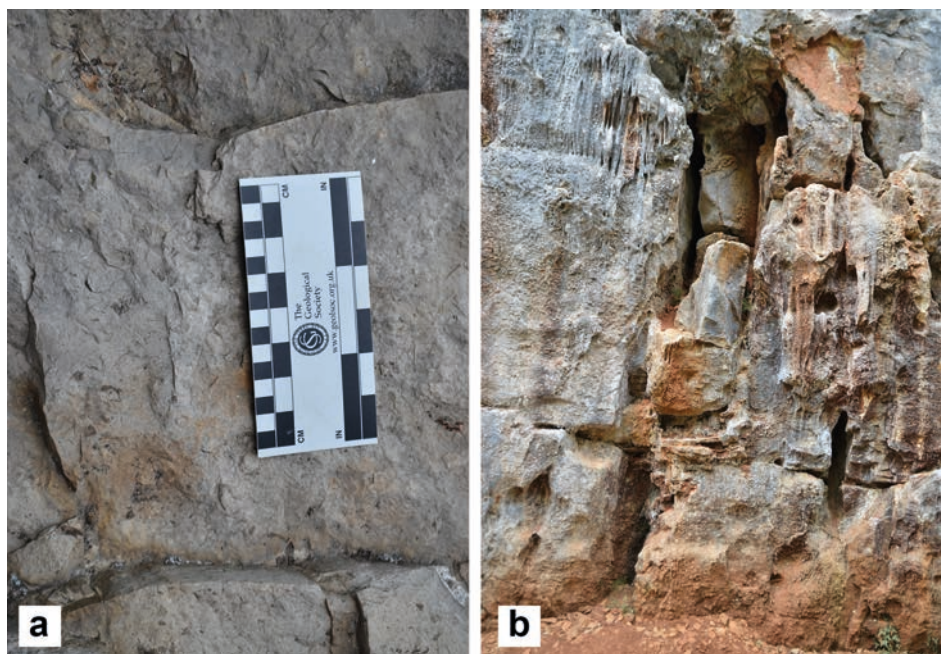


Fig. 6.13 a) Dettaglio dei calcari di Aurisina con gusci e frammenti di guscio di rudista; b) cavità sub-verticali su frattura. Le patine rossastre sono date da veli calcitici ricchi in ossidi di Fe e Mg e le stalattiti parietali sono forme da gocciolio lungo la parete asportata dai cavaatori. (Foto: Furio Finocchiaro)



La rigogliosa vegetazione arbustiva della boscaglia carsica tende a svilupparsi in prossimità di questi monumenti naturali, avvolgendoli e talora limitandone la visuale. In taluni casi gli arbusti si sviluppano anche sui torrioni stessi, allargando le fratture e contribuendo alla loro progressiva disgregazione. Passeggiando lungo il sentiero, immersi nella vegetazione, ci si rende conto della presenza di queste strutture che vanno a costituire quella che può essere definita una “città di roccia”. Le singole strutture carbonatiche infatti sembrano essere delle villette isolate che, tutte assieme, assumono le sembianze di un

quartiere cittadino. I calcari affioranti e costituenti il tozzo rilievo allungato NW-SE, fanno parte della facies basale dei Calcari di Aurisina, in letteratura denominata “Calcari di Zolla” o semplicemente “Repen”, anch’essa ampiamente utilizzata come pietra da costruzione e per usi domestici poiché particolarmente resistente agli agenti atmosferici. La vegetazione maschera alcune delle tracce di queste attività di prelievo del materiale di cava adatto alle esigenze locali e il sentierino che porta alla sommità del rilievo su cui si sviluppa un disagiata ma interessante campo solcato con profondi crepacci carsici.

Stop 4 – La Rocca di Monrupino

Dal parcheggio sito nei pressi del Camposanto, con una breve passeggiata su un sentiero sterrato, si sale al piazzale della Rocca di Monrupino, unico esempio di *tabor*, ovvero di collina fortificata della provincia di Trieste. Da qui si può godere di una visione completa dell'altopiano carsico. Verso la Slovenia, si osserva la movimentata morfologia carsica del substrato debolmente piegato ad anticlinale ed in lontananza i contrafforti dei rilievi calcarei cretacei della Selva di Ternova (Trnovoski gozd) e del

Monte Nanos sovrascorsi sul flysch eocenico. Verso sud e ad ovest si stende l'altopiano del Carso, con doline e campi solcati. La morfologia a grande scala evidenzia una vasta, ma debole depressione orlata da modesti rilievi sia verso l'interno che verso l'Adriatico.

Questa fascia centrale del Carso Classico italiano, ricorda vagamente un'ampia valle fluviale, risultato del divagare di "paleofiumare" sulla superficie di spianamento miocenica, prima dello sviluppo dei fenomeni carsici. In tal senso si erano espressi i



primi studiosi, ma quasi sicuramente il “basso-piano” è frutto della corrosione differenziale su rocce carbonatiche aventi caratteristiche petrografiche ed evoluzione geostrutturale diverse. Lungo il confine con la Slovenia, i rilievi nord orientali sono costituiti da calcari dolomitici e dolomie, mediamente poco carsificabili da suborizzontali a poco inclinati, verso il mare i calcari terziari sono caratterizzati da calcari più cristallini aventi una modesta solubilità e sono decisamente inclinati. Nella parte mediana, quella appena depressa, i litotipi sono rappresentati dai calcari a rudiste, più puri, maggiormente corrodibili ed a giacitura ondulata e poco inclinata.

La Rocca di Monrupino poggia le sue mura sulla porzione inferiore dei Calcari di Aurisina, che li presentano strati con giacitura generale verso sudovest. Alla base della Rocca, verso nord sono evidenti gli accumuli di bivalvi *Chondrodonta joannae*, molluschi caratterizzati da gusci piatti e di aspetto palmato, lunghi anche alcuni centimetri e specificamente riferibili al Cenomaniano, uno dei piani del Cretacico superiore. Non lontano dalla Rocca, verso nordest, affiorano i Calcari di Monte Coste, risalenti

al Cretacico medio – superiore, che sono l'unità stratigrafica più antica tra quelle affioranti nell'area del Carso. Si tratta in prevalenza di calcari da grigio a grigio-scuro, talora ricchi in piccoli foraminiferi miliolidi e con livelli a requienie. Caratteristica della porzione sommitale dei Calcari di Monte Coste nel Carso è la presenza di un potente intervallo, che è stato in letteratura denominato “formazione di Monrupino”, in cui i calcari sono dolomitizzati. Tale intervallo, che ha avuto ed ha un ruolo molto importante nello sviluppo dell'idrografia carsica ipo ed epigea, affiora non lontano dalla Rocca. Lo si può osservare lungo la strada che da Col porta al confine di stato con la Slovenia. I calcari dolomitici e le dolomie sono spesso interessati da sacche paleocarsiche (un limitato affioramento si rinviene lungo la strada che sale alla Rocca).

Stop 5 – I campi solcati di Borgo Grotta Gigante

Terminata l'escursione alla Rocca e ai torrioni, si risale in macchina, si prende per Col e Repen (Rupinpiccolo) costeggiando alcuni affioramenti, per poi attraversare la fascia depressa ove affiorano i Calcari di Aurisina e trasferirsi a Borgo Grotta Gigante (Brisciki), dove è presente la celebre Grotta Gigante. Le rocce affioranti nei dintorni di Borgo Grotta Gigante appartengono alla porzione mediana dei Calcari di Aurisina, caratterizzati dalla presenza, talora molto abbondante, di gusci e di frammenti di gu-

Fig. 6.14 Alcune immagini dei torrioni e del campo solcato di Monrupino: a) il “Torrione di Monrupino”, monumento ai caduti; b) e c) alcune “ville” della città di roccia; d) campo solcato. (Foto: Franco Cucchi)

sci di rudiste.

La Grotta Gigante è la più grande caverna turistica esistente al mondo: con una capacità volumetrica di 365.000 m³, è lunga 167,60 m, alta 98,50 m e larga 76,30 m. È riccamente concrezionata ed offre una notevole varietà di speleotemi. Vi si accede tramite due ampie gallerie lungo percorsi a gradini e corridoi. L'attuale uscita turistica è una galleria abitata dal Neolitico all'età del ferro. La genesi è legata all'anastomosi di alcune ampie gallerie con forre e pozzi scavati dalle acque e a imponenti processi gravitativi con grandi crolli nei volumi ampliati dalle acque. La Grotta Gigante è sede di studi e ricerche meteo-climatiche, sulla dissoluzione delle rocce calcaree per carsismo, sul comportamento delle acque di falda durante le piene e sul monitoraggio dei terremoti. La grotta è una delle più importanti cavità turistiche del Friuli Venezia Giulia, dotata di un interessante Museo Speleologi-

co, attrezzata ed aperta al pubblico dal 1908.

All'esterno è posizionata una Stazione sperimentale sulla dissoluzione superficiale delle rocce calcaree. Su colonnine, sono esposti agli agenti atmosferici una cinquantina di campioni rocciosi, dotati di chiodi infissi, provenienti dal Carso e da altre località italiane. Annualmente l'abbassamento delle superfici esposte dovuto alla perdita in calcare per dissoluzione, viene misurato con particolari strumenti detti micro-erosion

Fig. 6.15 a) La Rocca di Monrupino; b) altri hum lungo le mura della Rocca e in prossimità del cimitero. (Foto: Franco Cucchi)





Fig. 6.16 *Chondrodonta joannae* ai piedi delle mura della Rocca di Monrupino. (Foto: Marco Franceschi)

meters, in grado di valutare i centesimi di millimetro.

Dalle misure eseguite dal 1979 in poi, risulta che l'abbassamento annuale medio in climi temperati con precipitazioni di circa 1.200 mm/anno e temperatura media di 12°C, è di 0,025mm/anno (da 0,008 a 0,038 mm/anno).

Ma lo STOP 5 non è presso la Grotta Gigante, bensì a poche centinaia di metri dalla stessa, in un'area che i locali chiamano "gradna griža" (griza delle vipere), dove si estendono campi solcati che offrono, per dimensioni, tipologia e frequenza, uno fra i più completi esempi degli effetti della dissoluzione carsica su superfici calcaree suborizzontali poco suddivise. Su un'area di circa mezzo km² sono presenti quasi 200 vaschette di corrosione (*kamenitze*) e migliaia di pic-

cole forme carsiche: *karren* di tutti i tipi (a isola, a pettine, meandriformi), solchi carsici ampi ed estesi, profondi crepacci che originano piccoli ponti di roccia, fori di dissoluzione e alveoli di corrosione, forme di dissoluzione sottocutanea, funghi carsici.

In particolare le *kamenitze* hanno dimensioni che rendono questi campi solcati sito paradigmatico per questo tipo di carsificazione superficiale: alcune sono profonde 70-80 cm e si sviluppano su un'area di alcuni metri quadrati.

Per apprezzare al meglio il paesaggio prettamente carsico di cui queste morfologie sono l'essenza, è possibile parcheggiare la macchina presso l'avio-superficie ad ovest di Borgo Grotta Gigante, si prosegue prima

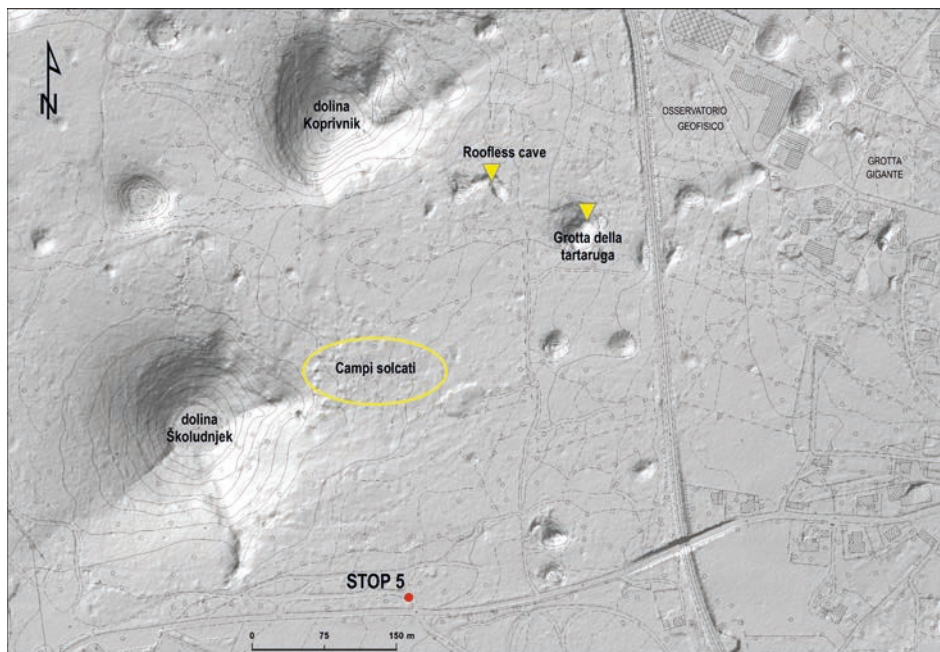
verso est e successivamente, all'incrocio, verso nord, lungo una strada sterrata aperta nella boscaglia nella quale si intravedono blocchi rocciosi carsificati e bordi di piccole doline. Dopo circa 300 m, un viottolo sulla destra che fa poi una curva a sinistra, porta dritti alla Grotta della tartaruga (numero catasto 1688/4530VG) che si apre sull'orlo di una pittoresca dolina. L'ingresso della cavità, inizialmente ostruito da depositi di riempimento fino alla volta, venne scoperto dall'ing. Bruno Redivo nel 1962. I saggi di scavo proseguirono per una decina di anni e restituirono i primi reperti, tra cui un guscio di tartaruga (da cui il

nome). L'abbassamento della superficie di scavo portò all'apertura, in direzione est, di alcune cavernette in cui sono presenti piccole concrezioni sul soffitto, ma anche alcune grandi colonne ed una vaschetta di circa 20 cm di diametro. La scoperta di questi vani ha portato lo sviluppo della cavità a 38 metri e la profondità a 8,5 m. Gli scavi portarono all'individuazione di livelli di frequentazione dal Mesolitico all'età del Bronzo. Di particolare importanza il livello D, attribuito al Neolitico, in cui vennero trovati abbondanti resti di vasi, numerosi strumen-

Fig. 6.17 La stazione sperimentale sulla dissoluzione superficiale delle rocce calcaree. (Foto: Franco Cucchi)



Fig. 6.18 Mappa con gli STOP della zona di Borgo Grotta Gigante. Con i triangoli gialli sono indicati l'ingresso della Grotta della Tartaruga e la roofless cave. A nord e ad ovest nella mappa, due delle grandi doline del Carso Classico Italiano. (Fonte: Dipartimento di Matematica, Informatica e Geoscienze UniTS, lidar da catalogo IRDAT-RAFIG)



ti e manufatti non ritoccati in selce, due lame d'ascia e 2 asce-scalpelli in pietra levigata.

A completare l'interesse per l'area, negli immediati dintorni sono visibili alcuni piccoli campi solcati, alcuni ingressi di cavità, alcune *roofless cave* e tre delle più ampie e profonde doline del Carso triestino, la Murnjak (profonda 40 metri), la Koprivnik (profonda 35 metri) e la Školudnjek (altri 40 metri).

Con il termine *roofless cave*, si definiscono quelle antiche cavità sub-orizzontali, simili ad una mezza galleria, che sono state "scoperchiate", cioè portate a giorno, dall'abbassamento della superficie carsica per dissoluzio-

ne e sono così divenute "cavità senza soffitto".

Si torna sui propri passi ripercorrendo la grotta scoperchiata (*roofless cave*) per giungere ai campi solcati che interessano il fianco orientale della dolina Školudnjek ove si aprono le grandi *kamenitze*.

Stop 6 – Le pareti della Napoleonica

In automobile si raggiunge l'abitato di Prosecco che si lascia sulla destra. Lasciata la macchina nell'ampio parcheggio, ci si avvia lungo la Strada Napoleonica, parallela alla costa, dove si possono ammirare una serie di pareti sub-verticali costituite da Calcarei ad Alveoline e Nummuliti.

Tali pareti sono i piani di strato dei calcari che qui presentano giacitura quasi verticale. In questa zona infatti ci si trova lungo il fianco esterno della grande piega anticlinale del Carso dove gli strati presentano le inclinazioni maggiori e possono anche essere rovesciati. Particolarmente affascinante l'aspetto irregolare delle superfici di strato dovuto a fenomeni di trasformazione (diagenesi) dei sedimenti quali cementazione, dissoluzione per compattazione e compattazione differenziale avvenute poco dopo la loro deposizione

(diagenesi precoce). Altre strutture geologiche interessanti riguardano alcuni piani di faglia o fratture a volte ben visibili con una forma a X. Tali strutture si sono formate durante la fase compressiva che ha generato l'anticlinale, in seguito alla compressione delle rocce. La loro presenza influenza anche la morfologia della parte sommitale delle pareti, che appaiono infatti come delle guglie regolari.

Particolarmente affascinante è la vista a 180° sul Golfo di Trieste, dalla città, all'Istria, alla foce dell'Isonzo.





*Fig. 6.20 Gli strati dei calcari ad Alveoline e Nummuliti verticalizzati lungo la strada Napoleonica. L'ampia superficie visibile è la porzione sommitale di uno strato che presenta giacitura verticale. Le bande scure e chiare che corrono dall'alto verso il basso sulla roccia sono dovute allo scorrimento dell'acqua in occasione delle piogge.
(Foto: Marco Franceschi)*

*Fig. 6.19 Nell'immagine un dettaglio di alcune delle morfologie carsiche più caratteristiche dell'area di Borgo Grotta Gigante: a) un ingresso di cavità, nello specifico la Grotta della Tartaruga; b) l'ingresso della roofless cave; c) i campi solcati; d) una kamenitza.
(Foto: Chiara Calligaris)*



BIBLIOGRAFIA E ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO

CANNARELLA D. (1979) *Catalogo delle cavità e dei ripari di interesse paleontologico e paleontologico sul Carso Triestino*. Atti delle Sc Atti della Società per la Preistoria e la Protostoria del Friuli Venezia Giulia. 3:47-124.

CUCCHI F., FORTI F., STEFANINI S., ULCIGRAI F. (1985) *Mésures de dégradation de roches carbonates et d'accroissement de stalagmites*. In: Collin G., Drouin P. (eds.) *Spelunca Mémoires, Actes XVIe Congrès National de Spéléologie, Nancy-Metz*. Université Metz-Nancy, pp.87-90.

CUCCHI F., FORTI F., MARINETTI E. (1996) *Surface degradation of carbonate rocks in the karst of Trieste (Classical Karst, Italy)*. In: *Karren landforms: Proceedings of the International Symposium on Karren Landforms: Sóller on 19-24th of September 1995/Juan José Fornós Astó (ed. lit.), Angel Ginés Gracia (ed. lit.)*, 1996, ISBN 84-7632-297-6, 41-52.

CUCCHI F., FINOCCHIARO F., MUSCIO G., LIZZI G., RAVALICO M., PIANO C. (2010) *Geositi del Friuli Venezia Giulia*. Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Trieste, pp.383.

CUCCHI F., ZINI L., CALLIGARIS C. (2015) *Il Progetto Hydrokarst: Le Acque del Carso Classico*. Ed. E.U.T. Trieste, ISBN:978-88-8303-621-7. <http://www.openstarts.units.it/dspace/handle/10077/10676>, pp.181.

FURLANI S., CUCCHI F., FORTI F., ROSSI A. (2009) *Comparison between coastal and inland Karst limestone lowering rates in the northeastern Adriatic Region (Italy and Croatia)*. *Geomorphology*, 104, 73-81.

MONTAGNARI KOKELJ M., BERNARDINI F. (2015) *“Pietra verde, Neolitico e post-Neolitico, Carso... lo stato della questione” 15 anni dopo*. *Gortania*, vol.37, 85-97.

ZINI L., CALLIGARIS C., CUCCHI F. (2022) *Along the hidden Timavo*. *Geol. F. Trips Maps*, Vol.14 No.1.3 (2022), 69 pp., (<https://doi.org/10.3301/GFT.2022.03>), ISSN: 2038-4947 [online].

CUCCHI F., RADOVICH N., SAURO U. (1990): *I campi solcati di Borgo Grotta Gigante nel Carso triestino*. *Int. J. Speleol.*, 18 (3-4), 1989: 117-144, 1 ft.

7. GEOPRODOTTI DEL GEOPARCO

Premessa

Corollario del meraviglioso mondo geologico del Carso sono le offerte di promozione turistica e commerciale che questo territorio offre e che ogni guida geologica e naturalistica può condividere con i visitatori, i turisti o più generalmente con gli escursionisti.

Descriveremo i prodotti ma starà alla guida collegarli con itinerari ed esperienze, anche sulla base di quanto già sperimentato, o proposto e commercializzato, o solo pensato e progettato all'interno del perimetro del futuro geoparco del Carso.

Per facilitare la lettura, raggrupperemo i "geoprodotti" nelle aree tematiche definite dal Piano Strategico dell'Agenzia Regionale di promozione turistica, PromoturismoFVG.

Prima, riprenderemo qualche **concetto fondamentale** che ci sarà di aiuto per identificare al meglio le caratteristiche e i possibili destinatari

della proposta geoturistica del geoparco del Carso.

7.1 Definizioni

7.1.1 Che cos'è un geoprodotta?

Il primo concetto importante è quello di geoprodotta. Come possiamo definirlo?

Il geoprodotta è un prodotto turistico con una particolare connotazione di tipo geologico, è l'elemento chiave su cui poggia la proposta geoturistica del geoparco del Carso: il geoprodotta viene infatti pensato, organizzato e commercializzato al fine di creare valore e sviluppo per il territorio.

Come ogni altro prodotto turistico, il geoprodotta è un insieme di beni, esperienze e servizi, ma si caratterizza per alcune specificità: in primo luogo esprime un legame profondo con la geologia e, anche, con la comunità locale, la storia e l'identità del territorio; in secondo luogo è sostenibile,



Fig. 7.1 Il logo del geoparco a cura di Paolo Prossen (versione a colori e in bianco e nero) che contraddistinguerà i geoprodotti

comunica i valori che lo definiscono e lo caratterizzano a turisti, visitatori e comunità locale e, infine, ci rende tutti più consapevoli sull'importanza di proteggere e valorizzare la geodiversità del territorio, il suo patrimonio naturale e culturale.

7.1.2 I geopark friend

Non di soli geoprodotto vive il geoturismo!

Dobbiamo infatti considerare anche quei prodotti turistici che riflettono i valori del geoparco, ma che non hanno una specifica connotazione geologica. Li chiameremo prodotti "geopark friend".

Insieme ai geoprodotto, i prodotti "geopark friend" promuovono il geo-

turismo ovvero quel particolare segmento del turismo in cui il fattore più importante è rappresentato dalla diversità geologica, dalla conservazione della natura e dalla cura del patrimonio geologico del Carso.

Fig. 7.2 Il logo dei prodotti "geopark friend" a cura di Paolo Prossen (versione a colori)



7.2 Profili e target del geoturismo

Prima di avventurarci nella disamina dei geoprodotto e dei prodotti “geopark friend”, può essere utile analizzare quali sono i diversi profili o target con cui dovremo relazionarci come guide geologiche e naturalistiche del geoparco del Carso.

Questo esercizio ci aiuterà a capire meglio desideri e bisogni di turisti, visitatori ed escursionisti e a soddisfarli nel migliore dei modi.

Possiamo iniziare distinguendo le diverse motivazioni che potrebbero portare su questo meraviglioso territorio, i nostri futuri interlocutori. Se immaginiamo una scala di intensità, che colloca al primo posto il visitatore che esprime come motivazione esclusiva il tema geologico e a seguire gli altri, che esprimono motivazioni di visita con contenuti geologici prevalenti o solo complementari, possiamo individuare ben 5 diversi profili:

Appassionati di geologia: ricercatori scientifici, professori universitari, studiosi, membri di viaggi organizzati scientifici o didattici, persone particolarmente interessate agli aspetti geologici del Carso.

Ecoturisti: persone con una grande consapevolezza ambientale e sociale; in vacanza sono particolarmente attratte da alcune attività come l'esplorazione di aree protette o borghi storici; viaggiano per conoscere l'ambiente, l'enogastronomia e la cultura dei luoghi.

Turisti del “paesaggio culturale”: o turisti del territorio, persone motivate da un mix di attrattive dove spostamento e scelta dell'alloggio sono parti integranti dell'esperienza; il turismo di territorio è difficile da definire e misurare data la complessità del prodotto, ha come focus della motivazione di viaggio un mix di cultura e tradizioni, uomini e storie, ambiente e natura, storia e arte, architettura, geologia e geomorfologia, enogastronomia e prodotti tipici, enogastronomia.

Turisti attivi: un segmento abituato a ricercare luoghi rari ed esperienze uniche e a pretendere qualità non limitata al solo albergo; tra le esperienze maggiormente ricercate, quelle attive e dinamiche, anche estreme, in mezzo alla natura o piuttosto visite o tour che abbiano come elemento distintivo l'ecosostenibilità, l'autenticità e il contatto con la natura, da ricercare anche attraverso le modalità di fruizione del viaggio (bicicletta, cammino).

Turisti della natura (occasionalni): a questa categoria appartengono i turisti che visitano per caso i luoghi naturali durante le loro vacanze; persone che molto probabilmente non pianificheranno le proprie vacanze pensando ad un'attività specifica, come ad esempio quelle legate al geoturismo, ma decideranno proba-

bilmente di visitare attrazioni specifiche, disponibili o accessibili.

7.3 I geoprodotto

Dopo questa sintetica, ma doverosa premessa, arriviamo finalmente alla descrizione dei geoprodotto. Li suddivideremo in due categorie principali, i geoprodotto già fruibili e quelli ancora in fase di definizione e messa in opera, utilizzando, come ulteriore criterio di classificazione quello tematico, proposto nel piano strategico di PromoturismoFVG 2019-2022:

- enogastronomia (cluster prioritario)
- bike (cluster prioritario)
- itinerari culturali (cluster di interesse particolare)

- outdoor (cluster di interesse particolare)
- eventi (cluster di interesse particolare)

7.3.1 Enogastronomia e geoprodotto

Nel cluster enogastronomia rientrano alcuni prodotti tipici locali e le esperienze enogastronomiche proposte nei suggestivi geositi di Grotta Gigante e Val Rosandra.

Il vino Terrano

Vino originario del Carso, autoctono; è il principale vitigno coltivato sulle terre rosse, il suolo tipico dei fondi delle doline del Carso, indissolubilmente legato al substrato carbonatico è senza dubbio uno dei geopro-



dotti più tipici (Fig. 7.3). Il Terrano è un vino protetto dalla Denominazione Tradizionale Riconosciuta che deriva da un vitigno a bacca rossa appartenente alla famiglia dei Refoschi.

Il vino si distingue per la vivacità della sua acidità, per gli aromi di lampone e mora e per il tipico colore rosso rubino con riflessi violacei (Fig. 7.4) e dal limitato contenuto tannico.

Proprio al fine di valorizzare questo tipo di vino locale è stata inaugurata nel 1986 la "Strada del vino Terrano", da Opicina a Visogliano, voluta e patrocinata dalla ex Provincia di Trieste.

Fig. 7.4 Colore e riflessi del vino Terrano (foto di F. Bieker)



Il Liquore di Terrano

Vino aromatizzato chiamato «Liquore di Terrano», che si fregia della Denominazione Tradizionale Riconosciuta. Un tipico prodotto del Carso, di colore rosso scuro, dolce, morbido, a volte ricco di spezie con gradazione alcolica minore di 17°. Nasce durante il secolo scorso quando, per l'impossibilità di reperire liquori, si produceva il "liquor de nero", utilizzando ingredienti sempre disponibili come spezie e grappa in aggiunta al vino Terrano, procedimento che di fatto permetteva di conservare più a lungo possibile tale vino di difficile invecchiamento.

La magia dello Jamar, formaggio di grotta del Carso

Lo jamar è uno dei simboli più originali e creativi del Carso. È un prodotto unico, particolarissimo, basato su lattimi da mucche allevate con il fieno della landa carsica. Viene stagionato in una grotta carsica profonda 70 metri, dove trova per tutto l'anno una temperatura e umidità costanti. Il risultato è un formaggio a pasta semidura, friabile, talvolta erborinato, dagli aromi intensi e persistenti che ricorda l'ambiente dove viene affinato, cioè la grotta. Il sapore caratteristico dello Jamar raccoglie poi la fragranza del latte ed assume contorni forti e piccanti. Ottimo a tavola abbinato a miele locale, mentre in cucina si presta a svariate fantasie conferendo ai piatti un gusto specifico, deciso e unico.

Il miele del Carso

Il miele millefiori prodotto nell'area carsica del Friuli Venezia Giulia deriva per lo più dal nettare di numerosissime piante erbacee presenti nei prati della landa al quale si somma quello di alcune piante arbustive e arboree. Infatti per la posizione geografica e le condizioni climatiche, il Carso ha una composizione floreale unica di erbe, trifoglio, erbe aromatiche, bosco e arbusti che offrono un pascolo d'api variegato e ricco di sostanze aromatiche, che si riflette nell'aroma specifico, pieno e vivace di miele e colore intenso.

Nel geoparco sono attivi un centinaio di apicoltori, per lo più di piccole o medie dimensioni, per un totale di circa un migliaio di alveari nella zona. Tipico è il miele di marasca PAT (Prodotti Agroalimentari Tradizionali), che deriva dal nettare del ciliegio canino o della ciliegia di Santa Lucia (*Prunus mahaleb*), arbusto che cresce sui substrati carbonatici del Carso triestino e isontino.

In generale il miele millefiori del Carso se prodotto nella prima parte della primavera è liquido, caratterizzato per l'appunto dall'aroma amarognolo della marasca. Se prodotto più tardi l'apporto del nettare di varie leguminose erbacee conferiscono al miele un aroma delicato; solitamente si mantiene liquido a lungo e assume un colore ambrato più o meno scuro. Talora può presentarsi cristallizzato per la presenza di nettare diiglio.

Le erbe officinali del Carso

Il Carso è una zona ricca di risorse naturali, ma rocciosa e calcarea con poche superfici arabili ed un clima che risente sia dell'influenza mediterranea che di quella alpina; queste caratteristiche, insieme alla morfologia dell'altopiano in qualche modo favoriscono una elevata biodiversità e la presenza di specie mediterranee tra cui numerose piante officinali.

Grazie al loro utilizzo si possono produrre spezie, sali aromatizzati alle erbe, infusi e tisane, olii essenziali, saponi naturali e unguenti agli estratti erbali.

La Val Rosandra: tra geologia e produzioni dell'uomo

Un'inusuale degustazione di prodotti tipici in riva al fiume Rosandra accompagnata dagli approfondimenti di un geologo, per assaporare l'incanto della natura carsica. Dopo una breve passeggiata fino alla Riserva Naturale Val Rosandra-Dolina Glinščice, si raggiungono le ali di roccia levigata dall'acqua in riva al fiume in uno dei canyon più singolari al mondo. Qui si scoprono la magia e la storia, le leggende della Val Rosandra, le caratteristiche geologiche della zona accompagnati dai vini autoctoni Doc Carso-Kras e gli oli extravergini d'oliva prodotti sul territorio. I suoni naturali e la calda luce del tramonto accompagnano l'ingresso a piedi nudi nelle acque del Rosandra per un'esperienza al tempo stesso semplice e molto differente.

7.3.2 Bike e Geopercorsi ciclabili

Nel secondo cluster di prodotto troviamo i geopercorsi ciclabili ideati dal Servizio Geologico della Regione FVG e il lungo percorso ciclabile della Bora ancora in fase di definizione.

I geopercorsi ciclabili

Si tratta di quattro itinerari, ideati dal Servizio Geologico della Regione FVG, che valorizzano la varietà e la specificità delle caratteristiche geologiche del geoparco del Carso. Si differenziano per lunghezza e difficoltà:

- il primo si snoda nei pressi del lago di Doberdò,
- il secondo tocca la falesia di Duino, il fiume Timavo, Duino Aurisina e i suoi dinosauri,
- il terzo ci propone una pedalata tra le grotte nei pressi di Duino Aurisina,
- il quarto e ultimo si snoda tra Val Rosandra e San Dorligo della Valle.

Gli itinerari sono scaricabili dal sito istituzionale della Regione Autonoma del Friuli Venezia Giulia nella pagina dedicata alla geologia e geodivulgazione (<https://www.regione.fvg.it/rafvvg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/geologia/FOGLIA08/>), dal futuro sito web di animazione e promozione territoriale e dal sito istituzionale del geoparco del Carso: attraverso le mappe è possibile avere evidenza dei punti di ristoro, delle strutture ricettive e di altri servizi di supporto presenti lungo il percorso.

7.3.3 Itinerari culturali e geoprodotto

I geoprodotto a tema culturale sono numerosi; si tratta di “laboratori” dedicati alla geodiversità, talora organizzati dai centri visita (Gradina, Basovizza e Val Rosandra) e presso i geositi più importanti, di facili itinerari che valorizzano il paesaggio carsico, la flora e la fauna o di esperienze che ci portano a stretto contatto con la cultura e la tradizione più tipica del Carso.

Si citano alcuni noti collegamenti già proposti:

- La Rocca di Monrupino, da castelliere a fortilizio del 1400, con il geosito “Torriani di Monrupino”
- Le risorgive del Timavo, luogo sacro celebrato dai resti del tempio di Diomede e dalla presenza dalla chiesa gotica consacrata a San Giovanni in Tuba con l’omonimo geosito
- Il sentiero Rilke: Rainer Maria Rilke, falesie e fenomeni epigei del carsismo
- Il Carso nella storia, le tracce lasciate dall’uomo: dalla preistoria con le frequentazioni pastorizie nelle grotte, ai castellieri, agli scontri bellici della prima Guerra Mondiale
- Val Rosandra: percorsi geologici, naturalistici e storici
- Le cave di Aurisina: storia dell’attività estrattiva dai romani ad oggi, passando attraverso l’industrializzazione asburgica ottocentesca

7.3.4 Outdoor e geoprodotti

Caratteristica comune a questo gruppo di geoprodotti è l'esplorazione attiva e dinamica dei geositi e delle innumerevoli opportunità offerte del geoparco del Carso, che si adattano anche alle esigenze degli sportivi o delle persone più attive e dinamiche, come ad esempio il trekking lungo i geoitinerari e il percorso speleologico in Grotta Gigante.

7.3.5 Eventi e geoprodotti

Tra i geoprodotti possiamo inserire anche alcuni eventi annuali di successo, di carattere escursionistico da un lato e culturale dall'altro, che traggono la loro originalità dalle caratteristiche geologiche del Carso, come ad esempio la Settimana del geoparco e la Settimana del Pianeta Terra.

7.4 I prodotti geopark friends

I prodotti "geopark friends" completano un'offerta geoturistica già molto ricca ed articolata. Ricordiamo che i prodotti "geopark friends" riflettono i valori del geoparco, ma non hanno una specifica connotazione geologica. Utilizziamo anche in questo caso la doppia classificazione che li distingue rispetto alla fruibilità e all'ambito che sviluppa essenzialmente due tematiche: quella eno-gastronomica e quella culturale. A titolo esemplificativo si descrivono ulteriori prodotti:

7.4.1 Enogastronomia

Altri vini dai vitigni autoctoni: malvasia e vitovska

Le superfici rocciose, la difficoltà del suolo a trattenere l'acqua che penetra nel sottosuolo e l'esiguità della terra stessa costituiscono un terroir madre di vini dai colori compatti e profondi, profumi intensi e variegati, sensazioni minerali, buona struttura e prodotti decisamente longevi.

Sembra che la Malvasia, o 'Malvasia istriana', coltivata nella zona della DOC Carso – Kras, arrivò importata dai Veneziani. Questa è un vino secco, non aromatico a bacca bianca. È molto versatile e può dar vita ad un'intera gamma di stili diversi: da un vino fresco che passa solo in inox, a quello affinato in legno. Si presta bene alla spumantizzazione e probabilmente dà il meglio di sé macerata. In bocca è elegante, asciutta, molto sapida e con chiusura finale piacevolmente ammandorlata. Se vinificata in bianco, all'olfatto può offrire eleganti sensazioni floreali e aromatiche. Se macerata, sprigiona aromi di frutta gialla matura, spezie, note balsamiche e di erbe aromatiche.

Oggi la Vitovska è regina del Carso: un vino di prestigio, da sempre presente su queste terre, nascosta tra le pieghe di secoli e secoli di cultura contadina. È un vitigno autoctono a bacca bianca, nata da un incrocio spontaneo tra la Malvasia e la Glera, altro vitigno autoctono. La Vitovska ha raggiunto, attraverso un lungo processo di adattamento e selezione,

le attuali caratteristiche ed è capace di sopportare, frustata dalla Bora, sia i freddi inverni che la siccità della stagione calda. Dal sapore asciutto, con retrogusto di mandorla, molto minerale e sapido. Se vinificata in bianco, all'olfatto può offrire eleganti sentori fruttati e sensazioni di erbe aromatiche. Se macerata, sprigiona aromi di frutta gialla matura, fiori di campo e fieno.

L'olio extravergine di oliva di bianchera

La bianchera è una cultivar (una variante) tra le tante della pianta dell'ulivo. Le sue foglie hanno una forma ad elica che si dice siano state modellate nella storia nell'adattamento tra il

clima, dove il vento bora ogni tanto si scatena, e la genetica della pianta. L'olio spremuto dalle olive di bianchera ormai ha una gran fama a livello nazionale ed internazionale e qualche anno fa è nata la sua tutela tramite la Tergeste Dop. La peculiarità di quest'olio d'oliva e i suoi indubbi pregi organolettici ne fanno un prodotto di elevata qualità, che presenta alcuni aspetti caratteristici: un'alta percentuale di acido oleico ed un elevato contenuto in polifenoli (antiossidanti), oltre ad un'acidità estremamente bassa. Da un punto di vista organo-

*Fig. 7.5 Cantina vinicola in Carso
(foto di F. Vidoz)*



Fig. 7.6 Salumi carsolini (foto di di D. Balbi)



lettico, all'olfatto l'olio risulta fruttato intenso, mentre al gusto presenta una nota caratteristica di amaro e di piccante.

Il prosciutto del Carso

È un prosciutto crudo che nasce grazie alle caratteristiche naturali e climatiche del Carso, dalla tradizione e dal trasferimento delle conoscenze. Viene stagionato per minimo 9 mesi secondo la ricetta tradizionale sino a maturare, grazie al particolare clima carsico con vento di bora, con la consistenza, il colore, l'odore e il sapore tipici. Il clima carsico si riflette anche in altri salumi tipici della zona: ossocollo di maiale, pancetta, salame...

Il formaggio delle pecore istro-carsoline

Formaggio fatto con il latte delle pecore autoctone, istro-carsoline, che il pastore porta al pascolo ogni giorno sulla landa carsica. La cura dell'animale e la sua dieta sana conferiscono al latte - e di conseguenza al formaggio pecorino derivato - delle caratteristiche particolari e molto apprezzate. I sentori riscontrabili nel formaggio si rifanno all'erba pascolata dalle pecore, ovvero un pascolo dall'alta varietà di flora e caratterizzata dagli elementi naturali del contesto: il paesaggio, l'esposizione al sole e al vento, la brezza marina.

Il latte è munto dalla razza istro-carsolina che deriva probabilmente da

una popolazione autoctona dell'area carsica del nord-est Italia. Nel XVII secolo è stata incrociata con ceppi ovinu di provenienza balcanica giunti in zona carsica Istriana al seguito delle popolazioni Morlacche. È diffusa su tutto l'altopiano carsico sia nella Venezia Giulia che in Slovenia e Croazia.

Le osmize

L'osmiza è una vendita diretta, con consumo nei locali e nelle cantine dei produttori, dei vini locali (Terrano, Vitovska, Malvasia) e dei prodotti tipici (uova, insaccati, salami e formaggi) (Fig. 7.7).

È una tradizione che risale sicuramente all'epoca di Maria Teresa d'Austria, anche se sembra che alcuni documenti ne attestino l'esistenza in periodo medioevale, tuttavia tale vendita fu autorizzata ai contadini per la prima volta nel 1784 grazie ad un apposito decreto imperiale emanato da Giuseppe II d'Asburgo. Il permesso di vendita durava per periodi di otto giorni consecutivi o multipli di otto durante tutto l'arco dell'anno, da qui deriva l'etimologia della parola osmiza, ovvero dallo sloveno "osem", che significa, per l'appunto, otto.

Tale decreto lasciava al contadino la scelta dell'arco temporale e dei prezzi previa affissione di una frasca - rametti d'edera (Fig. 7.8) in bella vista lungo la strada e sulla casa, pena la confiscazione, segnaletica tutt'ora in uso.

7.4.2 Itinerari culturali

Il sentiero della salvia

Un cammino sul sentiero panoramico che collega la località di Santa Croce ad Aurisina, fino all'imbocco della discesa del Sentiero dei Pescatori, connubio perfetto di natura e aromaterapia. Il sentiero corre fronte mare lungo il ciglione carsico, al riparo dai freddi venti di Bora, e deve il suo nome alla salvia domestica (*Salvia officinalis*), pianta erbacea mediterranea che in Regione trova condizioni microclimatiche favorevoli per il suo sviluppo solo sulla costiera triestina.

Fig. 7.7 Tipica osmiza (foto di F. Bieker)

Fig. 7.8 Le caratteristiche frasche lungo la strada (foto di D. Balbi)



8. APPENDICE NORMATIVA

Ai sensi della LR 2/2002, art. 112 comma 3: È guida naturalistica o ambientale escursionistica chi per professione, anche in modo non esclusivo o non continuativo, accompagna persone singole o gruppi di persone nelle visite ad aree protette e altri ambienti di interesse naturalistico, ivi compresi i siti allestiti e le strutture museali o espositive inerenti detti ambienti, illustrando gli aspetti naturalistici, paesaggistici, ambientali ed etnografici del territorio.

L'art 113 prevede che:

1. L'esercizio nella regione Friuli Venezia Giulia dell'attività di guida turistica, accompagnatore turistico e guida naturalistica o ambientale escursionistica, è subordinato all'iscrizione, rispettivamente, agli albi di guida turistica, di accompagnatore turistico, di guida naturalistica o ambientale escursionistica, istituiti presso la Direzione regionale del commercio, del turismo e del terziario, di seguito denominati albi.

2. Possono chiedere l'iscrizione agli albi coloro che sono in possesso dell'attestato comprovante il superamento dell'esame di idoneità di cui all'articolo 114, ovvero che si trovino in una delle condizioni previste dall'articolo 115, comma 3.

3. Agli iscritti all'albo professionale sono rilasciati la tessera di riconoscimento e un apposito distintivo le cui caratteristiche e modalità di utilizzo sono determinate con deliberazione della Giunta regionale, da pubblicarsi sul Bollettino Ufficiale della Regione.

4. Sono iscritti d'ufficio al relativo albo coloro che, al momento dell'entrata in vigore della presente legge, risultano iscritti agli albi di cui alle leggi regionali 20 dicembre 1982, n. 88, e successive modificazioni e integrazioni, e 10 gennaio 1987, n. 2, e successive modificazioni e integrazioni.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Con generalità di Giunta n. 1560 del 31 luglio 2013, avente ad oggetto la 'valorizzazione e conservazione del patrimonio geologico e dei geositi, attraverso la creazione di geoparchi', tra l'altro viene data la definizione di geoparco, affidando al Servizio geologico della Regione, che da anni opera nell'ambito dei geositi, della geodiversità, della divulgazione geologica e che già coordina, lo sviluppo del processo per costituire la rete dei geoparchi.

Un geoparco è un territorio che possiede un patrimonio geologico particolare ed una strategia di sviluppo sostenibile. Deve avere confini ben definiti e sufficiente estensione per consentire uno sviluppo economico efficace del comprensorio. Un geoparco deve comprendere un certo numero di siti geologici di particolare importanza in termini di qualità scientifica, rarità, rilevanza estetica o valore educativo. La maggior parte dei siti presenti nel territorio di un geoparco deve appartenere al patrimonio geologico. I siti di un geoparco devono esse collegati in rete e beneficiare di misure di protezione e gestione. Nessuna distruzione o vendita di reperti geologici di un geoparco è tollerato. Un'area individuata quale geoparco deve essere amministrata da strutture ben definite, capaci di rinforzare la protezione, la valorizzazione e le politiche di sviluppo sostenibile all'interno del proprio territorio. Un geoparco ha un ruolo attivo nello sviluppo economico del suo territorio e deve realizzare un impatto positivo sulle condizioni di vita dei suoi abitanti e sull'ambiente.

LEGGE REGIONALE 14 OTTOBRE 2016, N.15: Disposizioni per la tutela e la valorizzazione della geodiversità, del patrimonio geologico e speleologico e delle aree carsiche, dopo le disposizioni generali, al CAPO II detta le disposizioni per la tutela e la valorizzazione del patrimonio geologico:

CAPO I

DISPOSIZIONI GENERALI

Art. 1

(Finalità)

1. La Regione Friuli Venezia Giulia, nell'ambito delle proprie competenze, assicura la conservazione e la valorizzazione del patrimonio geologico e speleologico regionale, delle forre, delle aree carsiche e dei relativi acquiferi nel rispetto dei principi e delle disposizioni statali e comunitarie in materia e, in particolare, della raccomandazione Rec (2004) 3, adottata dal Comitato dei Ministri del Consiglio d'Europa il 5 maggio 2004, sulla conservazione del patrimonio geologico e delle aree di speciale interesse geologico.

2. Per le finalità di cui al comma 1 la Regione:

a) riconosce il pubblico interesse alla tutela e alla valorizzazione del patrimonio geologico e speleologico regionale per la rilevanza dei valori ambientali, scientifici, culturali, economici e paesaggistici che esso presenta;

b) riconosce la specificità delle aree carsiche, nonché il valore strategico e il pubblico interesse alla tutela degli acquiferi carsici;

c) istituisce e aggiorna il catasto regionale dei geositi e dei geoparchi regionali e il catasto speleologico regionale;

d) promuove attività di studio, ricerca e monitoraggio del patrimonio geologico e speleologico anche per verificare l'impatto dell'antropizzazione sull'ambiente naturale;

e) promuove la divulgazione e la fruizione pubblica compatibile con la conservazione del bene e l'utilizzo didattico e turistico dei luoghi di interesse geologico e speleologico;

f) promuove la formazione tecnica e culturale degli speleologi nell'ambito delle organizzazioni non professionali.

Art. 2*(Definizioni)*

1. Ai fini della presente legge si intendono per:

a) geodiversità: la varietà o la specificità delle caratteristiche geologiche del territorio, comprensive delle rocce e dei depositi, delle forme e dei processi in ambito geologico, geomorfologico, idrogeologico, paleontologico, mineralogico e pedologico;

b) patrimonio geologico: i luoghi, i geositi e le singolarità geologiche ove sono conservate importanti testimonianze della storia e dell'evoluzione della Terra e della sua geodiversità;

c) geosito altresì detto emergenza o eccellenza o particolarità geologica, geomorfologica, idrogeologica, paleontologica, mineralogica e pedologica: sito, area o territorio, sia epigeo che ipogeo, con caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, paleontologiche, mineralogiche e pedologiche di intrinseco interesse e importanza per la comprensione della storia e dell'evoluzione della Terra;

d) geoparco: territorio dai confini ben definiti che possiede un patrimonio geologico particolare e una strategia di sviluppo sostenibile;

e) patrimonio speleologico: l'insieme delle grotte che caratterizzano i sistemi carsici, nonché, unicamente ai fini applicativi della presente legge, le cavità artificiali;

f) area carsica: zona formata da rocce carsificabili, solubili, nelle quali l'idrografia di superficie è limitata e il sottosuolo è caratterizzato da sistemi carsici; le aree carsiche sono caratterizzate in superficie da forme quali depressioni chiuse, doline, campi solcati, valli cieche, inghiottitoi e zone sorgentifere;

g) forma carsica: morfologia epigea o ipogea dovuta a carsismo;

h) sistema carsico: complesso di forme carsiche ipogee ed epigee organicamente e funzionalmente collegate tra loro e parzialmente o totalmente occupate dall'acqua;

i) grotta: cavità carsica sotterranea di origine naturale, chiusa parzialmente o totalmente, di dimensioni accessibili all'uomo con sviluppo lineare superiore a 5 metri;

j) acquifero carsico: serbatoio idrico sotterraneo sviluppato in ammassi rocciosi dotati di permeabilità per fessurazione, fratturazione e carsismo caratterizzato da una zona di trasferimento verticale, non satura, e da una zona di trasferimento orizzontale satura o parzialmente satura;

k) cavità artificiale: ambiente sotterraneo, creato dall'uomo, di particolare valore storico, archeologico, geominerario o d'interesse naturalistico;

l) grotta turistica e cavità turistica: cavità naturale o artificiale gestita per finalità turistiche, dotata di accesso controllato, con predisposti al suo interno sentieri naturali o artificiali dotati di tutti gli apprestamenti e impianti tecnici fissi necessari a garantire la sicurezza dei visitatori secondo quanto previsto dalla normativa vigente in materia;

m) forra: gola stretta e profonda incassata nella roccia, dalle pareti subverticali o verticali, incisa da un torrente come risultato di un'azione erosiva-corrosiva, interessata da attività di tipo esplorativo e turistico-ricreativo;

n) speleologia e attività derivate: complesso delle attività di individuazione, esplorazione, studio, documentazione e divulgazione didattica dei fenomeni naturali e culturali osservabili nelle grotte, nelle aree carsiche ove esse si sviluppano, nonché, ai fini applicativi della presente legge, nelle cavità artificiali.

(1)

Note:

1 Parole aggiunte alla lettera c) del comma 1 da art. 17, comma 1, lettera a), L. R. 9/2019

CAPO II

DISPOSIZIONI PER LA TUTELA E LA VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO GEOLOGICO

Art. 3

(Catasto regionale dei geositi e dei geoparchi regionali)

- 1.** È istituito il Catasto regionale dei geositi e dei geoparchi regionali (CaRGeo) presso la struttura regionale competente in materia di geologia, che ne cura la tenuta.
- 2.** Il CaRGeo è costituito dalle seguenti distinte sezioni:
 - a)** catasto informatico dei geositi;
 - b)** catasto informatico dei geoparchi regionali;
 - c)** elenco speciale dei geositi di particolare rilevanza.
- 3.** In ciascuna sezione del CaRGeo sono indicati i dati identificativi, la perimetrazione dei geositi e dei geoparchi regionali e ogni altro dato indicato nel regolamento di cui all'articolo 6.
- 4.** La struttura regionale competente in materia di geologia approva in conformità ai criteri previsti dal regolamento di cui all'articolo 6:
 - a)** i dati identificativi, comprese eventuali antiche denominazioni toponomastiche, e le perimetrazioni dei geositi e dei geoparchi regionali;
 - b)** la documentazione necessaria per la valorizzazione e la gestione dei geositi o dei geoparchi regionali.
- 5.** La ricognizione e la perimetrazione dei geositi e dei geoparchi regionali sono effettuate sulla base di approfondimenti tecnico-scientifici relativi alle aree caratterizzate dalla presenza di valenze geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, paleontologiche, mineralogiche e pedologiche.
- 6.** Nell'elenco speciale dei geositi di particolare rilevanza di cui al comma 2, lettera c), sono individuati geositi specifici per valenza e interesse per la com-

preensione della storia e dell'evoluzione della Terra al fine di assicurarne la tutela e la valorizzazione.

7. Gli enti territoriali, gli enti parco, gli istituti di ricerca, gli ordini professionali di competenza e le associazioni attive in materia ambientale possono proporre alla Regione geositi e geoparchi regionali da inserire nel CaRGeo.

8. Gli elenchi dei geositi e dei geoparchi regionali inseriti nelle sezioni di cui al comma 2 e i relativi aggiornamenti sono approvati dalla struttura regionale competente in materia di geologia, con provvedimento da pubblicarsi sul Bollettino ufficiale della Regione e sul sito istituzionale della Regione e sono trasmessi ai Comuni interessati che provvedono a darne pubblicità nelle forme idonee.

9. I dati del CaRGeo costituiscono strato informativo del Sistema Informativo Territoriale geologico (SITGeo).

Art. 4

(Disposizioni per la tutela dei geositi)

1. L'accesso ai geositi è libero, fatti salvi i diritti dei proprietari e dei terzi, nonché eventuali divieti o limitazioni previsti da disposizioni più restrittive.

2. Per le finalità di cui alla presente legge è vietato:

- a)** distruggere, danneggiare, deteriorare o deturpare i geositi;
- b)** alterare il regime idrico con l'effettuazione di scavi, sbancamenti e colamenti nei geositi di particolare rilevanza di cui all'articolo 3, comma 2, lettera c);
- c)** alterare la morfologia del terreno nei geositi di cui all'articolo 3, comma 2, lettera c);
- d)** asportare e modificare gli elementi caratterizzanti il geosito.

3. Nei geositi non è consentito:

- a)** realizzare nuove cave;
- b)** realizzare impianti di recupero e di smaltimento dei rifiuti o varianti sostanziali degli impianti esistenti;

c) utilizzare fanghi di depurazione in agricoltura di cui al decreto legislativo 27 gennaio 1992, n. 99 (Attuazione della direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura).

4. L'autorità competente può autorizzare, previo parere della struttura regionale competente in materia di geologia, deroghe alle disposizioni di cui al comma 2, lettere b), c) e d), e di cui al comma 3, per la realizzazione di interventi di interesse collettivo. A tal fine il soggetto proponente presenta alla struttura regionale competente in materia di geologia il progetto dell'intervento corredato di una relazione geologica illustrativa dell'impatto sul geosito.

(1)

5. La struttura regionale competente in materia di geologia emana i provvedimenti diretti a evitare la distruzione, il danneggiamento, il deterioramento e il deturpamento dei geositi, nonché ulteriori specifiche forme di tutela per i geositi di cui all'articolo 3, comma 2, lettera c), e caratterizzati da particolari necessità di salvaguardia.

Note:

1 Parole soppresse al comma 4 da art. 17, comma 1, lettera b), L. R. 9/2019

Art. 5

(Disposizioni per la gestione dei geositi e dei geoparchi regionali)

1. La Regione provvede al monitoraggio sullo stato di conservazione dei geositi.

2. Qualora i geositi ricadano all'interno di aree naturali protette spetta agli enti gestori di tali aree la loro valorizzazione e gestione in conformità ai criteri per la valorizzazione di geositi e geoparchi regionali indicati nel regolamento di cui all'articolo 6.

3. La struttura regionale competente in materia di geologia approva il progetto di valorizzazione e gestione di geositi o di geoparchi regionali presentato, sulla base della documentazione di cui all'articolo 3, comma 4, dagli enti di cui al comma 2 e da altri soggetti gestori.

4. Alla gestione di ogni geoparco regionale partecipa un laureato in geoscienze.

5. Qualora il territorio del geoparco ricada in aree naturali protette ai sensi della legge regionale 30 settembre 1996, n. 42 (Norme in materia di parchi e riserve naturali regionali), o in siti della rete Natura 2000, alle sedute del Comitato tecnico scientifico per le aree protette di cui all' articolo 8 della medesima legge regionale 42/1996 partecipa, a titolo consultivo, un laureato in geoscienze.

Art. 5 bis

(Rete funzionale alla geodiversità)

(1)

1. È istituita presso la struttura regionale di cui all'articolo 3, comma 1, la Rete funzionale alla geodiversità per la valorizzazione del patrimonio geologico e della geodiversità nelle aree geomorfologicamente omogenee.

2. La Rete funzionale alla geodiversità è formata da soggetti pubblici promotori delle attività di cui al comma 1 che rappresentano gli Enti locali attraverso accordi d'intesa stipulati tra le parti.

3. I soggetti pubblici promotori delle attività di cui al comma 1 operano in sinergia con la struttura regionale competente in materia di geologia, ai fini dell'attuazione di interventi per la promozione del patrimonio geologico regionale previsti dall'articolo 18.

4. Gli elenchi delle aree geomorfologicamente omogenee e dei relativi soggetti promotori sono approvati con decreto del Direttore della struttura regionale competente in materia di geologia, da pubblicarsi sul Bollettino ufficiale della Regione e sul sito istituzionale della Regione e sono trasmessi ai Comuni interessati che provvedono a darne pubblicità nelle forme idonee.

Note:

1 Articolo aggiunto da art. 17, comma 1, lettera c), L. R. 9/2019

Art. 6

(Regolamento per la tutela e la valorizzazione del patrimonio geologico)

1. Con regolamento regionale, approvato previo parere della Commissione consiliare competente, in esecuzione del presente capo e in conformità ai criteri del Repertorio nazionale dei geositi dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) e dell'UNESCO Global Geoparks (UGG), sono disci-

plinati i criteri inerenti:

- a)** i contenuti e le modalità di gestione del CaRGeo di cui all'articolo 3;
- b)** l'individuazione dei geositi e dei geoparchi regionali ai sensi dell'articolo 3, commi 3 e 4;
- c)** l'inserimento dei geositi nell'elenco speciale dei geositi di particolare rilevanza ai sensi dell'articolo 3, comma 2, lettera c);
- d)** la valorizzazione e la gestione di geositi e di geoparchi regionali e i criteri cui va uniformata la relativa documentazione di cui all'articolo 3, comma 4.

(1)

Note:

1 Parole sostituite al comma 1 da art. 17, comma 1, lettera d), L. R. 9/2019

CAPO III

DISPOSIZIONI IN MATERIA DI AREE CARSIICHE E ACQUIFERI CARSIICI

Art. 7

(Riconoscizione e delimitazione di aree carsiche e acquiferi carsici)

1. La struttura regionale competente in materia di geologia approva i criteri per l'individuazione delle aree carsiche, dei relativi acquiferi carsici, delle zone sorgentifere, delle aree di ricarica dell'acquifero carsico e provvede alla loro successiva individuazione con proprio decreto, pubblicato sul Bollettino ufficiale della Regione e sul sito istituzionale della Regione, trasmesso ai Comuni interessati che ne danno pubblicità nelle forme idonee.

2. Per le finalità di cui al comma 1 la Regione individua all'interno delle aree carsiche le seguenti aree:

a) aree soggette a infiltrazione diffusa, ovvero porzioni di territorio caratterizzate dall'affioramento di rocce carsificabili, eventualmente coperte da depositi detritici, su cui si sia sviluppata una copertura vegetale;

b) aree soggette a infiltrazione concentrata, ovvero porzioni di territorio caratterizzate dall'affioramento di rocce carsificabili denudate o dalla presenza di morfologie carsiche superficiali, che condizionano le modalità di infiltrazione delle acque nel sottosuolo, quali doline, inghiottitoi, polje, valli cieche o asciutte;

c) zone sorgentifere, ovvero zone in cui sono ubicate le sorgenti del sistema carsico, nelle quali emerge una parte della risorsa idrica; le sorgenti possono essere costituite anche da grotte sature d'acqua.

3. Per le finalità di cui ai commi 1 e 2 la Regione acquisisce le informazioni di carattere geologico, geomorfologico, idrogeologico, ambientale e paesaggistico, che comprendono anche l'andamento degli acquiferi carsici presenti nell'area, qualora indagati, il relativo grado di vulnerabilità e le aree di ricarica limitrofe non carsiche.

4. I dati delle aree carsiche costituiscono strato informativo del Sistema Informativo Territoriale geologico (SITGeo).

Art. 8

(Disposizioni per la tutela di aree carsiche e acquiferi carsici)

- 1.** La Regione definisce le misure dirette ad assicurare la tutela delle aree carsiche e dei relativi acquiferi, delle aree di ricarica della falda, delle sue emergenze naturali e artificiali e delle zone di riserva idrogeologica, anche nell'ambito del Piano di tutela delle acque (PRTA) di cui all' articolo 121 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 (Norme in materia ambientale), ovvero nei Piani di gestione dei bacini idrografici di cui all' articolo 13 della direttiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2000 , che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque.
- 2.** La Regione può promuovere interventi per accordi e collaborazioni anche sovranazionali e sovranazionali per lo studio e la gestione ottimale di aree vaste carsiche.
- 3.** Ai fini della tutela delle aree carsiche e dei relativi acquiferi non è consentita la realizzazione di:
 - a)** impianti di recupero e smaltimento dei rifiuti nelle aree carsiche soggette a infiltrazione concentrata e nelle zone sorgentifere;
 - b)** discariche di rifiuti pericolosi e non pericolosi di cui all' articolo 4 del decreto legislativo 13 gennaio 2003, n. 36 (Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti), nelle aree carsiche soggette a infiltrazione diffusa.

CAPO IV

DISPOSIZIONI PER LA TUTELA E LA VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO SPELEOLOGICO E DELLE FORRE

Art. 9

(Catasto speleologico regionale)

1. È istituito il Catasto speleologico regionale (CSR) presso la struttura regionale competente individuata dal regolamento di organizzazione dell'amministrazione regionale di cui all' articolo 3 della legge regionale 27 marzo 1996, n. 18 (Riforma dell'impiego regionale in attuazione dei principi fondamentali di riforma economico sociale desumibili dalla legge 23 ottobre 1992, n. 421), che ne cura la tenuta.

2. Il CSR è costituito dalle seguenti distinte sezioni:

a) elenco delle grotte;

b) elenco delle cavità artificiali;

c) elenco delle grotte turistiche e delle cavità turistiche.

3. Per le finalità della presente legge è istituita una sezione separata del CSR nella quale sono iscritte le forre.

4. In ciascuna sezione del CSR sono indicati i dati identificativi catastali, topografici, toponomastici e metrici dei beni di cui al comma 2, oltre ai dati eventualmente disponibili di tipo geologico, speleologico, morfologico, faunistico, vegetazionale, archeologico, di fruizione, di tutela e ogni altro dato utile indicato con il regolamento regionale. I dati contenuti nel Catasto regionale delle grotte di cui all' articolo 3 della legge regionale 1 settembre 1966, n. 27 (Norme di integrazione della legge statale 29 giugno 1939, n. 1497, per la tutela del patrimonio speleologico della Regione Friuli-Venezia Giulia), sono inseriti nella sezione di cui al comma 2, lettera a).

5. L'elenco delle grotte di cui al comma 2, lettera a), è costituito da sottosezioni che ne evidenziano l'interesse geologico, idrogeologico, paleontologico, biologico, archeologico, etnografico, storico-culturale e paesaggistico.

6. Gli elenchi di cui ai commi 2 e 3 e i relativi aggiornamenti sono approvati dalla struttura regionale di cui al comma 1, con provvedimento da pubblicarsi sul sito istituzionale dedicato della Regione.

(1)

Note:

1 Parole sostituite al comma 6 da art. 4, comma 2, lettera a), L. R. 23/2019, con effetto dall'1/1/2020.

Art. 10

(Disposizioni per la tutela del patrimonio speleologico e delle forre)

1. L'accesso al patrimonio speleologico è libero, fatti salvi i diritti dei proprietari e dei terzi ed eventuali divieti o limitazioni previsti da disposizioni più restrittive.

2. Per le finalità di cui alla presente legge all'interno delle grotte è vietato:

a) distruggere, occludere e danneggiare le forme carsiche o alterarne permanentemente la morfologia;

b) abbandonare rifiuti e scaricare reflui di qualsiasi natura ai sensi del decreto legislativo 152/2006;

c) provocare alterazioni ambientali permanenti e, in particolare, alterare il regime idrico o compromettere la funzionalità dell'ecosistema;

d) effettuare tracciamenti delle acque, fatti salvi i casi relativi alle attività di studio preventivamente comunicate alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, fermi restando eventuali ulteriori adempimenti previsti;

e) asportare concrezioni; è fatta salva la raccolta per documentati motivi di studio preventivamente comunicati alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1;

f) asportare reperti paleontologici, paletnologici o archeologici ai sensi del titolo II della parte quarta del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n.137).

- 3.** Per le finalità della presente legge nelle forre si applicano i divieti di cui al comma 2, lettere a), b) e c).
- 4.** I divieti di cui al comma 2 non si applicano alle alterazioni necessarie alle operazioni di soccorso. I divieti di cui al comma 2, lettera a), non si applicano alle alterazioni strettamente necessarie alle attività di esplorazione e alla raccolta di idonee campionature per motivi di studio.
- 5.** Ai fini dell'aggiornamento del CSR, qualora nel corso di lavori di qualsiasi natura sia rinvenuta una grotta o una cavità artificiale, il rinvenimento è comunicato entro dieci giorni alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1.
- 6.** La struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, emana i provvedimenti diretti a evitare la distruzione, l'ostruzione, il danneggiamento, il deterioramento e il deturpamento delle grotte.

Art. 11

(Disposizioni per la gestione del patrimonio speleologico)

- 1.** La Regione provvede al monitoraggio dello stato di conservazione del patrimonio speleologico.
- 2.** Con deliberazione della Giunta regionale possono essere individuate grotte di notevole interesse pubblico ai fini dei provvedimenti di cui alla parte terza del decreto legislativo 42/2004.
- 3.** Al fine di garantire un adeguato livello di tutela delle grotte di cui al comma 2 ogni utilizzo diverso dall'attività speleologica è preventivamente autorizzato dalla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, previo parere degli enti gestori dei parchi nelle aree di propria competenza, subordinatamente alla presentazione di un progetto di fruizione corredato di una relazione illustrativa dell'impatto delle attività previste.

(1)

- 4.** Per motivi di interesse pubblico al fine di assicurare l'accesso alle grotte la Regione può promuovere la costituzione di servitù di passaggio volontarie.
- 5.** Nei parchi regionali e nelle aree contigue, l'ente gestore dell'area protetta può disciplinare l'accesso, la ricerca, l'esplorazione di grotte, nonché le eventuali disostruzioni a carattere esplorativo o scientifico.

(2)

6. La chiusura degli ingressi della grotta è previamente comunicata, unitamente alla relazione illustrativa dell'intervento, alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, che entro trenta giorni può indicare le prescrizioni necessarie alla tutela dell'ambiente ipogeo. La chiusura degli ingressi della grotta per motivate ragioni di sicurezza può essere comunicata alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, anche successivamente all'intervento e, comunque, entro trenta giorni dal medesimo.

7. L'apertura di nuove grotte turistiche di cui all'articolo 2, comma 1, lettera l), e la loro utilizzazione a fini economici, turistici e sanitari è preventivamente autorizzata dalla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, previo parere degli enti gestori dei parchi nelle aree di propria competenza, subordinatamente alla presentazione di un progetto di fruizione corredato di una relazione illustrativa dell'impatto delle attività e delle opere previste. Fatti salvi i vincoli di carattere archeologico, naturalistico, paesaggistico o di altra natura, l'autorizzazione e la realizzazione delle opere sono subordinate al rispetto delle altre normative di settore.

(3)

8. Ogni attività riguardante le grotte turistiche di cui all'articolo 2, comma 1, lettera l), si conforma al principio dello sviluppo sostenibile, di cui all'articolo 3 quater del decreto legislativo 152/2006.

9. La realizzazione di percorsi permanenti, quali ferrate sotterranee e scale fisse, nelle grotte non ricomprese nella definizione di cui all'articolo 2, comma 1, lettera l), è disciplinata dal regolamento di esecuzione di cui all'articolo 15.

Note:

1 Parole sostituite al comma 3 da art. 17, comma 1, lettera e), numero 1), L. R. 9/2019

2 Comma 5 sostituito da art. 17, comma 1, lettera e), numero 2), L. R. 9/2019

3 Comma 7 sostituito da art. 17, comma 1, lettera e), numero 3), L. R. 9/2019

Art. 12

(Comitati tecnici)

(1)

- 1.** Per le finalità di tutela e di valorizzazione del patrimonio speleologico possono essere istituiti, presso la struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, tavoli di lavoro tematici denominati Comitati tecnici.
- 2.** I Comitati tecnici sono costituiti con decreto del Direttore della struttura regionale competente in materia di ambiente e sono composti da esperti del settore e da eventuali soggetti portatori di interesse, individuati in relazione alla tematica e all'obiettivo, di volta in volta, assegnati al Comitato.
- 3.** I Comitati tecnici sono convocati e coordinati dal Direttore della struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1.
- 4.** Per la partecipazione ai Comitati tecnici non sono previsti rimborsi e gettoni di presenza.

Note:

- 1** Articolo sostituito da art. 4, comma 2, lettera b), L. R. 23/2019 , con effetto dall'1/1/2020.

Art. 13

(Tavolo della Speleologia)

- 1.** Al fine di promuovere l'attività speleologica mediante il confronto e la condivisione su temi connessi all'attività stessa, presso la Direzione centrale ambiente ed energia, è istituito il Tavolo della Speleologia al quale partecipano le associazioni e i gruppi speleologici, iscritti nell'elenco di cui all'articolo 14.
- 2.** Il Tavolo della Speleologia di cui al comma 1 è convocato e presieduto dall'Assessore regionale competente in materia di ambiente o da un suo delegato. In relazione alla trattazione di specifiche tematiche, possono essere invitati a partecipare al Tavolo della Speleologia gli enti locali e gli altri soggetti interessati.
- 3.** Per la partecipazione alle sedute del Tavolo della Speleologia non sono previsti rimborsi o gettoni di presenza.

Art. 14

(Elenco delle associazioni e dei gruppi speleologici)

- 1.** Presso la struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, è istituito l'elenco delle associazioni e dei gruppi speleologici che hanno sede nel territorio regionale. L'elenco è pubblicato sul sito informatico della Regione ed è soggetto ad aggiornamento almeno triennale.
- 2.** Le associazioni e i gruppi speleologici possono richiedere l'iscrizione all'elenco di cui al comma 1, purché in possesso dei seguenti requisiti:
 - a)** svolgimento, documentato, di attività speleologiche da almeno tre anni o presenza di almeno cinque iscritti in possesso di quinquennale e documentato curriculum speleologico;
 - b)** adeguata polizza di assicurazione per gli iscritti che svolgono attività speleologica.
- 3.** L'iscrizione all'elenco mantiene la sua validità sino al perdurare dei requisiti dichiarati in sede di richiesta. Ogni variazione è comunicata alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1.
- 4.** Le associazioni speleologiche e i gruppi speleologici iscritti nell'elenco di cui al comma 1 contribuiscono all'attività di raccolta dei dati del patrimonio speleologico e li comunicano alla struttura regionale di cui all'articolo 9, comma 1, per le finalità di cui alla presente legge.

Art. 15

(Regolamento per la tutela e la valorizzazione del patrimonio speleologico e delle forre)

- 1.** Con regolamento regionale, approvato previo parere della Commissione consiliare competente, in esecuzione del presente capo, sono disciplinati:
 - a)** organizzazione, contenuti, modalità di gestione e aggiornamento del CSR di cui all'articolo 9;
 - b)** ulteriori dati identificativi dei beni inseriti nel CSR, in attuazione dell'articolo 9, comma 4;

- c)** ulteriori sottosezioni delle grotte in attuazione dell'articolo 9, comma 5;
- d)** criteri e modalità per effettuare tracciamenti delle acque all'interno delle grotte per motivi di studio in attuazione dell'articolo 10, comma 2, lettera d), e per la raccolta di idonee campionature per motivi di studio in attuazione dell'articolo 10, comma 4;
- e)** criteri e modalità per la chiusura degli ingressi delle grotte e per l'accesso alle grotte chiuse in attuazione dell'articolo 11, comma 6;
- f)** apertura di nuove grotte turistiche, nonché criteri e parametri per l'elaborazione dei progetti di fruizione delle grotte turistiche compatibili con il principio dello sviluppo sostenibile in attuazione dell'articolo 11, commi 7 e 8;
- g)** criteri e modalità per la realizzazione di percorsi permanenti in grotte non turistiche in attuazione dell'articolo 11, comma 9.

CAPO V

INTEGRAZIONE DEGLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE E DISPOSIZIONI PER OPERE PUBBLICHE O D'INTERESSE PUBBLICO

Art. 16

(Disposizioni per l'integrazione del patrimonio geologico e speleologico negli strumenti di pianificazione)

1. Il CaRGeo, il CSR, i provvedimenti relativi ad aree carsiche e acquiferi carsici di cui all'articolo 7 costituiscono elementi del sistema conoscitivo e informativo regionale. I loro dati sono inseriti nei quadri conoscitivi degli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, nonché nei Piani di conservazione e sviluppo dei parchi e delle riserve naturali regionali.

(1)

2. I dati del CaRGeo e del CSR sono inseriti nei quadri conoscitivi del Piano paesaggistico regionale di cui all' articolo 57 della legge regionale 23 febbraio 2007, n. 5 (Riforma dell'urbanistica e disciplina dell'attività edilizia e del paesaggio), del Piano regionale di tutela delle acque di cui all' articolo 121 del decreto legislativo 152/2006 , del Piano regionale di gestione dei rifiuti di cui all' articolo 199 del decreto legislativo 152/2006 , del Piano regionale delle attività estrattive di cui all' articolo 8 della legge regionale 15 luglio 2016, n. 12 (Disciplina organica delle attività estrattive).

Note:

1 Parole soppresse al comma 1 da art. 17, comma 1, lettera f), L. R. 9/2019

Art. 17

(Deroghe per opere pubbliche o d'interesse pubblico)

1. La realizzazione di opere pubbliche o d'interesse pubblico in deroga all'articolo 4, comma 2, lettere b), c) e d), e comma 3, può essere autorizzata dall'autorità competente, previo parere della struttura regionale competente in materia di geologia. A tal fine, il progetto dell'intervento è corredato da una relazione geologica illustrativa dell'impatto sul geosito.

(1)

2. Le opere pubbliche o d'interesse pubblico soggette a valutazione d'impatto ambientale possono essere realizzate in deroga all'articolo 10, comma 2, lettera c), previa motivata ponderazione dell'interesse alla tutela del patrimonio speleologico e dell'interesse alla realizzazione dell'opera.

3. Le opere pubbliche o d'interesse pubblico non soggette a valutazione d'impatto ambientale possono essere realizzate in deroga all'articolo 10, comma 2, lettera c), previo parere della struttura regionale competente di cui all'articolo 9, comma 1, che effettua una motivata ponderazione dell'interesse alla tutela del patrimonio speleologico e dell'interesse alla realizzazione dell'opera. A tal fine, il progetto dell'intervento è corredato da una relazione illustrativa dell'impatto sul sito ipogeo.

(2)

Note:

1 Parole aggiunte al comma 1 da art. 17, comma 1, lettera g), numero 1), L. R. 9/2019

2 Parole aggiunte al comma 3 da art. 17, comma 1, lettera g), numero 2), L. R. 9/2019

CAPO VI

PROMOZIONE DEL PATRIMONIO GEOLOGICO E SPELEOLOGICO E PER LO SVILUPPO DELLA SPELEOLOGIA

Art. 18

(Interventi per la promozione del patrimonio geologico)

- 1.** La Regione preserva il patrimonio geologico, favorisce l'istituzione e la manutenzione di geoparchi regionali in un'ottica di sviluppo sostenibile del territorio, promuove la redazione di progetti per la conoscenza, la fruizione responsabile e l'utilizzo didattico dei geositi e dei geoparchi regionali, nonché per lo sviluppo sostenibile dei geoparchi regionali.
- 2.** Per le finalità di cui al comma 1 l'Amministrazione regionale è autorizzata, anche mediante la concessione di contributi o l'affidamento in delegazione amministrativa intersoggettiva ai sensi dell'articolo 51 bis della legge regionale 31 maggio 2002, n. 14 (Disciplina organica dei lavori pubblici), a:
 - a)** sostenere attività di studio, ricerca o divulgazione delle conoscenze finalizzate all'individuazione, alla caratterizzazione e alla promozione dei geositi e dei geoparchi regionali;
 - b)** promuovere la fruizione turistica dei geositi e dei geoparchi regionali;
 - c)** allestire itinerari escursionistici in aree a elevata valenza per caratteri di geodiversità o caratterizzate dalla presenza di geositi;
 - d)** predisporre e stampare materiale divulgativo, anche informatico, e pubblicazioni finalizzate alla fruizione turistica dei geositi e di itinerari escursionistici in aree a elevata valenza per caratteri di geodiversità o caratterizzate dalla presenza di geositi;
 - e)** realizzare eventi di promozione delle attività di cui alle lettere a), b), c) e d);
 - f)** promuovere la realizzazione di iniziative legate al patrimonio geologico;
 - g)** sostenere la realizzazione di interventi di valorizzazione e di manutenzione dei geositi e dei geoparchi regionali.

(1)

2 bis. Con regolamento regionale sono disciplinati i termini e le modalità per la presentazione delle domande di contributo di cui al comma 2, nonché i criteri e le modalità di concessione dei contributi e di rendicontazione della spesa, nel rispetto della legge regionale 7/2000.

(2)

Note:

1 Parole aggiunte al comma 2 da art. 4, comma 15, lettera a), L. R. 13/2019

2 Comma 2 bis aggiunto da art. 4, comma 15, lettera b), L. R. 13/2019

Art. 19

(Interventi per la promozione del patrimonio speleologico e per lo sviluppo della speleologia)

1. La Regione promuove la conoscenza, la fruizione responsabile e l'utilizzo didattico del patrimonio speleologico, nonché la ricerca speleologica.

2. Per le finalità di cui al comma 1 l'Amministrazione regionale è autorizzata, anche mediante concessione di contributi ad associazioni e gruppi speleologici che perseguono scopi coerenti con le finalità della presente legge, a:

a) incentivare esplorazioni, anche sostenendo l'acquisto di strumentazioni e attrezzature speleologiche, ricerche scientifiche, studi e pubblicazioni sulle grotte di cui alla presente legge;

b) sostenere la ricerca, la documentazione e il censimento delle grotte per l'aggiornamento della sezione a) del CSR;

c) promuovere l'organizzazione di convegni e iniziative volti alla diffusione, al progresso e alla sicurezza delle attività speleologiche e sostenere la gestione delle strutture a supporto dell'attività speleologica.

(1)

3. Con regolamento regionale sono disciplinati criteri e modalità di assegnazione dei contributi di cui al comma 2. Sono ammissibili a contributo anche le spese sostenute prima della presentazione della domanda di assegnazione, purché nel corso dello stesso anno solare.

(2)

3 bis. Per le finalità di cui al comma 1, nonché per la realizzazione di iniziative di valorizzazione e di promozione del patrimonio speleologico e delle aree carsiche, anche transfrontaliere, la Giunta regionale emana bandi per la concessione di contributi a soggetti pubblici o privati, ai sensi dell'articolo 36, comma 3, della legge regionale 7/2000 .

(3)

3 ter. I bandi di cui al comma 3 bis disciplinano i termini e le modalità per la presentazione delle domande di contributo, nonché i criteri e le modalità di concessione dei contributi e di rendicontazione della spesa, nel rispetto della legge regionale 7/2000.

(4)

Note:

1 Parole aggiunte alla lettera c) del comma 2 da art. 4, comma 5, lettera a), L. R. 24/2016

2 Parole aggiunte al comma 3 da art. 4, comma 5, lettera b), L. R. 24/2016

3 Comma 3 bis aggiunto da art. 4, comma 15, lettera c), L. R. 13/2019

4 Comma 3 ter aggiunto da art. 4, comma 15, lettera c), L. R. 13/2019

CAPO VII

VIGILANZA E SANZIONI

Art. 20

(Vigilanza)

- 1.** La Regione svolge le funzioni di vigilanza del patrimonio geologico e speleologico in collaborazione con gli enti locali e unitamente a enti e organismi competenti alla vigilanza ambientale.
- 2.** Le funzioni di accertamento e di contestazione delle violazioni delle disposizioni della presente legge sono svolte dalle strutture regionali competenti in materia di vigilanza ambientale e dal Corpo forestale regionale, in applicazione della legge regionale 17 gennaio 1984, n. 1 (Norme per l'applicazione delle sanzioni amministrative regionali).
- 3.** I soggetti che hanno effettuato l'accertamento e la contestazione di cui al comma 2 ne danno comunicazione, entro dieci giorni, alle strutture regionali che curano la tenuta del CaRGeo e del CSR.

Art. 21

(Sanzioni)

- 1.** Ferme restando le sanzioni previste dalle norme penali e le disposizioni statali in materia di danno ambientale, per l'inosservanza delle disposizioni contenute negli articoli 4, 10 e 11 si applicano le seguenti sanzioni amministrative pecuniarie:
 - a)** articolo 4, comma 2, lettere a), c) e d): da 200 euro a 2.500 euro per ogni gesito interessato;
 - b)** articolo 4, comma 2, lettera b): da 500 euro a 5.000 euro per l'alterazione del regime idrico;
 - c)** articolo 10, comma 2, lettera a): da 100 euro a 1.500 euro per ogni metro cubo di grotta interessata;
 - d)** articolo 10, comma 2, lettere c) e d): da 500 euro a 5.000 euro per alterazioni

ambientali permanenti, per alterazioni del regime idrico carsico e da 50 euro a 500 euro per tracciamenti non previamente comunicati;

e) articolo 10, comma 2, lettera e): da 100 euro a 1.000 euro per l'asportazione di concrezioni;

f) articolo 10, comma 5, e articolo 11, comma 6: da 50 euro a 500 euro nel caso di omissione delle comunicazioni previste;

g) articolo 11, comma 3: da 100 euro a 1.500 euro nel caso di fruizione delle grotte di notevole interesse pubblico in assenza dell'autorizzazione prevista o in difformità dalla medesima;

h) articolo 11, comma 7: da 500 euro a 2.500 euro nel caso di apertura di una nuova grotta turistica in assenza dell'autorizzazione prevista o di fruizione in difformità dalla medesima.

2. Chiunque esegua lavori, opere o manufatti o in qualsiasi modo manometta, alteri, deturpi e arrechi danno al patrimonio geologico e speleologico di cui alla presente legge è tenuto alla rimessa in pristino dei luoghi, ove possibile, secondo le modalità tecniche approvate dalla struttura regionale competente in materia. Ferme restando le previsioni di cui all' articolo 192, comma 3, del decreto legislativo 152/2006, in caso di inosservanza alle modalità approvate la struttura regionale competente per materia provvede direttamente a spese del trasgressore.

3. L'accertamento e la contestazione della violazione delle norme di cui alla presente legge comportano, in ogni caso, l'immediata cessazione dell'attività vietata.

4. Le sanzioni pecuniarie amministrative previste dalla presente legge sono irrogate dalla struttura regionale competente in materia di ambiente, in conformità ai principi di cui alla legge 24 novembre 1981, n. 689 (Modifiche al sistema penale), e della legge regionale 1/1984.

CAPO VIII

DISPOSIZIONI TRANSITORIE E FINALI

Art. 22

(Disposizioni finanziarie)

1. Per le finalità previste dall'articolo 18, comma 2, lettere a), b), d), e), f), e g) relativamente alle spese correnti, è autorizzata la spesa di 40.000 euro per l'anno 2017 a valere sulla Missione n. 9 (Sviluppo sostenibile e tutela del territorio e dell'ambiente) e sul Programma n. 2 (Tutela, valorizzazione e recupero ambientale) - Titolo n. 1 (Spese correnti) dello stato di previsione della spesa del bilancio per gli anni 2016-2018.

2. All'onere di 40.000 euro per l'anno 2017 derivante dall'autorizzazione di spesa disposta dal comma 1 si provvede mediante rimodulazione di pari importo dalla Missione n. 9 (Sviluppo sostenibile e tutela del territorio e dell'ambiente) e dal Programma n. 2 (Tutela, valorizzazione e recupero ambientale) - Titolo n. 1 (Spese correnti) dello stato di previsione della spesa del bilancio per gli anni 2016-2018.

3. Per le finalità previste dall'articolo 18, comma 2, lettere c) e g) relativamente alle spese d'investimento, è autorizzata la spesa di 40.000 euro per l'anno 2017 a valere sulla Missione n. 9 (Sviluppo sostenibile e tutela del territorio e dell'ambiente) e sul Programma n. 2 (Tutela, valorizzazione e recupero ambientale) - Titolo n. 2 (Spese d'investimento) dello stato di previsione della spesa del bilancio per gli anni 2016-2018.

4. All'onere di 40.000 euro per l'anno 2017 derivante dall'autorizzazione di spesa disposta dal comma 3 si provvede mediante storno di pari importo dalla Missione n. 9 (Sviluppo sostenibile e tutela del territorio e dell'ambiente) e dal Programma n. 3 (Rifiuti) - Titolo n. 2 (Spese d'investimento) dello stato di previsione della spesa del bilancio per gli anni 2016-2018.

5. Per le finalità previste dall'articolo 19 è autorizzata la spesa di 30.000 euro per l'anno 2017 a valere sulla Missione n. 9 (Sviluppo sostenibile e tutela del territorio e dell'ambiente) e sul Programma n. 2 (Tutela, valorizzazione e recupero ambientale) - Titolo n. 1 (Spese correnti) dello stato di previsione della spesa del bilancio per gli anni 2016-2018.

6. All'onere di 30.000 euro per l'anno 2017 derivante dall'autorizzazione di spesa disposta dal comma 5 si provvede mediante rimodulazione di pari importo dalla Missione n. 9 (Sviluppo sostenibile e tutela del territorio e dell'ambiente) e dal Programma n. 2 (Tutela, valorizzazione e recupero ambientale) - Titolo n. 1 (Spese correnti) dello stato di previsione della spesa del bilancio per gli anni 2016-2018.

7. Le entrate derivanti dal disposto di cui all'articolo 21, comma 4, sono accertate e riscosse sul Titolo n. 3 (Entrate extratributarie) - Tipologia n. 200 (Proventi derivanti dall'attività di controllo e repressione delle irregolarità e degli illeciti) dello stato di previsione dell'entrata del bilancio per gli anni 2016-2018.

Art. 23

(Disposizioni transitorie)

1. Sino all'approvazione della sezione del CSR recante l'elenco delle grotte di cui all'articolo 9, comma 2, lettera a), conserva efficacia il Catasto regionale delle grotte formato ai sensi dell'articolo 3 della legge regionale 27/1966.

2. Sino all'approvazione del regolamento regionale di cui all'articolo 15 continua a trovare applicazione il regolamento approvato con decreto del Presidente della Giunta regionale 23 febbraio 1995, n. 054/Pres (Nuove norme regolamentari per l'esecuzione dell'articolo 3 della legge regionale 1 settembre 1966, n. 27, relativo all'impianto e alla tenuta del catasto regionale delle grotte).

3. Sino all'istituzione dell'elenco delle associazioni e dei gruppi speleologici di cui all'articolo 14, gli esperti di cui all'articolo 12, comma 2, lettera c), sono designati congiuntamente dalla Federazione Speleologica regionale del Friuli Venezia Giulia, dalla Società Speleologica Italiana del Friuli Venezia Giulia e dal Club Alpino Italiano del Friuli Venezia Giulia.

Art. 24

(Rinvio dinamico)

1. Il rinvio a leggi, regolamenti e atti dell'Unione europea contenuto nella presente legge si intende effettuato al testo vigente dei medesimi comprensivo delle modifiche intervenute successivamente alla loro emanazione.

Art. 25*(Abrogazioni)*

1. Sono abrogate, in particolare, le seguenti disposizioni:

a) la legge regionale 1 settembre 1966, n. 27 (Norme di integrazione della legge statale 29 giugno 1939, n. 1497, per la tutela del patrimonio speleologico della Regione Friuli - Venezia Giulia);

b) la legge regionale 6 agosto 1970, n. 31 (Rifinanziamento, modifiche e integrazioni della legge regionale 1 settembre 1966, n. 27, concernente “Norme di integrazione della legge statale 29 giugno 1939, n. 1497, per la tutela del patrimonio speleologico della Regione Friuli-Venezia Giulia”);

c) la legge regionale 21 gennaio 1975, n. 7 (Rifinanziamento della legge regionale 1 settembre 1966, n. 27, modificata ed integrata dalla legge regionale 6 agosto 1970, n. 31, concernente: “ Norme di integrazione della legge statale 29 giugno 1939, n. 1497, per la tutela del patrimonio speleologico della Regione Friuli-Venezia Giulia “);

d) la legge regionale 16 agosto 1976, n. 42 (Rifinanziamento della legge regionale 1 settembre 1966, n. 27 successivamente modificata ed integrata dalle leggi regionali 6 agosto 1970, n. 31 e 21 gennaio 1975, n. 7, concernente “ Norme di integrazione della legge statale 29 giugno 1939, n. 1497, per la tutela del patrimonio speleologico della Regione Friuli-Venezia Giulia “);

e) la legge regionale 28 ottobre 1980, n. 55 (Rifinanziamento, modifiche ed integrazioni della legge regionale 1 settembre 1966, n. 27, successivamente modificata ed integrata dalle leggi regionali 6 agosto 1970, n. 31, 21 gennaio 1975, n. 7 e 16 agosto 1976, n. 42, in materia di tutela del patrimonio speleologico);

f) i commi 17, 18 e 19 dell' articolo 3 della legge regionale 11 agosto 2016, n. 14 (Assestamento del bilancio per l'anno 2016), a decorrere dall'entrata in vigore del regolamento regionale di cui all'articolo 19, comma 3;

g) il comma 20 dell'articolo 3 della legge regionale 14/2016.

2. Al fine di assicurare il graduale subentro dell'Amministrazione regionale nella gestione del CSR, il comma 121 dell'articolo 5 della legge regionale 23 gennaio

2007, n. 1 (Legge finanziaria 2007), è abrogato a decorrere dalla data di entrata in vigore del regolamento regionale di cui all'articolo 15.

9. UBICAZIONE ED ELENCO GEOSITI

ID	Denominazione	Tipologia ¹	Grado di interesse ²	Descrizione
1	Scavo paleontologico presso Polazzo	GP	REG	Calcari laminati grigio-verdastri caratterizzati dalla presenza di abbondanti fossili di pesci di scogliera ed in misura minore da fossili di piante terrestri e di rettili.
2	Grotta Regina del Carso (2328/4760VG)	GM	REG	E' la cavità più estesa del settore nord occidentale del Carso. Ricca di concrezioni, si sviluppa in direzione S-N con inclinazione quasi costante.
3	Lago di Doberdò	H	INT	Il Lago di Doberdò è uno dei pochi laghi carsici in Italia. Occupa il fondo di un polje ed è inserito in un eccezionale ambiente carsico, caratterizzato dalla presenza di una serie d'inversac. Assieme al vicino Lago di Pietrarossa, rappresenta un paesaggio che muta al variare dell'altezza delle acque di falda.
4	Sorgente termale di Monfalcone: stabilimento	H	REG	Venuta a giorno, tramite faglie e condotti carsici di acque calde (oggi circa 40° C) provenienti da rocce serbatoio calcaree rinvenibili a notevole profondità. Utilizzate già dai romani che le adattarono a terme dopo continui periodi di abbandono e riutilizzo, dal 2014 sono ritornate in funzione.
	Sorgente termale di Monfalcone: Pozzo del Lisert (4808/5608VG)	H	REG	Cavità non accessibile prossima allo stabilimento sul cui fondo si rinvengono le acque calde.

5	Timavo - Sorgenti del fiume Timavo	H	INT	Le sorgenti del Fiume Timavo fanno parte dell'esteso areale sorgentifero del Carso Classico. Le acque, dopo un percorso ipogeo di 30-40 km iniziato in Slovenia nell'inghiottitoio delle Grotte di San Canziano, tornano a giorno con quattro polle, a poco più di 2 km dal Mare Adriatico, creando un ambiente ricco di fascino e conosciuto fin dall'antichità.
	Timavo - Grotta del Timavo CSR1844/4583VG	GM, H	REG	Fa parte del cosiddetto "Complesso delle Sorgenti del Timavo", il sistema di cavità in gran parte allagate esplorate dagli speleosub a partire dalla maggiore delle bocche sorgentizie.
	Timavo - Pozzo dei colombi di Duino CSR215/VG227	GM, H	REG	Finestra sul Complesso delle Sorgenti del Timavo che consente l'accesso a gallerie allagate fino alla profondità di 91 m sotto il livello del mare.
	Timavo - Grotta meravigliosa di Lazzaro Jerko CSR2305/4737VG (LAJ)	GM, H	REG	Indizio di collegamento diretto con la falda carsica ipogea divenuto "finestra" sul Timavo ipogeo.
	Timavo - Abisso di Trebiciano CSR3/17VG (TRE)	GM, H	NAT	Indizio di collegamento diretto con la falda carsica ipogea divenuto "finestra" sul Timavo ipogeo.

¹G – geologico, GM – geomorfologico, GP – geologico/paleontologico, GT – geologico/tettonico, H – idrogeologico

²INT – internazionale, NAT – nazionale, REG – regionale, LOC – locale

6	Dinosauri del Villaggio del Pescatore	GP	INT	In un'ex cava sono stati rinvenuti eccezionali scheletri di androsauri. Si tratta di alcuni tra i pochissimi scheletri completi di dinosauro rinvenuti in Italia e rappresentano un unicum mondiale per l'eccezionalità della loro preservazione e per il fatto di essere stati rinvenuti in connessione anatomica.
7	Sorgenti carsiche costiere	H	REG	Piccole venute d'acqua dolce a livello del mare talune presso il Villaggio del Pescatore, altre ad Aurisina mare, queste ultime a suo tempo in parte utilizzate per l'acquedotto di Trieste.
8	Sorgenti carsiche sottomarine	H	REG	Venute d'acqua dolce al di sotto del livello del mare nel tratto tra il Villaggio del Pescatore e Sistiana e in prossimità di Aurisina.
9	Falesia di Duino	GM	INT	La falesia ha un'altezza che raggiunge i 90 m e si sviluppa dalla Baia di Sistiana fino al porticciolo di Duino, per una lunghezza di circa 1500 m. Erosione e corrosione differenziate hanno dato corpo a pinnacoli e torrioni creando uno spazio paesaggisticamente affascinante.
	Solco di battente della Falesia di Duino	GM	NAT	Tra Duino e Sistiana il solco marino sommerso si trova a una profondità variabile da -2,5 m e -1,3 m.
10	Dolina del Principe	GM	LOC	Ampia dolina sub-circolare che si apre sul fianco di un rilievo (Dorsale M. Cocco – M. Ermada).

21	Cava della Breccia di Slivia	G	LOC	Cava non più attiva in cui si rinviene una breccia calcarea policroma.
22	Campi solcati di San Pelagio e Grotta Lindner CSR829/3988VG	GM	REG	Alternanza di fasce di pietraie carsiche (grize) e di bancate calcaree su cui si sviluppano tutte le piccole forme di corrosione superficiale favorite dalla purezza dei calcari e dalla stratificazione poco inclinata.
23	Sito paleontologico della Caverna Po-cala CSR173/91VG	GP	REG	Cavità protetta in cui sono stati rinvenuti abbondantissimi resti di animali pleistocenici fra cui ossa di <i>Ursus speleus</i> , accanto a scarsi manufatti.
24	Cave romane di Aurisina	G	NAT	Cave a fossa e in galleria per l'estrazione di orizzonti particolarmente compatti e con particolare valenza estetica, commercialmente definiti "marmo", attive già in epoca romana.
25	Sinkhole della Grotta Noè CSR23/90VG	GM	REG	Ampia apertura subcircolare apertasi in corrispondenza della volta di una cavità a prevalente sviluppo sub-orizzontale.
26	Baratro dei cavalli	GM	LOC	Dolina di crollo, asimmetrica, dai bordi ripidi e pareti rocciose verticali.
27	Olistoliti del Castello di Miramare	G	REG	Olistostroma costituito da blocchi calcarei (olistoliti) inglobati caoticamente nelle areniti e peliti del Flysch.

28	Carso di Borgo Grotta Gigante	GM	INT	Area emblematica per la geomorfologia superficiale ed ipogea del Carso settore italiano: una cavità di dimensioni più che notevoli, alcune doline ampie e profonde, vasti campi solcati intensamente carsificati, cavità senza soffitto e cavità preistoriche.
	Carso di Borgo Grotta Gigante - Grotta Gigante CSR2/2VG	GM	INT	È la più grande caverna turistica esistente al mondo: con una capacità volumetrica di 600.000 m ³ , è lunga 130 m, alta 110 m e larga 65 m. Visitabile tutto l'anno.
	Carso di Borgo Grotta Gigante - Campi solcati	GM	NAT	Ampie superfici di strato lungo i bordi orientale e settentrionale della dolina Skoludnjek su cui abbondano le piccole forme carsiche quali kamenitze, Karren di tutte le tipologie, crepacci carsici, fori di dissoluzione.
	Carso di Borgo Grotta Gigante - Grotta della Tartaruga CSR1688/4530VG	GM	LOC	Cavità in cui sono stati rinvenuti resti attribuibili al Paleolitico superiore.
	Carso di Borgo Grotta Gigante - Briščiki - Roofless cave	GM	REG	Tratto serpeggiante di un'antichissima cavità a prevalente sviluppo sub-orizzontale (galleria) venuta alla luce per dissoluzione progressiva ed abbassamento della superficie.

29	Annegamento della piattaforma carbonatica Cenozoica: i conglomerati	G	LOC	Più livelli di conglomerati costituiti da ciottoli calcarei marcano il tetto della piattaforma dei Calcari a Nummuliti e Alveoline. Ad essi seguono marne e calcari marnosi, testimoniando un netto aumento della batimetria dell'ambiente deposizionale e quindi l'annegamento della piattaforma carbonatica.
30	Torrioni di Monrupino	GM	NAT	Singolari forme isolate, testimonianza dell'antica superficie carsica.
40	Timavo - Buchi soffianti: Pozzo presso il Casello ferroviario di Ferneti CSR104/87VG (CFF)	GM, H	LOC	Indizio di collegamento diretto con la falda carsica ipogea.
	Timavo - Buchi soffianti: Luftloch CSR7477/6442VG (LUF)	GM, H	LOC	Indizio di collegamento diretto con la falda carsica ipogea.
	Timavo - Buchi soffianti: Dolina dei sette nani (DSN)	H	LOC	Indizio di collegamento diretto con la falda carsica ipogea.
41	Campi solcati e karren di Percedol	GM	LOC	Ad est della Conca di Percedol, su alcune bancate suborizzontali si sviluppano in quantità e varietà di forme, kamenitze, karren e crepacci carsici.
42	Abisso della volpe CSR100/155VG	GM	LOC	Pozzo unico, largo una decina di metri e profondo 181.
48	Grotta Claudio Skilan CSR5070/5720VG	GM	REG	Uno dei complessi ipogei più vasti e profondi del Carso triestino.

56	Dolina Črbenjak	GM	REG	Ampia dolina di dissoluzione dai fianchi poco acclivi sita in prossimità del ciglione carsico.
57	Valle cieca di Grozzana	GM	REG	Fra l'abitato di Grozzana e quello di Pese si apre una valle cieca dal fondo coltivato.
58	Val Rosandra (Dolina Glinščice)	GM	INT	La Val Rosandra è un geosito complesso per la variabilità dei fenomeni geologici e geomorfologici riconoscibili al suo interno: una valle fluvio carsica con una profonda forra dalla morfologia dei versanti fortemente condizionata dalla tettonica e dalle variazioni litologiche contenente un sistema ipogeo di cavità articolato e attivo su più livelli. Rappresenta un esempio unico di idrografia superficiale in territorio carsico.
	Val Rosandra-Dolina Glinščice - L'annegamento della piattaforma carbonatica Cenozoica: le marne	G	LOC	Diffuso affioramento di marne calcaree e di calcari marnosi, note anche come "Marne a Fucoidi", che si interpongono tra il Fysch e i calcari ad Alveoline e Nummuliti.
	Val Rosandra - Complesso ipogeo del M. Stena (Fessura del Vento CSR930/4139VG)	GM	NAT	Cavità che ha circa 2,6 km di sviluppo all'interno del rilievo calcareo di Monte Stena.
	Val Rosandra - Complesso ipogeo del M. Stena (Grotta delle Gallerie CSR290/420VG)	GM	NAT	Cavità che si sviluppa all'interno del rilievo calcareo di Monte Stena, in destra orografica del Torrente Rosandra ed è un importante sito archeologico.

58	Val Rosandra - Complesso ipogeo del M. Stena (Grotta Gualtierio Savi CSR5080/5730VG)	GM	NAT	Cavità che ha circa 4 km di sviluppo all'interno del rilievo calcareo di Monte Stena.
	Val Rosandra - Complesso ipogeo del M. Stena (Grotta dei Pipistrelli CSR527/2686VG)	GM	NAT	Cavità di modeste dimensioni all'interno del rilievo calcareo di Monte Stena.
	Val Rosandra - Complesso ipogeo del M. Stena (Grotta Martina Cucchi CSR4910/5640VG)	GM	NAT	Cavità che ha circa 1 km di sviluppo all'interno del rilievo calcareo di Monte Stena.
	Val Rosandra - Complesso ipogeo del M. Stena (Grotta Ferroviaria CSR1435/4352VG)	GM	NAT	Cavità di modeste dimensioni all'interno del rilievo calcareo di Monte Stena.
	Val Rosandra - Cascata del Torrente Rosandra	GM	REG	Salto d'acqua impostato su una faglia sub verticale alto circa 30 metri immediatamente a valle del contatto tra le rocce torbiditiche ed i calcari.
	Val Rosandra - Pa- leofrana	GM	LOC	Scivolamento gravitativo che ha coinvolto un blocco calcareo spesso circa 40 metri, largo circa 200 metri e alto 250 metri.
	Val Rosandra - Forra del Torrente Rosandra	GM	REG	Profonda valle che si sviluppa per circa 1.300 metri dove il torrente scorre dentro profondi meandri e marmitte.
	Val Rosandra - Sor- gente Bukovec	H	REG	Sorgentella originata da fenomeni di condensazione all'interno del detrito di falda sovrastante.

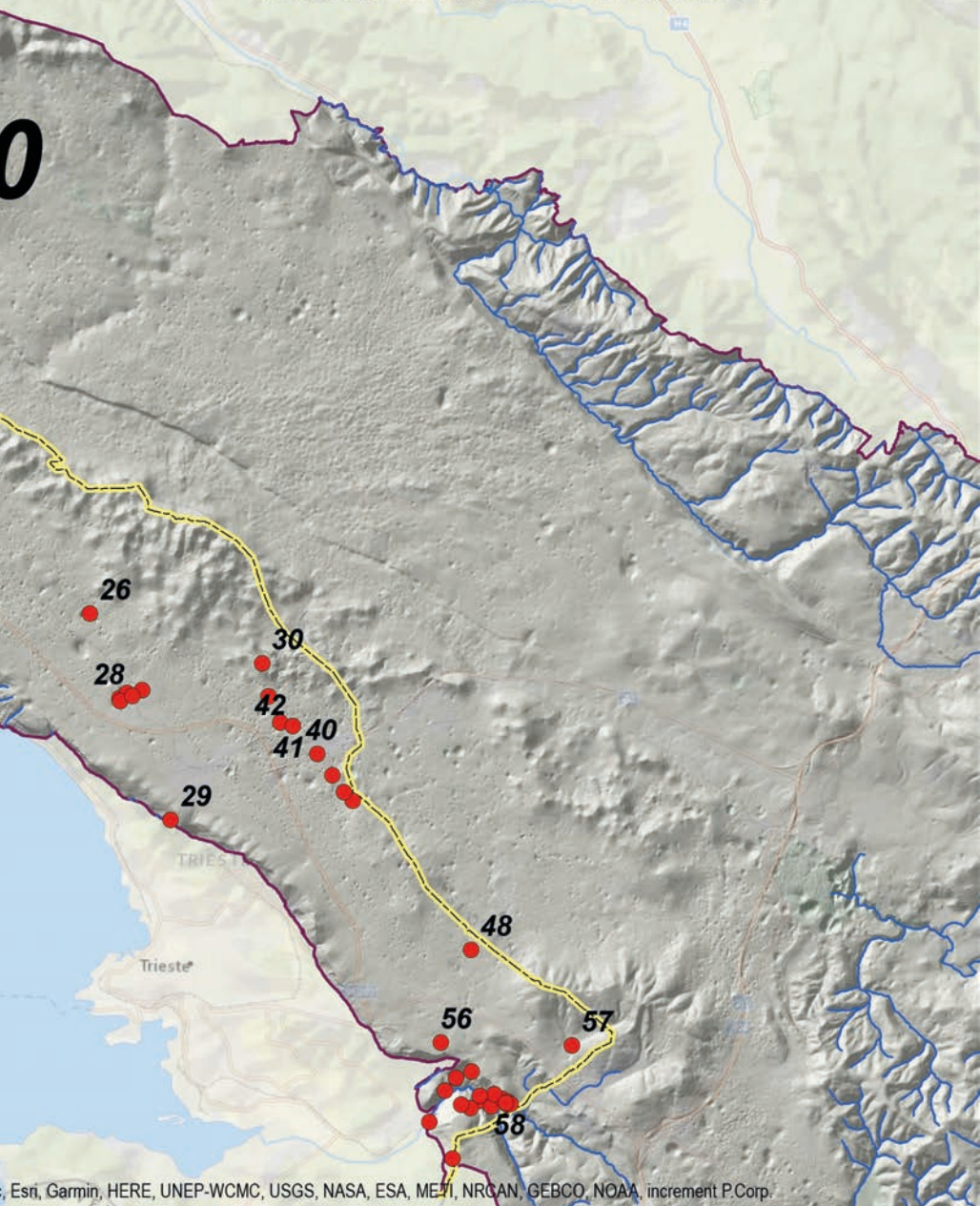
58	Val Rosandra - Faglia del Crinale	GT	LOC	Faglia che condiziona la morfologia del fianco settentrionale del Monte Carso.
	Val Rosandra - Depositi alluvionali e detritici	G	LOC	Depositi alluvionali interdigerati con detrito di versante, testimoni della complessa evoluzione della Valle, legata alle mutazioni del clima.
	Val Rosandra - Sorgenti di Bagnoli (Antro di Bagnoli CSR76/105VG)	H	REG	Sorgente carsica, in strati subverticali dei calcari ad Alveoline e Numuliti al contatto con le torbiditi del Flysch.
	Val Rosandra - Caverna degli Orsi CSR5075/5725VG	GM	LOC	Modesta cavità protetta in cui sono stati rinvenuti resti ossei dell' <i>Ursus spelaeus</i> .



Legenda

- Geositi
- Confine di stato
- Idrografia supeficiale
- Area del Geoparco

UBICAZIONE DEI GEOSITI DEL CARSO CLASSICO ITALIANO



INDICE

- 1** **INTRODUZIONE** (a cura di Franco Cucchi)

- 2** **GEOLOGIA** (a cura di Lorenzo Bonini e Marco Franceschi)
 - 2.1** **Il tempo geologico**
 - 2.2** **La tettonica delle placche**
 - 2.3** **Il ciclo orogenico e il ciclo di Wilson**
 - 2.4** **Le faglie e le pieghe**
 - 2.5** **Evoluzione di un orogene**
 - 2.6** **Le rocce sedimentarie**
 - 2.6.1 Rocce terrigene e rocce carbonatiche
 - 2.6.2 Distinguere calcari e dolomie
 - 2.6.3 Osservazione delle rocce sedimentarie sul terreno e nozioni per la loro classificazione
 - 2.7** **Geologia del Carso**
 - 2.7.1 Stratigrafia
 - 2.7.2 Cosa ci racconta la successione stratigrafica del Carso
 - 2.7.3 Unità litostratigrafiche del Carso
 - 2.8** **L'assetto strutturale del Carso**
 - 2.8.1 La convergenza: l'Orogenesi Dinarica
 - 2.8.2 Il Carso nel tempo geologico: in viaggio nel passato
- Bibliografia e altri testi di riferimento**

- 3** **GEOMORFOLOGIA** (a cura di Franco Cucchi)
 - 3.1** **Il carsismo**
 - 3.2** **Geomorfologia del Carso**
 - 3.2.1 Geomorfologia superficiale
 - Genesi ed evoluzione delle forme carsiche epigee
 - Il Carso Classico italiano

-
- 3.2.2 Geomorfologia ipogea
Genesi ed evoluzione delle forme carsiche ipogee.
 - 3.2.3 Le ricerche speleologiche

Bibliografia e altri testi di riferimento

4 IDROLOGIA (a cura di Luca Zini)

4.1 Concetti di idrogeologia generale

- 4.1.1 Porosità e permeabilità
- 4.1.2 Zonazione di un acquifero
- 4.1.3 Gli acquiferi
- 4.1.4 La circolazione idrica sotterranea
Sorgenti
- 4.1.5 Idrogeologia degli acquiferi carsici
L'area di alimentazione e l'epicarso
La zona vadosa
La zona satura
- 4.1.6 La classificazione dei sistemi carsici
Sistemi con circolazione a dreno dominante
Sistemi con circolazione a dreni interdipendenti
Sistemi a circolazione dispersiva

4.2 L'acquifero del Carso Classico

- 4.2.1 La ricarica dell'acquifero
- 4.2.2 Il Reka-Timavo
- 4.2.3 Le sorgenti
- 4.2.4 L'idrodinamica dell'acquifero

Bibliografia e altri testi di riferimento

-
- 5 **GEODIVERSITÀ** (a cura di Furio Finocchiaro, Chiara Calligaris e Chiara Piano)
- 5.1 **Il concetto**
- 5.2 **La geodiversità del Carso Classico italiano**
- 5.3 **Il patrimonio geologico del Carso Classico italiano**
Bibliografia e altri testi di riferimento
- 6 **ITINERARI GEODIDATTICI NEL GEOPARCO** (a cura di Chiara Calligaris)
- 6.1 **Itinerario 1: La Val Rosandra**
- 6.2 **Itinerario 2: Da Padriciano a Borgo Grotta Gigante**
Bibliografia e altri testi di riferimento
- 7 **GEOPRODOTTI DEL FUTURO GEOPARCO DEL CARSO**
(a cura di Fabiana Vidoz)
- 7.1 **Definizioni**
- 7.1.1 Che cos'è un geoprodotto?
- 7.1.2 I geopark friend
- 7.2 **Profili e target del geoturismo**
- 7.3 **I geoprodotti**
- 7.3.1 Enogastronomia e geoprodotti
- 7.3.2 Bike e Geopercorsi ciclabili
- 7.3.3 Itinerari culturali e geoprodotti
- 7.3.4 Outdoor e geoprodotti
- 7.3.5 Eventi e geoprodotti
- 7.4 **I prodotti geopark friends**
- 7.4.1 Enogastronomia
- 7.4.2 Itinerari culturali

8 **APPENDICE NORMATIVA** (a cura di Sara Bensi e Chiara Piano)

9 **APPENDICE SUI GEOSITI: ubicazione ed elenco descrittivo
dei geositi a scopo divulgativo e di geoturismo**

