

Ugo Sauro

# Morfologia carsica

Estratto dal volume

*Geomorfologia*

di

G. B. CASTIGLIONI

UTET

## CAPITOLO IX

### MORFOLOGIA CARSICA (\*)

#### 9.1. Introduzione.

Il paesaggio carsico<sup>(1)</sup> è dato da un insieme di forme « anomale » rispetto ai paesaggi « normali » di tipo fluviale. Queste forme sono determinate dalla solubilità della roccia (calcari nel caso del Carso) nelle acque naturali. Grazie a questa solubilità le acque tendono a penetrare all'interno delle masse rocciose allargando delle vie di circolazione sotterranea. Ne deriva una scarsità od assenza di idrografia superficiale.

Presupposti fondamentali perché si individuino dei paesaggi carsici sono: *a)* presenza di rocce solubili; *b)* abbondanza di precipitazioni meteoriche.

Il fenomeno della soluzione chimica della roccia, che si verifica ove si realizzano queste condizioni, non esclude la concomitanza di altri processi geomorfici quali, ad esempio, i processi fluviali ed i processi periglaciali. È chiaro però che il paesaggio carsico più tipico, caratterizzato dall'assenza dell'idrografia superficiale e da un'abbondanza di cavità sotterranee, si svilupperà là dove i processi di soluzione saranno dominanti rispetto agli altri. Forme carsiche « pure » saranno quelle che si spiegano come causate soltanto dai fenomeni di soluzione.

---

(\*) Questo capitolo è stato redatto da UGO SAURO.

(1) Roccia, pietra, è il significato della radice indoeuropea *Kar* da cui il nome « Carso » (slavo « Krs » o « Kras »); questo indica la regione fra l'Italia e la Jugoslavia, compresa nella sua parte più famosa, fra le città di Monfalcone, Trieste e Postumia. Da questo nome derivano anche i termini scientifici « carsismo » e fenomeni « carsici ».

Nell'ambito di un rilievo costituito da rocce solubili i processi carsici interesseranno in un primo momento la superficie esterna e quindi le zone di debolezza della massa rocciosa (quali i piani di fratturazione ed i piani di stratificazione), in cui l'acqua può penetrare. Tenderà così ad individuarsi un insieme di forme distribuite sia in senso orizzontale, sia in senso verticale (fig. 9.13).

Dall'alto verso il basso si potranno individuare: conche chiuse, inghiottitoi, pozzi, gallerie, cavità di sbocco.

Per questo suo « spessore verticale » il paesaggio carsico si differenzia da tutti gli altri. Esso spicca soprattutto per l'eccezionale abbondanza delle cavità sotterranee che lo rendono difficilmente esplorabile in tutta la sua complessità. Proprio alcune di queste cavità, quelle penetrabili dall'uomo, ossia « le grotte », sono diventate il simbolo di questi ambienti ancora misteriosi. La *speleologia* è la scienza specializzata nello studio delle grotte; divenuta una scienza ambientale, richiede la presa in considerazione di tutti i fattori e gli elementi componenti i paesaggi carsici, e precisamente:

- i tipi di rocce solubili;
- i processi di soluzione;
- la situazione geologico-strutturale;
- i caratteri in grande dei rilievi carsificati;
- le forme di superficie;
- le cavità sotterranee;
- i rapporti fra le forme di superficie e le cavità sotterranee;
- la circolazione dell'acqua e le sorgenti;
- le condizioni climatiche;
- le azioni degli organismi e dell'uomo.

## 9.2. Tipi e caratteristiche delle rocce solubili.

Processi di soluzione di tipo diverso interessano i seguenti gruppi di rocce:

- a) le rocce carbonatiche (calcari, dolomie e rocce intermedie);
- b) le evaporiti (anidrite, gesso, salgemma ecc. ...).

Prevalgono di gran lunga le rocce carbonatiche, che occupano molte aree continentali situate, per lo più, nelle zone esterne delle grandi fasce orogenetiche (in particolare delle fasce alpino-himalaiana ed andina), con superfici molto variabili ma che superano, in qualche caso, i 500.000 km<sup>2</sup>

(es.: regione meridionale della Cina). A queste « regioni litologiche » corrispondono le « regioni geomorfologiche » di tipo carsico che si presentano secondo una grande varietà di aspetti, aventi in comune una scarsità di idrografia superficiale, la presenza di conche chiuse e di cavità sotterranee.

Poiché le rocce carbonatiche, che in gran parte sono di origine biogena marina, costituiscono la grande prevalenza delle rocce solubili, vale la pena di considerarle più attentamente nei loro aspetti mineralogici e petrografici. I principali componenti delle rocce carbonatiche sono il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e il carbonato di magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ). Questi composti possono presentarsi isolatamente in vari stati cristallini (caso frequente per il carbonato di calcio, che costituisce il minerale detto *calcite* o, più raramente, l'*aragonite*) o combinati a formare un sale doppio (carbonato doppio di calcio e magnesio: *dolomite*).

Le rocce principali quindi sono: i *calcari* (costituiti prevalentemente da calcite); le *dolomie* (costituite prevalentemente da dolomite); rocce miste come i *calcari dolomitici* e le *dolomie calcaree*; altre rocce miste con percentuali più o meno abbondanti di « impurità ». Fra le impurità si considerano i minerali argillosi, granuletti di quarzo, noduletti di selce, i carbonati gli ossidi ed i solfuri di ferro. I calcari con forti percentuali di argille sono detti *calcari marnosi*.

Le rocce carbonatiche sono molto meno solubili delle evaporiti; il carbonato di magnesio è più solubile del carbonato di calcio (calcite), mentre la dolomite risulta la meno solubile. Per semplicità ci occuperemo nelle righe seguenti solo dei processi che interessano il carbonato di calcio (per lo più *calcite*).

### 9.3. I processi di soluzione e di precipitazione del carbonato di calcio.

In un litro di acqua pura a 20 °C si sciolgono soltanto 12 mg di calcite. In realtà nelle acque naturali spesso si trovano in soluzione quantità maggiori di carbonato di calcio. Ciò è determinato da un fenomeno di *soluzione chimica*, legato, in questo caso, alla presenza di *anidride carbonica* ( $\text{CO}_2$ ). L'anidride carbonica che si trova sciolta nelle acque naturali proviene dall'atmosfera ove è presente nella percentuale media dello 0,03-0,04% (3-4 parti di anidride carbonica su 10.000 parti di aria).

Il gas  $\text{CO}_2$  sciolto in acqua conferisce a questa un certo grado di acidità; per questo l'acqua può attaccare i carbonati e provocare la *corrosione* delle rocce carbonatiche.

Nell'ambito di un rilievo costituito da rocce solubili i processi carsici interesseranno in un primo momento la superficie esterna e quindi le zone di debolezza della massa rocciosa (quali i piani di fratturazione ed i piani di stratificazione), in cui l'acqua può penetrare. Tenderà così ad individuarsi un insieme di forme distribuite sia in senso orizzontale, sia in senso verticale (fig. 9.13).

Dall'alto verso il basso si potranno individuare: conche chiuse, inghiottitoi, pozzi, gallerie, cavità di sbocco.

Per questo suo « spessore verticale » il paesaggio carsico si differenzia da tutti gli altri. Esso spicca soprattutto per l'eccezionale abbondanza delle cavità sotterranee che lo rendono difficilmente esplorabile in tutta la sua complessità. Proprio alcune di queste cavità, quelle penetrabili dall'uomo, ossia « le grotte », sono diventate il simbolo di questi ambienti ancora misteriosi. La *speleologia* è la scienza specializzata nello studio delle grotte; divenuta una scienza ambientale, richiede la presa in considerazione di tutti i fattori e gli elementi componenti i paesaggi carsici, e precisamente:

- i tipi di rocce solubili;
- i processi di soluzione;
- la situazione geologico-strutturale;
- i caratteri in grande dei rilievi carsificati;
- le forme di superficie;
- le cavità sotterranee;
- i rapporti fra le forme di superficie e le cavità sotterranee;
- la circolazione dell'acqua e le sorgenti;
- le condizioni climatiche;
- le azioni degli organismi e dell'uomo.

## 9.2. Tipi e caratteristiche delle rocce solubili.

Processi di soluzione di tipo diverso interessano i seguenti gruppi di rocce:

- a) le rocce carbonatiche (calcari, dolomie e rocce intermedie);
- b) le evaporiti (anidrite, gesso, salgemma ecc. ...).

Prevalgono di gran lunga le rocce carbonatiche, che occupano molte aree continentali situate, per lo più, nelle zone esterne delle grandi fasce orogenetiche (in particolare delle fasce alpino-himalaiana ed andina), con superfici molto variabili ma che superano, in qualche caso, i 500.000 km<sup>2</sup>

(es.: regione meridionale della Cina). A queste « regioni litologiche » corrispondono le « regioni geomorfologiche » di tipo carsico che si presentano secondo una grande varietà di aspetti, aventi in comune una scarsità di idrografia superficiale, la presenza di conche chiuse e di cavità sotterranee.

Poiché le rocce carbonatiche, che in gran parte sono di origine biogena marina, costituiscono la grande prevalenza delle rocce solubili, vale la pena di considerarle più attentamente nei loro aspetti mineralogici e petrografici. I principali componenti delle rocce carbonatiche sono il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e il carbonato di magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ). Questi composti possono presentarsi isolatamente in vari stati cristallini (caso frequente per il carbonato di calcio, che costituisce il minerale detto *calcite* o, più raramente, l'*aragonite*) o combinati a formare un sale doppio (carbonato doppio di calcio e magnesio: *dolomite*).

Le rocce principali quindi sono: i *calcari* (costituiti prevalentemente da calcite); le *dolomie* (costituite prevalentemente da dolomite); rocce miste come i *calcari dolomitici* e le *dolomie calcaree*; altre rocce miste con percentuali più o meno abbondanti di « impurità ». Fra le impurità si considerano i minerali argillosi, granuletti di quarzo, noduletti di selce, i carbonati gli ossidi ed i solfuri di ferro. I calcari con forti percentuali di argille sono detti *calcari marnosi*.

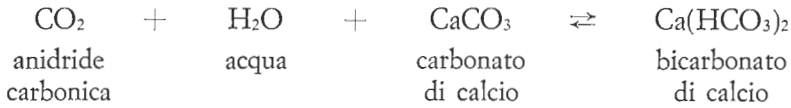
Le rocce carbonatiche sono molto meno solubili delle evaporiti; il carbonato di magnesio è più solubile del carbonato di calcio (calcite), mentre la dolomite risulta la meno solubile. Per semplicità ci occuperemo nelle righe seguenti solo dei processi che interessano il carbonato di calcio (per lo più *calcite*).

### 9.3. I processi di soluzione e di precipitazione del carbonato di calcio.

In un litro di acqua pura a 20 °C si sciolgono soltanto 12 mg di calcite. In realtà nelle acque naturali spesso si trovano in soluzione quantità maggiori di carbonato di calcio. Ciò è determinato da un fenomeno di *soluzione chimica*, legato, in questo caso, alla presenza di *anidride carbonica* ( $\text{CO}_2$ ). L'anidride carbonica che si trova sciolta nelle acque naturali proviene dall'atmosfera ove è presente nella percentuale media dello 0,03-0,04% (3-4 parti di anidride carbonica su 10.000 parti di aria).

Il gas  $\text{CO}_2$  sciolto in acqua conferisce a questa un certo grado di acidità; per questo l'acqua può attaccare i carbonati e provocare la *corrosione* delle rocce carbonatiche.

Se trascuriamo per un momento la piccola quantità di  $\text{CaCO}_3$  che passa direttamente in soluzione, la corrosione del calcare può essere schematicamente espressa dalla reazione



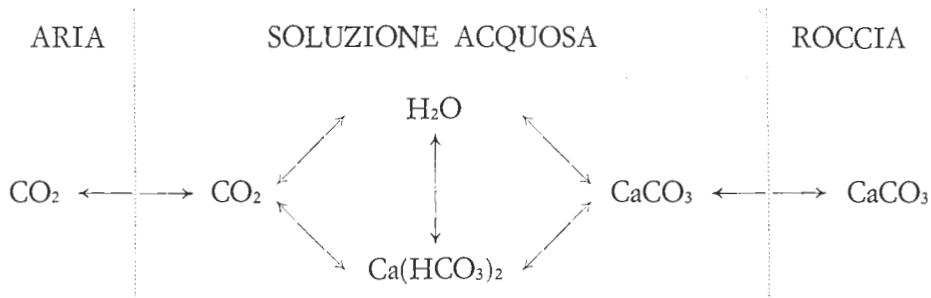
La quantità di  $\text{CaCO}_3$  che l'acqua può disciogliere sotto forma di bicarbonato di calcio dipende dalla quantità del  $\text{CO}_2$  presente nell'acqua; quest'ultima a sua volta dipende dalla pressione parziale del  $\text{CO}_2$  dell'aria a contatto con l'acqua.

Nel sistema di equilibrio occorre perciò considerare tre fasi e precisamente:

- una fase gassosa, cioè l'aria contenente il  $\text{CO}_2$  (fase A);
- una fase liquida, cioè la soluzione acquosa (fase B);
- una fase solida, cioè la roccia calcarea (fase C).

Gli scambi di gas ( $\text{CO}_2$ ) avverranno in corrispondenza del contatto aria-acqua (interfaccia A/B), quelli di  $\text{CaCO}_3$  sulle superfici di contatto soluzione-roccia (interfaccia B/C).

La formula chimico-dinamica sarà perciò di questo tipo



In realtà la soluzione acquosa è di tipo ionico, perché in soluzione le varie sostanze sono presenti parzialmente dissociate in ioni:  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{CaOH}^+$ . La formula d'equilibrio sarà del tipo indicato nella fig. 9.1.

Ovviamente la più importante delle tre fasi sarà quella liquida, che però non può essere considerata isolatamente, essendo influenzata dagli equilibri delle altre fasi.

In rapporto al modificarsi di certi equilibri (variazioni della pressione parziale di  $\text{CO}_2$  della fase gassosa, variazioni di temperatura ecc.), la fase

liquida potrà aumentare la sua aggressività provocando la soluzione di altro carbonato di calcio, oppure diventare soprassatura e lasciar precipitare della calcite (che si rideposita sotto forma di incrostazioni, stalattiti, stalagmiti, travertino, ecc.).

Poiché in pratica è quasi impossibile stabilire la concentrazione esatta dei vari ioni e molecole della fase liquida in un determinato momento, si

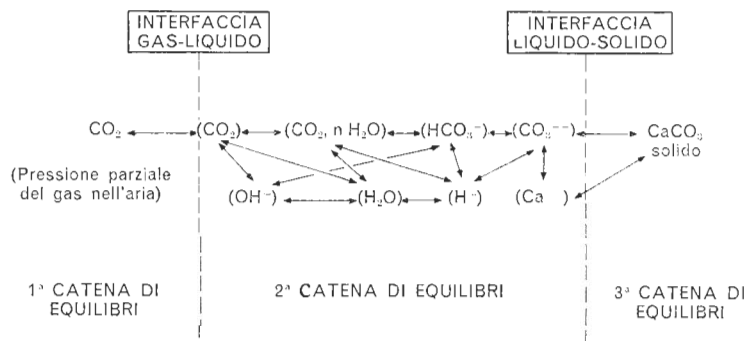


Fig. 9.1. Schema degli equilibri chimico-fisici del processo carsico nell'acqua a contatto con la roccia calcarea e con l'aria (secondo H. ROQUES, in « Annales de Spéleol. », 24, 1969).

ricorre alla determinazione di certi parametri chimico-fisici che ci permettono di definire e confrontare le diverse soluzioni e di stabilirne i caratteri e le tendenze.

I parametri considerati sono:

- 1) *l'acidità*, che si esprime come pH<sup>(1)</sup>;
- 2) *la durezza* della soluzione, cioè la concentrazione del carbonato di calcio disciolto sotto forma di idrogeno-carbonato<sup>(2)</sup>;
- 3) *l'anidride carbonica disciolta* in mg/litro o meglio la *pressione parziale del CO<sub>2</sub>* espressa in frazioni di atmosfera;
- 4) *la temperatura* della soluzione.

Il diagramma della fig. 9.2 ci mostra i rapporti fra il pH (in ordinate), la durezza (espressa come mg/l di CaCO<sub>3</sub>, in ascisse, in scala semi-logaritmi-

(1) Numero compreso fra 0 e 14 che corrisponde al logaritmo decimale della concentrazione idrogenionica, cambiato di segno.

(2) In realtà la « durezza totale » di una soluzione è data da tutti i sali (idrogenocarbonati, solfati e cloruri) di metalli bivalenti presenti nella soluzione. Analiticamente è facile distinguere questa durezza totale in « durezza temporanea » data dagli idrogenocarbonati, e « durezza permanente » data dai solfati e cloruri. Poiché in genere la durezza temporanea è causata prevalentemente dal bicarbonato di calcio, si usa esprimerla o come mg di CaCO<sub>3</sub>/litro, o in gradi tedeschi o francesi (1 grado francese equivale a 10 mg di CaCO<sub>3</sub>/l).



ca), la pressione parziale di  $\text{CO}_2$  (scala all'interno del diagramma, in frazioni di atmosfera) alla temperatura di  $10^\circ\text{C}$ .

Nel diagramma si osservi, ad esempio, la retta che corrisponde ad una pressione parziale di  $\text{CO}_2$  di  $10^{-2}$  atmosfere (1/100 di atmosfera). A questa pressione parziale del  $\text{CO}_2$ , il pH risulta piuttosto acido quando la concentrazione di  $\text{CaCO}_3$  disciolto è bassa (pH è uguale a 6 per una concentrazione di circa 5 mg/litro di  $\text{CaCO}_3$ ), mentre tende a diventare neutro per concentrazioni maggiori (pH intorno a 7 per 100 mg/litro di  $\text{CaCO}_3$ ); per concentrazioni ancora maggiori il pH aumenta ulteriormente fino alla *retta di saturazione*, la quale indica la massima percentuale di  $\text{CaCO}_3$  che può esistere nella soluzione sotto forma di bicarbonato a quella temperatura.

Si può rilevare come, per pressioni parziali di  $\text{CO}_2$  maggiori (valori indicati più in basso all'interno del diagramma), le soluzioni tendono all'aci-

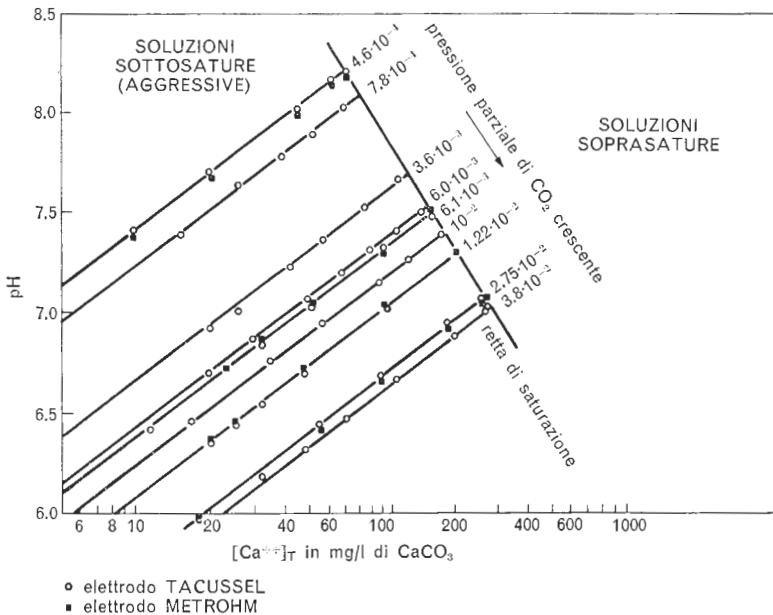


Fig. 9.2. Relazioni tra la concentrazione di  $\text{Ca}^{++}$  in soluzione ed il Ph, tenendo conto delle pressioni parziali di  $\text{CO}_2$  (secondo H. ROQUES, in « Le Grotte d'Italia », 1973). Questo diagramma è valido per la temperatura di  $10^\circ\text{C}$ .

dità (il valore del pH diminuisce); contemporaneamente le percentuali di saturazione del  $\text{CaCO}_3$  aumentano (75 mg/litro alla pressione di  $\text{CO}_2$  di  $4,6 \times 10^{-4}$ , quasi 300 mg/litro alla pressione di  $\text{CO}_2$  di  $3,8 \times 10^{-2}$ ).

Il diagramma della fig. 9.3 mostra invece la curva di saturazione del  $\text{CaCO}_3$  disciolto (in mg/litro), per soluzioni a temperature diverse, in rap-

porto alle concentrazioni del  $\text{CO}_2$  disciolto (sempre in mg/litro). Qui la progressione delle due scale non è semi-logaritmica ma aritmetica. Si rileva come la quantità del  $\text{CO}_2$  disciolto, in equilibrio con il  $\text{CaCO}_3$  disciolto, varia secondo una funzione esponenziale: così, a  $20^\circ\text{C}$ , 200 mg/litro di  $\text{CaCO}_3$

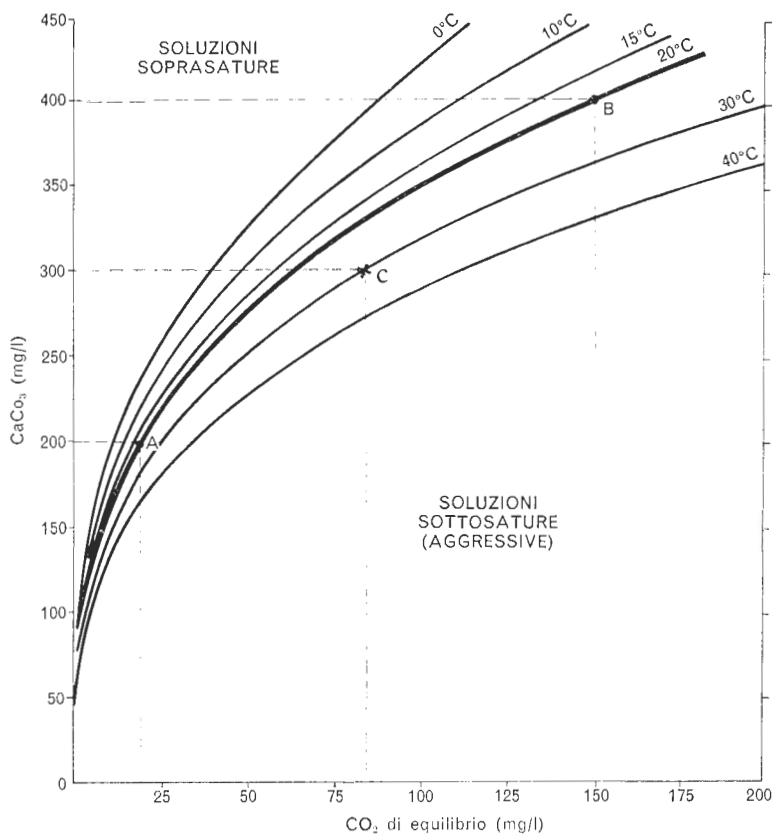


Fig. 9.3. Curve di saturazione per soluzioni di carbonato di calcio a diverse temperature, in funzione del  $\text{CO}_2$  di equilibrio, presente in soluzione (secondo F. TROMBE, in « *Traité de Spéléol.* », Paris, 1952).

sono in equilibrio di saturazione con 20 mg/litro di  $\text{CO}_2$  (soluzione A); invece 400 mg/litro di  $\text{CaCO}_3$  richiedono ben 150 mg/litro di  $\text{CO}_2$  (soluzione B).

Se si mescola insieme un litro di soluzione A con un litro di soluzione B si ottiene una soluzione con una concentrazione di 300 mg/litro di  $\text{CaCO}_3$   $((200 + 400) : 2)$  e di 85 mg/litro di  $\text{CO}_2$   $((20 + 150) : 2)$ , (soluzione C). Questa soluzione C, ottenuta dal mescolamento di due soluzioni sature a  $20^\circ\text{C}$ , è sottosatura cioè aggressiva a questa temperatura.

In natura l'azione corrosiva esercitata dalle soluzioni che derivano dal mescolamento di soluzioni sature ma di concentrazione diversa viene chiamata *corrosione per miscela di acque*. Anche raffreddando una soluzione satura la si rende aggressiva, viceversa riscaldandola la si rende soprassatura e si provoca perciò precipitazione di  $\text{CaCO}_3$ .

Recenti ricerche dimostrano inoltre che piccole quantità di magnesio possono aumentare l'aggressività delle soluzioni nei confronti del carbonato di calcio<sup>(1)</sup>. Per il principio dell'« effetto ioni simili » l'introduzione di magnesio in una soluzione dovrebbe ridurre la solubilità della calcite nella stessa. In realtà ciò succede solo se il rapporto molare ioni magnesio/ioni calcio è superiore a 0,1. Per valori inferiori del rapporto si verifica un aumento della solubilità della calcite (del 13% per un valore del rapporto di 0,03-0,04). Quest'effetto, finora sconosciuto, dello ione magnesio evidentemente riveste notevole importanza nei processi di soluzione dei calcari; si consideri infatti come in molti calcari si trovino piccole quantità di carbonato di magnesio.

Secondo il diagramma della fig. 9.2 le acque carsiche dovrebbero essere in grado di sciogliere a 10°C, e alla pressione parziale media del  $\text{CO}_2$  nell'aria (circa  $4 \cdot 10^{-4}$ ), fino a circa 70 mg/litro di  $\text{CaCO}_3$ ; cioè circa 5 volte la quantità solubile in assenza di  $\text{CO}_2$ . In realtà in molti casi le soluzioni naturali contengono quantità maggiori di carbonato disciolto, fino a 300-400 mg/litro. Ciò si spiega per l'abbondanza del  $\text{CO}_2$  presente nel suolo, prodotto dalle attività biologiche qui concentrate. La produzione del  $\text{CO}_2$  « biologico » risente dei ritmi stagionali con riflessi sull'intensità dell'« erosione » carsica. Nelle grotte di Postumia la « durezza » dell'acqua (quantità di carbonati disciolti) oscilla secondo il ciclo stagionale, ed è maggiore nelle cavità sottostanti la foresta di conifere che non in quelle corrispondenti a zone disboscate<sup>(2)</sup>.

L'intensità dell'erosione carsica varia inoltre considerevolmente da luogo a luogo in rapporto alla quantità, velocità, turbolenza e temperatura delle acque che vengono in contatto con i calcari. Gams definisce come sedi di *corrosione accelerata* quei luoghi ove l'erosione chimica è più intensa per motivi morfologico-strutturali (es.: al contatto fra calcari ed altre rocce), chimico-fisici (zone ove si verifica frequentemente la miscela di acque diverse), e biologici (aree ove la produzione della  $\text{CO}_2$  biologica è intensa)<sup>(3)</sup>.

---

(1) R. G. PICKNETT, *Rejuvenation of Aggressiveness in Calcium Carbonate Solutions by Means of Magnesium Carbonate*, « Proc. 7th Int. Spel. Congr. », Sheffield, 1977, pp. 346-348.

(2) I. GAMS, *Concentration of  $\text{CO}_2$  in the caves in relation to the air circulation (in the case of the Postojna Cave)*, « Acta Carsologica » 6/12, 1974, pp. 185-192.

(3) I. GAMS, *Types of accelerated corrosion*, in « Problems of the Speleological Research », I, Praga, 1965.

Un altro problema che non è stato ancora del tutto risolto riguarda la distribuzione verticale, all'interno dei massicci carsici, della entità della dissoluzione: in base a studi recenti sembra che la maggior parte del calcare sciolto dalle acque carsiche venga prelevato in superficie o nei primi metri di roccia. Secondo Bögli sulla roccia nuda in superficie si verifica circa il 20% della soluzione totale; sulle superfici calcaree ricoperte da suolo invece si concentra fra l'80% e il 90% dei processi di soluzione<sup>(1)</sup>. Anche Pulina ritiene che normalmente la soluzione profonda rappresenti meno del 20% del totale dei processi di soluzione. Questa soluzione profonda è imputabile, secondo molti degli studiosi attuali, soprattutto alla corrosione per miscela di acque, alla corrosione per l'effetto del magnesio, oppure a variazioni nella temperatura delle acque percolanti e circolanti in profondità (si considerino, per esempio, le notevoli differenze che si riscontrano nell'ambito delle regioni di clima temperato freddo, fra le temperature estive della superficie rispetto a quelle delle cavità profonde). Ciò risolve un problema posto da alcuni vecchi studiosi di fenomeni carsici, i quali non riuscivano a spiegarsi come le acque carsiche, che in genere si presentano già sature dopo pochi metri di scorrimento in superficie o nelle fessure, fossero in grado di scavare, per corrosione, cavità profonde (v. schema di fig. 9.13).

#### 9.4. Le forme carsiche di superficie.

Nella classificazione delle forme carsiche è utile distinguere le forme di superficie o epigee dalle forme profonde o ipogee, anche se, come vedremo meglio più avanti, esistono dei rapporti funzionali strettissimi fra i due gruppi. Anche dal punto di vista morfogenetico molte forme carsiche superficiali si spiegano solo se considerate assieme alle forme profonde che ne costituiscono, in un certo senso, il proseguimento verso il basso. Sarebbe perciò più logico considerare dei « complessi funzionali » dati dalla combinazione di forme appartenenti ai due gruppi. D'altro canto la classificazione di questi complessi risulterebbe notevolmente difficile perché non sembra esistere una correlazione stretta fra i tipi delle forme epigee e quelli delle forme profonde, e soprattutto per la complessità di queste ultime che, tra l'altro, risultano accessibili all'uomo solo in piccola parte. Perciò chi si accosta ad un paesaggio carsico potrà dapprima osservarne il rilievo esterno; successivamente, attraverso qualche punto ben localizzato, accedere

---

(1) A. BÖGLI, *Karstdenudation - das Ausmass des korrosiven Kalkabtrags*, « Regio Basiliensis », 12/2, 1971, pp. 352-361.

ad alcune cavità interne, che però rappresentano soltanto una parte dell'intero sistema carsico ipogeo<sup>(1)</sup>.

Esiste una vasta gamma di forme carsiche di superficie dalle dimensioni molto diverse, comprese fra i pochi centimetri e parecchi chilometri. La prima classificazione di queste forme è stata effettuata sulla base di studi e dati raccolti nel « Carso classico ». In seguito le forme osservate in regioni diverse sono state sempre riferite o paragonate a quelle del Carso.

#### 9.4.1. Le forme minori.

Si sono distinte le forme minori (o *microforme*) con dimensioni da centimetriche a metriche, dalla *macroforme* di dimensioni più che decametriche.

In genere le microforme sono speciali sculture in roccia provocate dalla corrosione, che nella letteratura internazionale hanno assunto i nomi generici di *Karren* (tedesco) o *lapiés* (francese). Un insieme di numerosi singoli *Karren* costituisce i *Karrenfelder* (ted.), *campi carreggiati* o *campi solcati*, in lingua italiana (fig. 9.4).

Fra queste forme se ne possono distinguere alcune che sono il risultato di processi di soluzione avvenuti sulla roccia nuda (*Karren liberi*), ed altre che si sono formate invece al di sotto di una copertura parziale (*Karren semiliberi*) o totale (*Karren coperti*) di suolo con vegetazione o di acqua stagnante.

Fra i *Karren liberi* sono comuni:

1) Le *scannellature* (*Rillenkarrren*): piccoli solchi rettilinei subparalleli, separati tra loro da sottili creste aguzze. La lunghezza delle scannellature è di 10-60 centimetri, la larghezza di 1-3 centimetri, la profondità di 0,2-2 centimetri. Si trovano su superfici con inclinazioni varie, in prossimità degli spartiacque fra i piccoli bacini idrografici nei quali è suddivisibile la superficie rocciosa dei campi solcati.

2) Le *impronte* (*Trittkarren*): si tratta di piccole cavità a fondo piatto e contorno semicircolare, aperte da un lato, situate su superfici non molto inclinate. Il diametro del fondo piatto si aggira intorno ai 5-10 centimetri.

3) I *solchi carsici* o « *docce* » (*Rinnenkarren*) sono solchi della larghezza e profondità di parecchi centimetri e della lunghezza di diversi metri. Essi presentano talvolta andamento tortuoso con meandri sulle superfici poco inclinate; hanno invece andamento rettilineo su superfici più inclinate. Sulle superfici subverticali possono essere sostituiti da solchi con larghezze e profondità considerevolmente maggiori.

(1) Da questo fatto è derivata la distinzione iniziale fra « carsologia » intesa soprattutto come studio delle forme epigee, e « speleologia » o studio delle cavità sotterranee accessibili all'uomo, distinzione che si va attenuando nel senso di una identificazione delle due « scienze ».

Fra i *Karren semiliberi*, cioè con presenza temporanea di acqua stagnante, le forme più importanti sono le *vaschette di corrosione* (*Kamenitza*: dal croato *kamenica*). Si tratta di cavità chiuse, a perimetro subcircolare o ellittico, della lunghezza compresa fra 5 centimetri ed alcuni metri, con fondo piatto disposto orizzontalmente, almeno nelle forme medie e grandi.

Fra i *Karren coperti* si distinguono varie forme arrotondate (*Rundkarren*). Può trattarsi di solchi subparalleli a fondo arrotondato separati da creste pure arrotondate, o di profondi camini imbutiformi riempiti di materiali di decalcificazione (*organi geologici*). Talora si tratta di forme poligeniche derivate cioè da *Karren liberi* e *semiliberi*, poi ricoperti completamente dal suolo o variamente modificati.

Meno legati a precise condizioni « libere », « semilibere » o « coperte » sono i *fori* e i *crepacci carsici*. I *fori* sono piccole cavità a sezione subcircolare paragonabili a vere e proprie microcaverne; si formano sia sotto una copertura di suolo, sia all'interno di masse calcaree prive di tale copertura esterna.

I *crepacci* (*Kluftkarren*) sono solchi di larghezza variabile e di profondità e di lunghezza considerevoli. A differenza delle « docce » essi sono impostati in corrispondenza di fratture, e verso il basso possono terminare bruscamente su uno strato sottostante (*crepacci del tipo « trincea »*), o assottigliarsi gradualmente nel piano della stessa frattura che ne ha facilitato lo sviluppo (*crepacci di diacalse*).

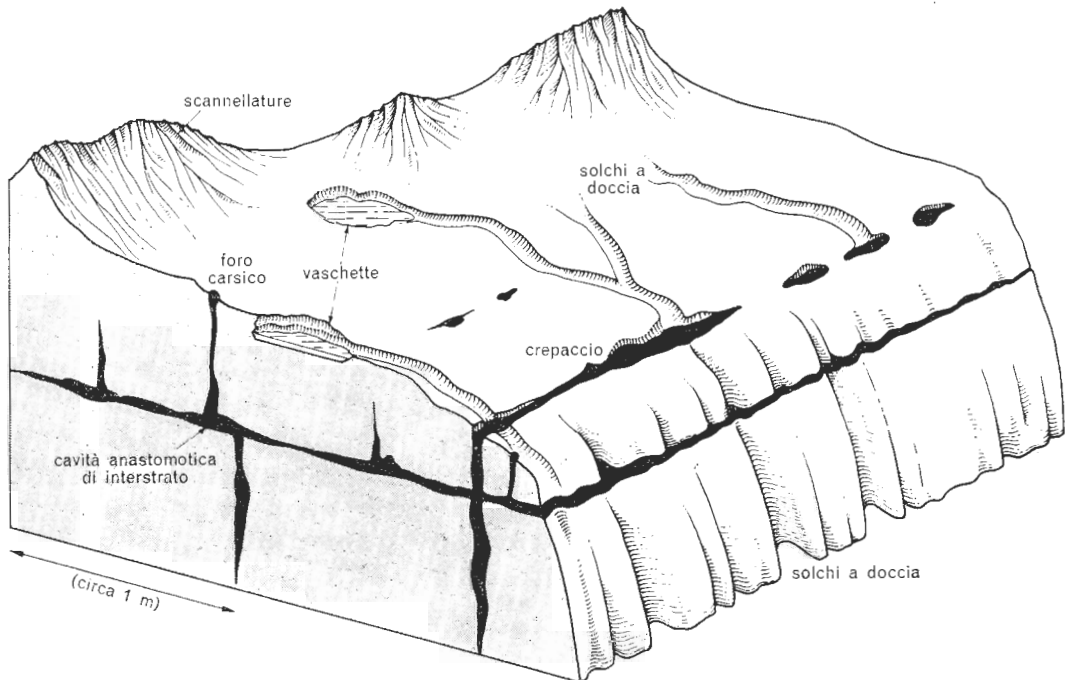


Fig. 9.4. Stereogramma schematico e nomenclatura delle principali forme carsiche minori su roccia nuda.

Infine molto frequenti sono le forme composite. Così le vaschette di medie e grandi dimensioni presentano un solco a doccia come via di scarico per l'acqua, che inizia in corrispondenza del punto più basso del perimetro della cavità (livello di soglia).

In ambienti tropicali e subtropicali umidi le superfici calcaree scoperte sono di frequente scolpite in un rilievo a *creste e pinnacoli alveolati* e presentano aspetto spugnoso. Le superfici sono ricoperte da una patina scura che al microscopio risulta essere costituita da microorganismi. Sono proprio questi microorganismi a facilitare l'attacco della roccia. Anche alle nostre latitudini, per esempio su certe pareti delle Dolomiti, sono state osservate superfici calcaree spugnose per la presenza di *cavità alveolari* con diametri di circa 1 cm. All'interno di queste cavità vivono *colonie di alghe e licheni* (fig. 4.1).

Complessi originali di forme sono certi paesaggi rocciosi del tipo *città di roccia* che consistono in complessi di grossi blocchi calcarei variamente arrotondati e scolpiti dalle azioni erosive. Si tratta di forme legate, oltre che alla corrosione, anche ad altri processi di degradazione (es.: i fenomeni crioclastici). I paesaggi del Rosso Ammonitico delle Prealpi Venete occidentali sono begli esempi di città di roccia<sup>(1)</sup>.

Alfred Bögli (1960) ha dimostrato che le scannellature si originano ad opera della corrosione da parte della pioggia. Ciò si verifica nel primo tratto del percorso delle gocce sulla roccia e solo nelle posizioni più vicine agli spartiacque, ove, durante le piogge, non si forma uno strato scorrente laminare di acqua. Proseguendo il percorso, nell'ambito dello strato scorrente laminare, si individuano delle correnti lineari, dove l'acqua è più abbondante, che facilitano lo scavo delle « docce » carsiche.

Le vaschette di corrosione sono forme che risultano dall'azione solvente di acqua stagnante combinata ad azioni biologiche. La corrosione tende ad allargare le vaschette operando alla base dei fianchi dove è più lunga la presenza dell'acqua nei periodi asciutti, dopo le piogge. I crepacci ed i fori sono legati a processi di speleogenesi. Essi costituiscono un insieme di vuoti che facilitano la penetrazione dell'acqua in profondità, anche per mezzo delle *cavità anastomotiche di interstrato* (fig. 9.4).

#### 9.4.2. *Doline ed uvala.*

Fra le macroforme carsiche la più tipica, che rappresenta un po' il simbolo dei paesaggi carsici, è la dolina<sup>(2)</sup>.

(1) U. SAURO, *Il paesaggio degli Alti Lessini - Studio geomorfologico*, Museo Civ. St. Nat. Verona, Mem. f.s. 6, 1973.

(2) Il nome della dolina deriva da « dol » che in slavo vuol dire « valle »; dolina corrisponderebbe perciò a « piccola valle ». Nonostante questo termine sia entrato da tempo nell'uso comune i carsologi slavi hanno proposto di modificarlo per il suo significato etimologico troppo generico; tra gli altri I. Gams propone il termine di « kraska ».

La *dolina* è una conca chiusa, un bacino che si riempirebbe d'acqua a originare un laghetto se le pareti ed il fondo fossero impermeabili; invece, di solito, l'acqua viene assorbita attraverso vie sotterranee, che però solo di rado si aprono in superficie come cavità ben rilevabili o accessibili all'uomo; spesso il suolo od il detrito mascherano i punti assorbenti.

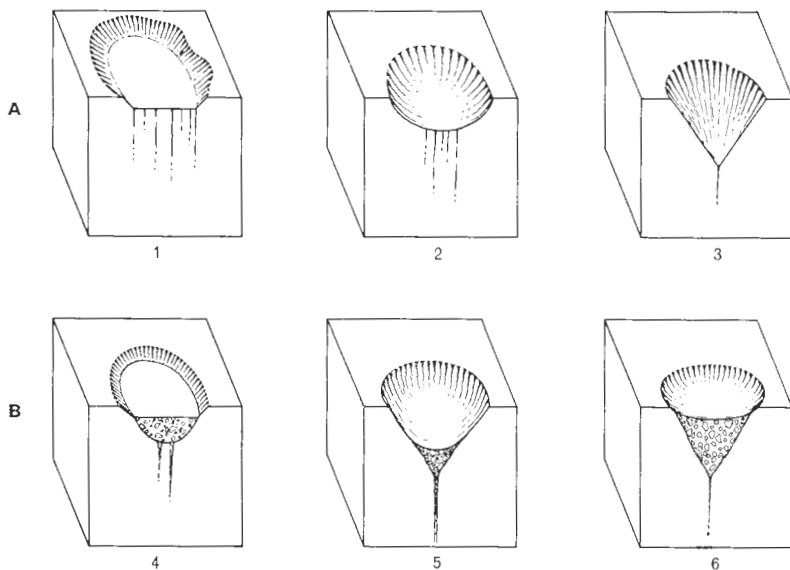


Fig. 9.5. Disegno schematico di alcuni tipi di doline.

A. Doline senza depositi di riempimento: 1. a piatto; 2. a ciotola; 3. a imbuto.

B. Doline con depositi di riempimento: 4. a piatto; 5. a ciotola; 6. a piatto.

Il tipo 4 deriva dal riempimento parziale di una forma a ciotola (2), il tipo 5 da una forma a imbuto (3), così pure il tipo 6.

Le dimensioni sono comprese per il diametro fra i 10 e i 1000 metri e per la profondità fra i 2 e i 200 metri. La forma in pianta può essere circolare, ellittica o irregolare, mentre la sezione verticale mostra sviluppi in altezza molto variabili anche in rapporto al diametro. Le forme tridimensionali più comuni che ne risultano sono (fig. 9.5):

— a *piatto* (forma ampia e poco profonda con il fondo piatto; il rapporto diametro medio/profondità è superiore a 5);

— a *ciotola* o a *scodella* (forma relativamente più profonda con i versanti complessivamente concavi; in genere il rapporto diametro/profondità è compreso fra 2 e 5);

— a *imbuto* (forma all'incirca conica i cui versanti sono uniformemente inclinati verso un punto centrale; il rapporto diametro/profondità è spesso inferiore a 2);



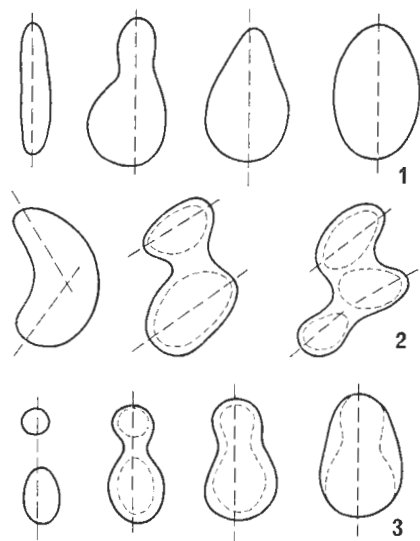


Fig. 9.6. Perimetri tipici di doline (da A. G. SEGRE, 1948).

1. Perimetri semplici; 2. Perimetri determinati da più diaclasi; 3. Sviluppo di una dolina, per fusione di due doline minori.

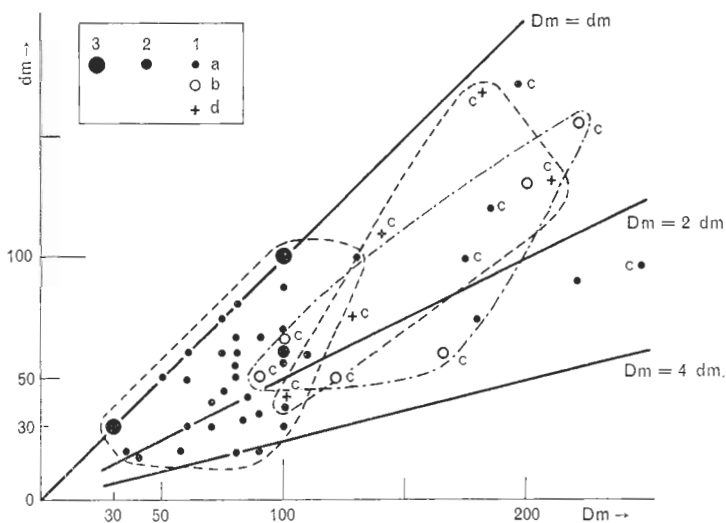


Fig. 9.7. Esempio di studio morfometrico di doline (secondo A. G. SEGRE, *I fenomeni carsici e la spel. del Lazio*, 1948).

Campi di frequenza del rapporto «Diametro maggiore/diametro minore», di alcune grandi doline, suddivise per gruppi montuosi.

a. Doline dei M. Lepini; b. dei M. Sabini; c. Doline di crollo; d. dei M. Cornicolani; 1, 2, 3. Numero delle doline dei Lepini con dimensioni coincidenti.

— a *pozzo* (le pareti sono subverticali per cui la forma tende a diventare cilindrica; la profondità può essere considerevolmente superiore al diametro).

Le doline, le cui forme più frequenti sono quella a piatto e a ciotola con diametri di alcune decine di metri e profondità di 5-20 metri, sono abbondanti sulle superfici poco inclinate degli altopiani carsici mentre risultano piuttosto rare sui versanti più ripidi. Le densità sono comunque molto variabili; si riscontrano valori compresi fra poche unità e parecchie decine per chilometro quadrato. La disposizione risulta, in genere, irregolare, ma spesso un'attenta lettura della carta permette di riconoscere degli allineamenti che corrispondono a sistemi di fratture o alla direzione di piccole valli secche. Doline coalescenti fra di loro possono originare delle forme composite dal contorno ameboide (fig. 9.6).

Dal punto di vista genetico sono stati distinti i seguenti tipi di doline (fig. 9.8):

— *doline di soluzione normale*: si sarebbero originate per dissoluzione della roccia da parte dell'acqua di ruscellamento superficiale in movimento centripeto verso un punto assorbente che diventa così il centro di una forma chiusa che si approfondisce sempre di più; si tenga presente che si verifica una concentrazione dell'acqua (aumento della quantità che scorre su una certa unità di superficie) dalla periferia verso il centro; in questo senso il centro della dolina diventa veramente un luogo di « corrosione accelerata »;

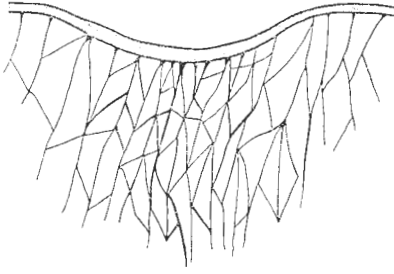
— *doline alluvionali*: sono delle conche chiuse che si formano in materiali alluvionali in seguito all'originarsi, in rocce solubili sottostanti, di cavità carsiche di soluzione subsuperficiale o di crollo;

— *doline di collasso o di crollo*: sono cavità spesso a pozzo nei calcari o in altre rocce solubili, formatesi per il crollo del soffitto di grotte;

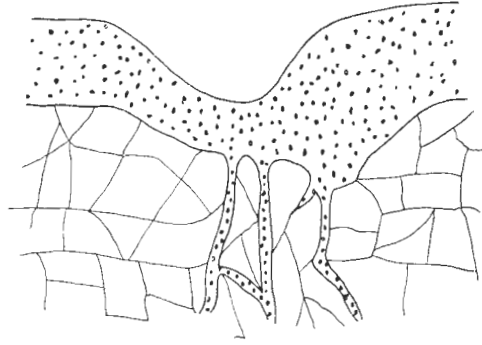
— *doline di subsidenza in roccia*: sono cavità che si formano in rocce coerenti e permeabili ma non solubili (es.: arenarie), che poggiano su rocce solubili; lo scavo di cavità carsiche nelle rocce solubili provoca fenomeni di crollo e subsidenza nelle formazioni rigide sovrastanti.

Le doline di gran lunga più numerose appartengono al primo tipo; più rare le cavità degli altri tipi; quelle a pozzo di crollo presentano talora caratteri spettacolari e profondità notevoli, offrono inoltre la possibilità di osservare dall'alto dei fiumi sotterranei e di accedere a grotte (in tal caso sono dette: *finestre di crollo*).

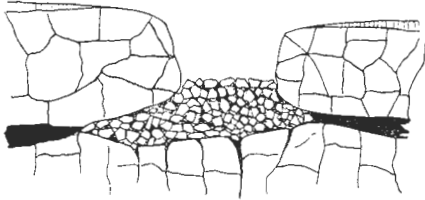
1 DOLINA DI SOLUZIONE NORMALE



2 DOLINA ALLUVIONALE



3 DOLINA A POZZO DI CROLLO



4 DOLINA DI SUBSIDENZA IN ROCCIA

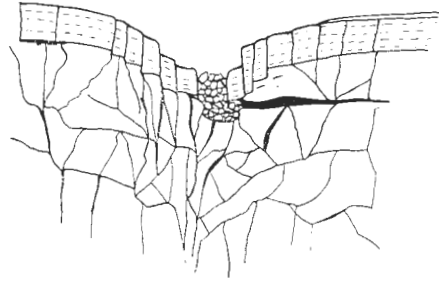


Fig. 9.8. Tipi di doline in rapporto alla loro genesi (da P.W. WILLIAMS, in *Water, Earth and Man*, a cura di R.J. CHORLEY 1969, ridisegnato e modificato).

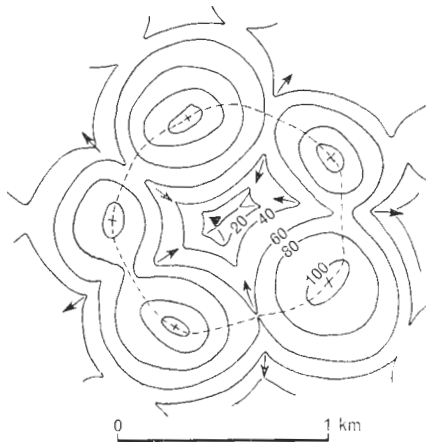


Fig. 9.9. Rappresentazione topografica schematica di un *cockpit*.

La conca presenta forma stellata o poligonale ed è delimitata da colline emisferiche a cupola separate da selle. In questo caso la profondità massima è di circa 120 metri, quella minima di circa 50. La linea a trattini delimita il bacino del cockpit, le frecce mostrano il senso del drenaggio, il triangolino indica l'inghiottitoio centrale.

Fra i tipi di doline propri di regioni tropicali umide meritano di essere qui ricordati i *cenotes* ed i *cockpit*. I cenotes dello Yucatan (Messico) sono enormi pozzi di crollo spesso con laghetti sul fondo, resi famosi per i riti sacrificali ivi praticati nel periodo Maya. I cockpit presentano un contorno stellato o poligonale risultante da un sistema raggiato di vallette dirette verso l'inghiottitoio centrale (fig. 9.9); inoltre le dimensioni sono considerevoli; per esempio sul M. Kaijende in Nuova Guinea l'area media è di circa 0,5 km<sup>2</sup>.

Nell'ambito delle regioni calcaree della fascia temperata forme più grandi delle doline sono le *uvala* che possono derivare dalla coalescenza di più doline (in tal caso la forma planimetrica complessiva può ricordare un gruppo di chicchi d'uva), o essere costituite da grandi conche influenzate da situazioni strutturali locali.

#### 9.4.3. *Polje*.

Forme carsiche chiuse molto grandi, di dimensioni chilometriche, sono i *polje* (*campi piani* nel significato del termine slavo; un equivalente italiano è il termine *piano* che si ritrova nella toponomastica dell'Appennino e delle Prealpi Venete). Secondo Gams un *polje*, per essere definito tale, deve possedere una lunghezza di almeno un chilometro.

Un *polje* tipico presenta un fondo piano ed orizzontale e versanti relativamente ripidi (circa 30°). L'angolo di raccordo fra le due superfici è brusco. Nei *polje* « attivi » il fondo viene allagato stagionalmente, quando gli inghiottitoi non riescono a smaltire tutta l'acqua che affluisce nel bacino. Nella stagione umida alcuni inghiottitoi possono addirittura trasformarsi in sorgenti (sorgenti-inghiottitoi o *estavelle*). Il fondo piano può presentare una sottile copertura alluvionale che maschera alcuni inghiottitoi; però in genere manca una copertura detritica alla base dei versanti in quanto l'inondazione periodica rimuove i materiali sciolti.

A causa dell'inondazione si verifica una *corrosione marginale* che mantiene brusco l'angolo di raccordo fra il fondo della conca ed i versanti. Esistono però molti *polje* inattivi, in via di degradazione, dove non si verifica da molto tempo l'inondazione.

I *polje* più grandi e tipici sono quelli della Jugoslavia (famosi sono quelli di Livno, che misura 70 × 10 km, Popovo, di 40 × 1,5 km, Cerknica o Circonio, di 9 × 5 km); però se ne trovano di spettacolari anche nella Provenza, nell'Appennino centrale, in Sicilia, nelle Prealpi Venete (Piano del Cansiglio), presso Monfalcone ecc.

Tutti i grandi *polje* sono situati in depressioni tettoniche (graben, sinclinali, depressioni di angolo di faglia) ed in molti casi al contatto fra rocce

solubili e rocce insolubili (*polje di contatto litologico*). La situazione di « contatto » sembra favorire lo sviluppo dei polje in quanto la parte del bacino idrografico in rocce insolubili convoglia acqua ricca in materiali solidi verso la zona dei calcari.

Il detrito insolubile si accumula nelle aree più depresse proteggendole dalla corrosione mentre vengono attaccate le parti rocciose emergenti. In questo modo il fondo del polje si può allargare come una forma piana

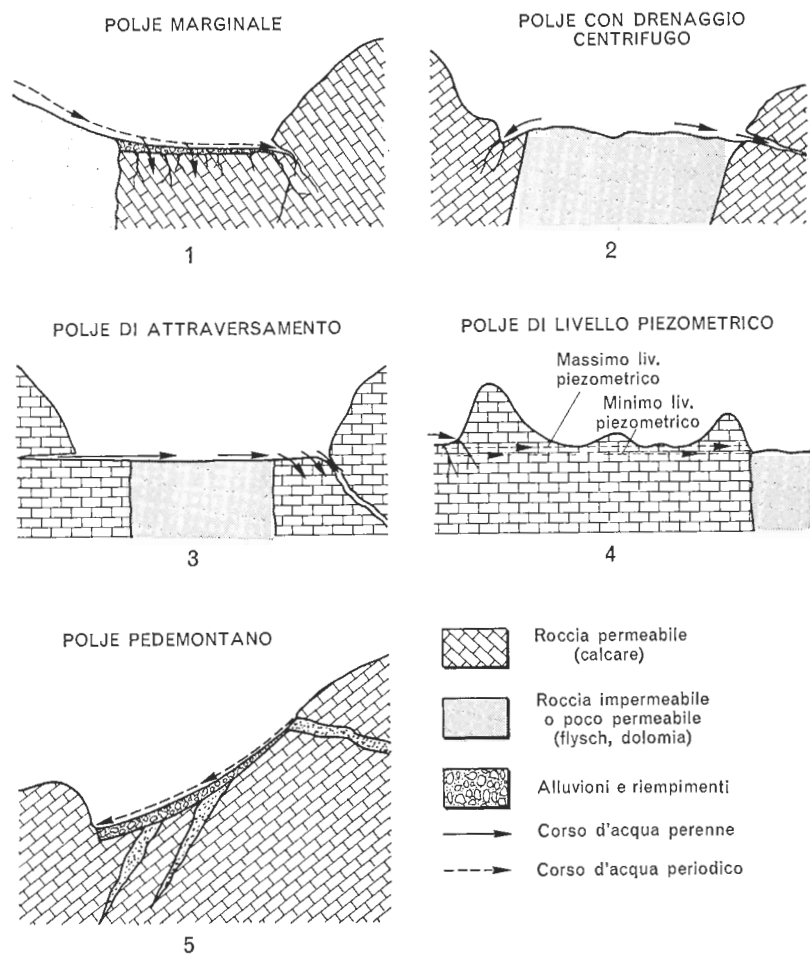


Fig. 9.10. Tipi « morfologico-idrologici » di polje (secondo I. GAMS, *Slovene Karst Terminology*, 1973. Si noti, nei profili 1, 2, 3 e 5, la forte pendenza dei versanti calcarei che sovrastano i punti assorbenti, rispetto alle superfici subpianeggianti o poco inclinate del fondo dei polje. I polje di tipo 1, 2 e 3 si sono formati tutti in rapporto al contatto rocce permeabili-roccie impermeabili: le diverse situazioni morfologico-strutturali hanno determinato i vari tipi di evoluzione. I polje più famosi del carso dinarico appartengono ai tipi 1 e 3; questi polje sono inondabili e possono perciò trasformarsi in laghi carsici temporanei.

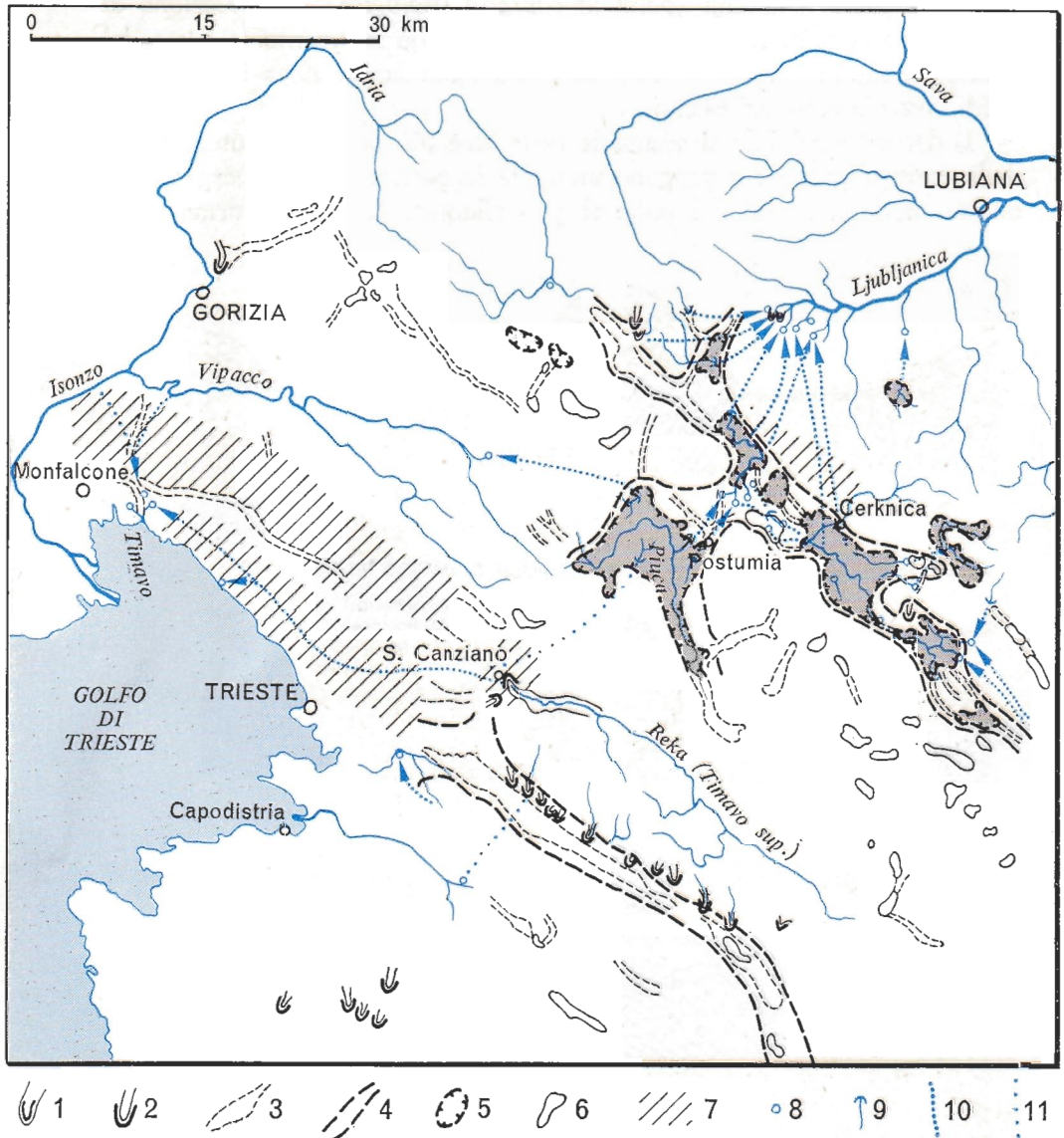


Fig. 9.11. Carta morfologico-idrogeologica del Carso (da I. GAMS, *Kras*, 1974, ridis. e semplif.). Si osservi come le principali forme (valli, polje ecc.) tendono ad allinearsi secondo la direzione NW-SE, dimostrando così di essere influenzate dalle condizioni tettoniche. Viene messa in risalto la rete delle connessioni idrografiche sotterranee fra le varie conche chiuse e i fiumi del bacino danubiano da un lato, e l'Adriatico dall'altro; uno dei percorsi sotterranei più lunghi è quello fra la valle del F. Reka e le sorgenti del Timavo.

1. Valle cieca; 2. Valle chiusa (o di sorgente); 3. Valle secca; 4. Sistema di valli secche o altre depressioni carsiche; 5. Polje; 6. Uvala; 7. Superfici carsiche spianate; 8. Sorgente carsica; 9. Ponor (inghiottitoio); 10. Connessioni idriche sotterranee accertate; 11. Connessioni incerte o saltuarie.

orizzontale modellata nelle rocce solubili. La formazione di questi *piani di corrosione carsica* ha perciò luogo per un fenomeno di *spianamento da dissoluzione*.

Sul fondo piano di certi polje si elevano delle piccole colline dai fianchi ripidi: si tratta di rilievi calcarei residuali, che vengono via via rimpiccioliti dai fenomeni di corrosione marginale, e sono detti *hum*.

Nel Carso dinarico esistono anche dei *polje aperti*, cioè delle forme che presentano tutti i caratteri degli altri polje salvo il fatto che la «piana» non è circondata su tutti i lati da rilievi ma costituisce parte di un fondo-valle raccordato con il livello di base fluviale.

Polje aperti di grandi dimensioni si trovano nelle regioni tropicali umide. Si tratta di estese pianure modellate nei calcari (*piani carsici marginali*, in tedesco *Karstrandebenen*, cfr. paragrafo 9.7) sulle quali divagano i corsi d'acqua e si elevano dei grandi «hum» a forma di torrioni. I corsi d'acqua scavano, per corrosione marginale, nicchie ai piedi delle «torri» (intagli basali da corrosione) e talora anche delle caverne che le attraversano.

#### 9.4.4. Valli carsiche.

Come grandi forme carsiche vengono classificati anche certi tipi di valli. Propriamente una valle non è una forma carsica ma il risultato dell'azione erosiva di un corso d'acqua superficiale; ciononostante in territori carsici si trovano delle valli sia percorse da fiumi, sia asciutte, che presentano alcuni caratteri particolari distintivi rispetto alle valli «normali». Dove vi sia un fiume, l'alveo e il subalveo sono quasi sempre sede di corrosione accelerata a spese delle rocce calcaree.

Un tipo di valle abbastanza frequente nei calcari è la *gola* o *canyon carsico*; si tratta di profonde forre dai ripidi versanti in roccia, il cui fondo può essere percorso da un fiume oppure asciutto; nel primo caso il fiume può provenire da un territorio costituito da rocce insolubili; si parla allora di *valli allogeniche*. La formazione e la conservazione di questi canyon si spiega considerando sia la resistenza meccanica di certe rocce calcaree, sia il fatto che non esistono affluenti superficiali: infatti parte dell'alimentazione proviene dagli altopiani carsici laterali alle gole, attraverso vie sotterranee che fanno capo a sorgenti situate sul fondo delle incisioni. Alcune vallette secche laterali risultano «sospese» al di sopra del fondo della forra.

Risultato della carsificazione di valli fluviali modellate in rocce solubili sono le *valli morte* e le *valli cieche*.

Una valle morta manca d'un corso d'acqua sul fondo, che è cosparso di punti di assorbimento, visibili o mascherati da depositi alluvionali o

detritici. Spesso vi si osservano varie doline che ampliandosi possono trasformare totalmente il fondovalle, rendendolo irregolare.

Una valle cieca ha invece un corso d'acqua, ma questo non arriva a defluire alla foce per una via superficiale. Una valle fluviale comincia a trasformarsi in una valle cieca quando sul suo fondo si apre un inghiottitoio che assorbe tutta l'acqua del fiume. Questo inghiottitoio tende ad approfondirsi insieme alla valle a monte, mentre non si approfondisce il tratto della valle posto oltre l'inghiottitoio. In superficie la valle cieca, dopo una brusca contropendenza, si continua così in una valle senz'acqua (*valle morta* o *valle secca*).

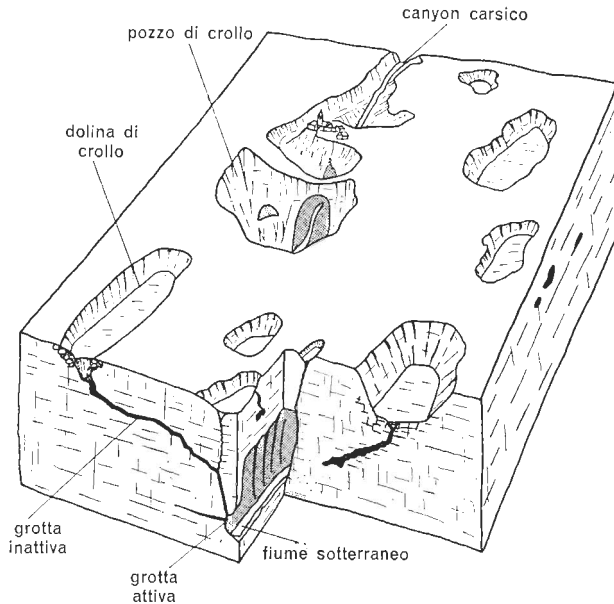


Fig. 9.12. Stereogramma della zona di S. Canziano, ove il fiume Timavo superiore (Reka) diventa sotterraneo (da E. W. BAUER, *Mondo senza sole*, Ed. Rizzoli, Milano 1971).

Il fiume Timavo superiore, proviene da un territorio costituito da rocce impermeabili (fiume allogenic), quando raggiunge i calcari scorre per un breve tratto sul fondo di una profonda gola (canyon carsico); entra poi in un ampio pozzo di crollo (finestra di crollo) passando al di sotto di un alto ponte naturale; infine si inabissa in una grande grotta (visibile nello spaccato, in basso). Le doline di crollo, riconoscibili ai due lati della grotta, sono localizzate in corrispondenza di antichi corsi sotterranei del fiume, ora abbandonati.

Già Cvijić ha osservato come, con il procedere della carsificazione, in una valle cieca si vadano individuando nuovi inghiottitoi da valle verso monte con la conseguenza che il tratto attivo della valle si riduce sempre più, mentre la valle secca si allunga.

Il fenomeno della *retrocessione degli inghiottitoi* è legato allo sviluppo da valle, dove l'acqua è più abbondante, verso monte, di un sistema di con-



dotte carsiche sotterranee che sostituisce, dal punto di vista funzionale, l'alveo superficiale.

Altre valli cieche si formano quando un corso d'acqua passa da terreni impermeabili ad un'area carsica. In questo senso è una valle cieca quella del Reka o Timavo superiore, che termina poco dopo essere entrato nell'area carsica, alle grotte di S. Canziano (v. fig. 9.12).

Due tipi particolari di valli simili ai « canyon » possono essere il risultato dell'azione di grosse sorgenti carsiche o del crollo di gallerie. Una grossa sorgente può provocare, per erosione regressiva, lo scavo di una forra che però si chiude bruscamente in corrispondenza del punto emittente. Questa *valle chiusa* (fr.: *reculé*) si può considerare una forma opposta rispetto alla valle cieca. Nel Giura francese esiste una valle chiusa lunga 8 km.

I *canyon di crollo* sono relativamente meno frequenti e derivano dalla fusione di più doline di crollo (es.: valle del Rak e parte terminale della valle del Reka in Slovenia); ad essi sono spesso associati ponti naturali dati da tratti residui della volta crollata.

Carattere frequente delle valli carsiche è il fatto che le valli secondarie (in quanto siano valli morte) sono sospese sulle principali.

#### 9.4.5. Fenomeni di deposizione calcarea e forme corrispondenti.

Fra le forme carsiche di superficie ne esistono alcune dovute a « costruzione », ossia legate alla precipitazione e ricristallizzazione del carbonato di calcio presente nelle soluzioni. Il carbonato di calcio può precipitare:

— in prossimità delle sorgenti, formando accumuli concrezionali di *travertino* che inglobano numerosi resti vegetali;

— lungo il fondo di canyon carsici attivi, formando vere e proprie *dighe di travertino*, che determinano la formazione di laghetti di sbarramento (molto famosi sono i laghetti di Plitvice in Jugoslavia); sembra che nella formazione di questi depositi di travertino intervengano, in modo determinante, alcuni microorganismi vegetali;

— all'interno del regolite, formando croste calcaree (*calcrete*, *calcrust*, *caliche*) o saldando fra di loro frammenti rocciosi preesistenti (conglomerati).

Le croste calcaree presentano strutture che dipendono in parte dall'ambiente climatico di formazione e raggiungono talora spessori considerevoli. Sono particolarmente abbondanti nelle regioni subtropicali con climi caratterizzati da un'alternanza accentuata di stagioni umide ed aride; qui i

processi dell'erosione possono poi portarle in superficie e quindi intagliarle e modellarle in forme tabulari.

Quando, in ambienti semiaridi, la cementazione interessa sabbie calcaree di deposizione eolica, si formano rocce dette *eolianiti*, su cui possono ulteriormente instaurarsi fenomeni di corrosione (esempi sono conosciuti in Australia, in Somalia, ecc.).

## 9.5. Le cavità sotterranee.

### 9.5.1. Osservazioni generali.

L'uomo è penetrato nelle grotte fin dalla preistoria: prima per rifugiarsi, ed in seguito mosso da curiosità; « *grotte* » si possono definire tutte le *cavità accessibili all'uomo*. Queste però costituiscono solo una piccola parte del reticolo di cavità sotterranee presenti all'interno dei rilievi calcarei.

Si sogliono distinguere:

- (a<sub>1</sub>) cavità suborizzontali (*gallerie*);
- (a<sub>2</sub>) cavità ad asse di allungamento inclinato;
- (a<sub>3</sub>) cavità subverticali (*pozzi e abissi*).

Tutte queste cavità a loro volta possono essere:

- (b<sub>1</sub>) cavità praticamente prive d'acqua;
- (b<sub>2</sub>) cavità con acqua abbondante, ma che possono diventare temporaneamente asciutte o anche completamente inondate;
- (b<sub>3</sub>) cavità sempre piene d'acqua.

La ricerca speleologica ha ormai acquisito molti dati, grazie sia al progresso tecnico ed organizzativo raggiunto dall'esplorazione, sia all'impegno in campo scientifico.

In base all'osservazione diretta si è rilevato che normalmente all'interno di un massiccio carsico, dall'alto verso il basso, si passa da cavità piuttosto asciutte verso cavità via via più ricche d'acqua, fino a cavità permanentemente allagate; risulta inoltre che questa « stratificazione » di vuoti ipogei con caratteri idrologici diversi corrisponde anche ad una sequenza ideale di forme (figura 9.13). In particolare le gallerie più esterne ed asciutte, che risultano più facilmente accessibili, presentano forme irregolari sia in pianta che nelle sezioni verticali. Il fondo è di solito occupato da argille provenienti dalla superficie, o da blocchi crollati dal soffitto, o da concrezioni di calcite. Le pareti ed il soffitto possono mostrare nicchie di distacco di blocchi, o essere ricoperte da uno strato di concrezione calcitica, oppure presentare

nicchie ed incavi di corrosione. Spesso all'incrocio di gallerie si trovano le *sale*: ampi vani di pianta quadrangolare o ellittica, il cui pavimento spesso è costituito da un cono di massi di crollo. I pozzi verticali della zona più esterna possono aver assunto in seguito alla caduta di blocchi una forma svasata a campana, o aver subito fenomeni di riempimento con materiali provenienti dall'esterno.

Fra i più lunghi sistemi di grotte esplorate ricordo il Flint Ridge Cave System + Mammoth Cave (USA) che supera i 250 km di sviluppo; la grotta di Hölloch (Svizzera), esplorata per più di 130 km; la grotta Optimisticheskaya, in Russia, che è un labirinto lungo circa 100 km. In Italia sono state esplorate almeno quattro grotte lunghe più di 10 km. Fra gli abissi il più profondo del mondo è quello di Pierre St. Martin (Pirenei, Francia) con 1230 m di dislivello. In Italia gli abissi più profondi sono l'antra del Corchia (Toscana) di 950 m; la Grotta di M. Cucco (Umbria) di 923 m; l'abisso Michele Gortani (Friuli) di 920 m; e la Spluga della Preta (Veneto) di 890 m. Per dare un'idea della variabilità delle dimensioni delle cavità basta, per esempio, confrontare il volume della « Sala Grande » della grotta del Fiume Vento (Marche), superiore a 1.000.000 di m<sup>3</sup>, con quello del lunghissimo labirinto di Optimisticheskaya del volume complessivo di soli 240.000 m<sup>3</sup>.

### 9.5.2. Cenni sulla speleogenesi.

I principali processi che intervengono nella formazione delle grotte si possono raggruppare così:

1) L'azione delle soluzioni acquose, con la loro capacità di esercitare la corrosione sui calcari e di ridepositare carbonato di calcio in forma di concrezioni.

2) L'azione dell'acqua in quanto opera un'erosione meccanica sul letto dei ruscelli o fiumi sotterranei ed inoltre esercita il trasporto e il deposito di materiali (ghiaie, sabbie, argille ecc.).

3) L'azione della gravità, che determina crolli dalle volte e dalle pareti di cavità già formate; ne risultano ammassi di detriti, spesso di grossi blocchi, sul fondo di molte caverne.

Se non esistono già prima che si instauri il processo carsico fessure beanti e altre cavità interne di origine tettonica e fessure di distensione, i primi processi responsabili della creazione delle condotte e dei vani sotterranei sono quelli del gruppo 1); infatti l'acqua ha la capacità di circolare sia pur lentamente entro fessure anche minute, operando l'allargamento progressivo di una parte di esse e facilitando così, col tempo, l'instaurarsi di

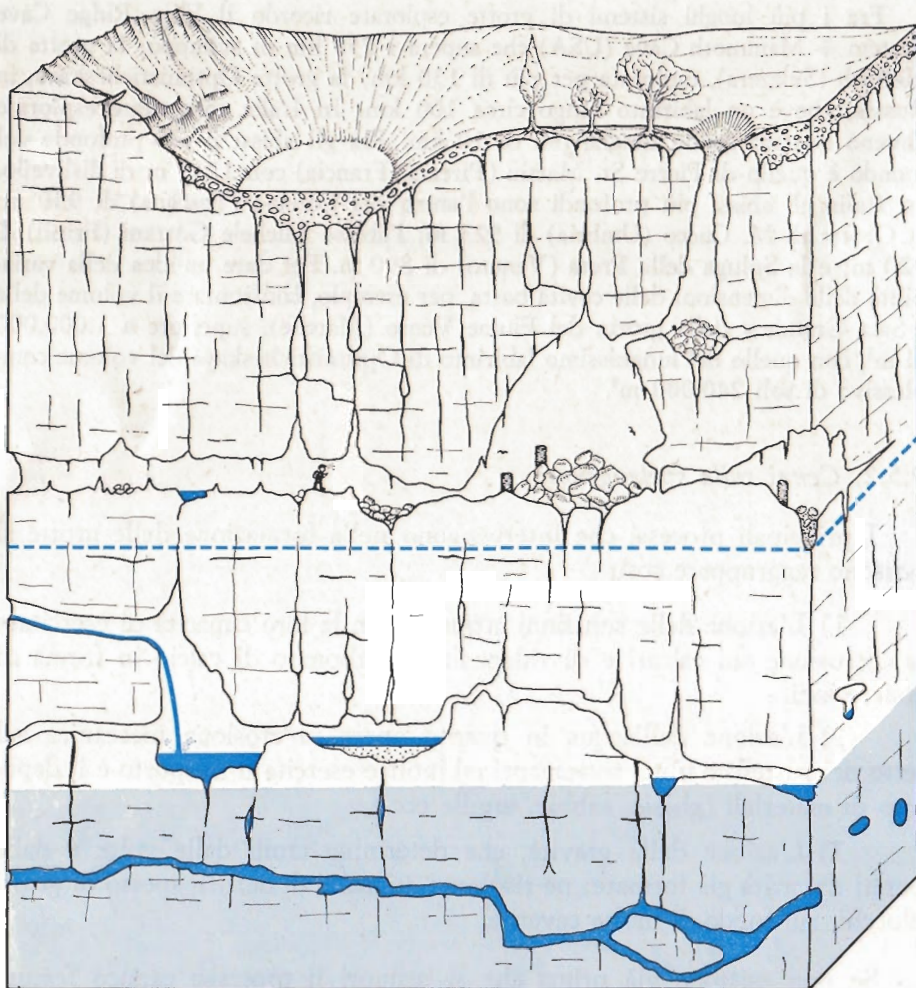


Fig. 9.13. Spaccato verticale schematico di un sistema carsico.

FORME	ZONE E ASPETTI IDROGEOLOGICI	ZONE GEOCHIMICHE
— Karren		
— Dolina (con deposito di riempimento)		
— Reticolo di fessure carsiche		
— Cavità assorbenti — cavità fusoidali, pozzi	Zona di aerazione o superiore	Zona di dissoluzione superficiale
— Galleria con sale, camini, concrezioni	Zona vadosa o di percolazione	(Zona neutra)
— Depositi di crollo		
— Cavità fusoidali embrionali	Zona di transizione o intermedia	(Zona di precipitazione e concrezionamento)
— Gallerie con solco d'erosione	Zona freatica	(Zona di dissoluzione profonda (corrosione per miscela di acque ecc.))
— Pozzo - cascata	Gallerie anfibie	
— Laghetto con sedimenti	Zona di imbibizione o inferiore	
— Condotte in pressione	Movimento dell'acqua sotto pressione in poche fessure e nelle condotte	

una vera e propria circolazione d'acqua sotterranea. Nello studio delle forme variabilissime delle cavità sotterranee si dovranno però tener presenti anche i processi indicati al n. 2 e al n. 3. In particolare per i processi indicati al punto 2, occorre ben distinguere gli effetti meccanici dell'acqua che circola nelle condotte « in pressione », da quelli dovuti invece allo scorrimento « a pelo libero », che si manifestano solo con l'erosione del pavimento delle grotte.

Premettiamo qui alcuni cenni sull'*idrologia carsica*. All'inizio di questo secolo sono state formulate due teorie apparentemente antitetiche sulla circolazione delle acque carsiche profonde, rispettivamente da parte del francese E. A. Martel e dell'austriaco A. Grund.

E. A. Martel, nella sua teoria detta anche « del fiume sotterraneo », sostiene che all'interno dei massicci carsici le correnti idriche sono ben localizzate e praticamente indipendenti anche se ramificate.

Secondo Grund, invece, nei massicci carsici esiste una massa d'acqua diffusa, permanente (*acqua di fondo* o *Grundwasser*), che perde liquido ai lati attraverso le sorgenti, ma ne riceve dall'alto quantità che dipendono dalle precipitazioni meteoriche. La superficie piezometrica superiore di tale

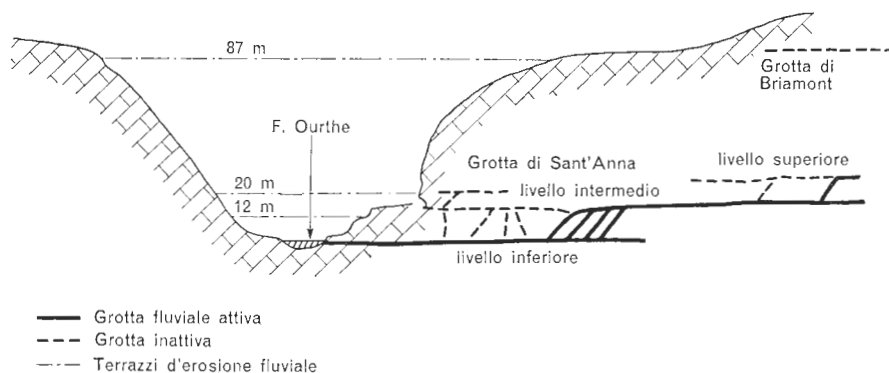


Fig. 9.14. Rapporti fra i livelli delle grotte di Briamont e di Sant'Anna presso Tiliff (Belgio), con i terrazzi erosivi della valle dell'Ourthe (da C. Ek, in « Ann. Soc. Géol. Belg. » 84, 1961).

Si noti come i livelli attivi costituiscano un sistema a gradinata, in cui cioè si alternano segmenti suborizzontali che tagliano gli strati, con segmenti molto inclinati che seguono le superfici di stratificazione.

massa oscilla quindi entro un intervallo verticale di una certa ampiezza in rapporto con il clima esterno.

Secondo il carsologo serbo J. Cvijić che perfezionò la teoria del Grund, in una rete carsica, dall'alto verso il basso, si possono distinguere *tre zone* (fig. 9.15): una *superiore di percolazione*, in cui l'acqua si trova solo durante e poco dopo le precipitazioni; una *intermedia di oscillazione*, che in certi



periodi più secchi appartiene alla zona superiore, in altri più umidi alla zona inferiore; una *inferiore o dell'acqua di fondo*, data da un reticolo di cavità riempite permanentemente d'acqua (zona freatica). La zona superiore viene anche detta *zona vadosa* (v. anche la fig. 9.13).

In realtà le due teorie di Martel e di Grund non sono inconciliabili ma rappresentano, almeno nella loro prima enunciazione, due punti di vista

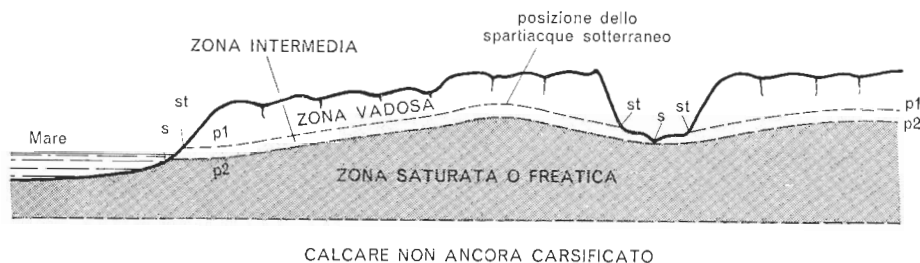


Fig. 9.15. « Zone idrogeologiche » in un sistema carsico privo di rocce impermeabili, secondo la concezione di Cvijić, che ipotizza l'esistenza di un solo corpo d'acqua, la cui superficie superiore oscilla entro un certo intervallo.

p1. Sup. piezometrica di stagione umida; p2. Sup. piezometrica di stagione secca; s. Sorgente perenne; st. Sorgente temporanea.

diversi: un po' troppo teorico l'uno (quello del Grund), basato essenzialmente su un'esperienza speleologica l'altro (quello del Martel). Da una loro saggia sintesi scaturisce però una teoria completa e convincente.

Le ricerche più recenti sull'idrogeologia carsica, basate anche sull'uso di modelli, hanno dimostrato che il primo momento evolutivo di una rete di cavità sotterranee consiste nell'avvio di una circolazione in corrispondenza di piani di debolezza della roccia. Le possibilità dell'acqua di circolare in una fessura sono legate alle condizioni di tensione della massa rocciosa determinate sia dalla situazione morfologico-strutturale, sia dalla gravità (e quindi influenzate anche dall'attrazione lunisolare: maree terrestri). In una prima fase il moto dell'acqua all'interno della fessura è di tipo laminare, ma in un certo istante, quando la fessura allargata dai fenomeni di corrosione ha raggiunto una larghezza sufficiente (circa 5 mm), si inizia un moto turbolento. Presumibilmente saranno le prime fessure in cui avviene questo tipo di moto che monopolizzeranno tutta l'acqua presente nelle altre fessure della massa rocciosa circostante, esercitando un vero e proprio richiamo idrico. Tali fessure potranno perciò allargarsi ancor più per processi non soltanto di dissoluzione ma anche di erosione meccanica, trasformandosi in condotte. Ogni condotta o altra cavità sarà quindi in rapporto con un

complesso sistema di fessure carsiche che si propagano tutt'intorno e tendono ad interessare un volume di roccia col tempo via via più esteso. Con il procedere della carsificazione verso il basso, si individueranno altre cavità che dreneranno l'acqua dei sistemi sovrastanti e li sostituiranno dal punto di vista funzionale. All'interno di un massiccio carsico si andranno così distinguendo delle zone sovrapposte di diverso significato idrologico in rapporto con una successione di forme, di cui le più giovani ed attive sono le inferiori, le più vecchie ed asciutte le superiori. La rete delle fessure allargate sarà più estesa nella zona superiore, dove la carsificazione agisce da più lungo tempo ed è in rapporto con i molti punti assorbenti della superficie. Poiché nelle grotte della zona superiore circola poca acqua è presumibile che parte dell'acqua che alimenta le condotte della zona inferiore e quindi le sorgenti, percoli dall'alto lungo fessure. Che esista una *rete di piccole fessure carsiche*, è provato tra l'altro dal fatto che, poco dopo il brusco aumento della portata di molte sorgenti carsiche che segue gli acquazzoni, il deflusso diminuisce rapidamente e si stabilizza poi su valori quasi costanti o lievemente decrescenti. Il picco nella curva della portata, che è di breve durata, si spiega considerando la veloce circolazione nelle grandi cavità della «zona superiore» e intermedia. Il periodo di quasi stabilità

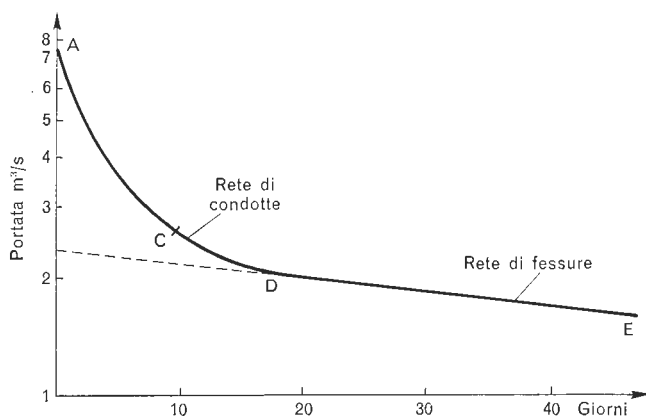


Fig. 9.16. Portata di una sorgente carsica dopo una piena, una volta cessate le precipitazioni (da P. RENAULT, *La formation des cavernes*, Presses Univ. de France, Paris, 1970).

successivo corrisponde allo svuotamento lento dell'acqua della fitta rete di fessure compresa fra i vani maggiori (fig. 9.16).

In un massiccio carsificato si verifica una *gerarchizzazione* delle vie carsiche ipogee dall'alto verso il basso; questo fatto è dimostrato dalla scarsità del numero di sorgenti rispetto all'abbondanza dei punti assorbenti in superficie. Le sorgenti, che si presentano con caratteri morfologici vari (di grotta,

a sifone risaliente, ecc.), possono mostrare portate considerevoli (di parecchi metri cubi al secondo) e raccogliere l'acqua di bacini molto estesi (decine o centinaia di km<sup>2</sup>).

Alla sorgente fa capo il *corso d'acqua sotterraneo* che si è individuato per il processo di carsogenesi profonda del massiccio calcareo. Tale corso d'acqua può presentare, a differenza dei fiumi superficiali: (1) fenomeni di *diffuenza*, cioè ramificazione dei percorsi con alimentazione di più sorgenti anche lontane fra di loro; (2) *incroci di circolazione*, naturalmente di correnti situate a livelli diversi; (3) *contropendenze* che comportano movimenti dell'acqua in salita (in questi casi le gallerie sono piene d'acqua in pressione).

Nei profili longitudinali di molti corsi d'acqua sotterranei spesso si distingue un primo tratto subverticale o molto inclinato (pozzo inghiottitoio), da uno suborizzontale (fiume sotterraneo vero e proprio). Sembra appunto che la tendenza evolutiva di un corso d'acqua che diventa sotterraneo sia quella di raggiungere velocemente il livello dell'acqua di fondo attraverso vie verticali, per poi scorrere piuttosto in senso orizzontale in prossimità della superficie piezometrica oppure entro la « zona freatica », fino a sfociare all'esterno in corrispondenza di una depressione morfologica. Naturalmente le acque tenderanno a raggiungere l'emergenza topograficamente più bassa fra quelle possibili nell'insieme calcareo considerato. È proprio il livello di quest'emergenza che deve essere considerato il *livello di base carsico* del massiccio calcareo.

La velocità media delle correnti idriche nelle condotte sotterranee suborizzontali si aggira intorno ai 100 metri l'ora con massimi di oltre 1000 metri l'ora. Nelle « fessure » invece l'acqua si muove ad una velocità molto inferiore che può essere dell'ordine di 1-10 metri l'ora.

Da quanto è stato esposto sinora risulta che le due teorie di Grund e Martel hanno entrambe una loro validità, ma che risultano piuttosto statiche e parziali, rispetto alla complessità della dinamica della carsogenesi profonda. Infatti all'interno di un massiccio carsificato le cavità ipogee non costituiscono un sistema omogeneo caratterizzato semplicemente da una differenziazione di zone verticali nel senso di Grund, né un raggruppamento di grandi cavità perfettamente indipendenti, come fu sostenuto dal Martel. Si tratta piuttosto di un « *insieme* » *non omogeneo di vuoti nell'ambito del quale si riconoscono zone preferenziali di sviluppo, fra cui esistono o tendono a stabilirsi delle relazioni funzionali.*

Per la varietà dei fattori che influenzano lo sviluppo dei reticoli carsici, ogni rete di cavità ipogee si presenta con dei caratteri suoi propri che ne riflettono l'ambiente di formazione e la storia. Le schematizzazioni hanno quindi sempre un valore parziale e possono aiutare a comprendere i fenomeni naturali solo se non le si applica in maniera troppo rigida.



Il tipo di evoluzione di una rete di cavità carsiche sotterranee è legato a numerosi fattori che possiamo riunire in quattro gruppi principali:

A) *Fattori geologici*, che si possono suddividere in:

- a) caratteri litologici del calcare interessato;
- b) posizione stratigrafica e spessore della formazione calcarea interessata, rispetto alle altre formazioni calcaree e non calcaree;
- c) condizioni strutturali date dalla densità e disposizione nello spazio dei piani di discontinuità (piani di stratificazione e fratture);
- d) movimenti tettonici contemporanei al processo di carsogenesi.

B) *Fattori geomorfologici*: si riferiscono ai dislivelli e al tipo di rilievo superficiale che può essere il risultato sia di una fase di tectogenesi recente, sia di una scultura erosiva, sia della prevalenza dei fenomeni di deposizione con seppellimento parziale delle forme d'erosione;

C) *Fattori climatici*: sono importanti sia perché riguardano la disponibilità d'acqua, sia per l'influenza che esercitano sulla velocità delle reazioni chimiche, sia perché determinano un certo gruppo di azioni morfodinamiche specifiche (es. frammentazione delle rocce superficiali da gelo-disgelo);

D) *Fattori biologici*: dipendono strettamente dalle condizioni climatiche ed agiscono nei processi di pedogenesi fornendo composti chimici (es. CO<sub>2</sub>) che prendono parte a certe reazioni, o provocando direttamente reazioni complesse.

Per esempio: fra i fattori geologici uno dei più importanti è il tipo di fratturazione della roccia. In una roccia interessata da numerose piccole fratture, queste possono venir tutte debolmente allargate dalla corrosione in modo che l'acqua instaura una circolazione lenta in una fitta rete di fessure carsiche. In questo caso si parla di *circolazione in rete diaclastica* e la situazione idrogeologica si avvicina a quella schematizzata dal Grund nella sua teoria.

Invece, in una roccia omogenea con poche grandi fratture molto distanziate, è più facile che l'acqua si scavi delle condotte carsiche importanti lungo questi piani di debolezza. In tal caso la *circolazione* avviene *in condotte «quasi» indipendenti*, come è schematizzato nella teoria di Martel.

In alcune delle teorie speleogenetiche più recenti si attribuisce molta importanza alla giacitura ed alla frequenza delle fessure penetrabili dall'acqua, ed alle proporzionalità geometriche nell'ambito di questa rete di fessure (cioè al rap-

porto fra la frequenza delle diaclasi e quella dei piani di stratificazione). Valutando questi parametri è possibile calcolare la *conduttività idraulica* di un certo volume di roccia; quanto più alta è la conduttività idraulica tanto più facilmente si forma la grotta di « tavola d'acqua », cioè di superficie piezometrica dell'acqua di fondo (D. C. Ford, 1971).

Nonostante la varietà dei fattori che influenzano l'evoluzione dei reticoli carsici ipogei, è possibile distinguere, all'interno di questi, un certo numero di aspetti e forme tipici (fig. 9.17). Si tratta di:

1) Vani e pozzi « *fusiformi* »: cavità allungate in senso verticale, più ampie nel tratto intermedio e inferiore che all'estremità superiore. A proposito della formazione di queste cavità il Maucci ha formulato la teoria dell'*erosione inversa*: vi si sostiene che la forma embrionale da cui si evolve la maggior parte delle cavità carsiche è un vano verticale a forma di « fuso »; le cavità composte risulterebbero dal congiungimento di diversi vani « a fuso » (i « pozzi composti » e le « pseudogallerie » deriverebbero rispettivamente dalla fusione di cavità sovrapposte e di cavità allineate ad uno stesso livello). Ogni vano fusiforme si svilupperebbe in profondità in corrispondenza di un volume preferenziale di roccia particolarmente fratturata detta *fuso embrionale*: è qui che inizia una circolazione veloce dell'acqua in senso verticale tale da esercitare un richiamo idrico dalle fessure carsiche circostanti. La cavità che si individua in questo modo tende ad ampliarsi soprattutto verso l'alto, fino ad intersecare altri vani carsici oppure la superficie esterna.

2) *Condotte* del tipo *in pressione* (*condotte* o « *tubi* » *freatici*): si tratta di cavità di forma tubolare, spesso con andamento suborizzontale; le sezioni trasversali sono circolari o ellittiche. È opinione comune che queste cavità si formino in condizioni freatiche, cioè di circolazione in pressione; comunque esse si trovano ben conservate anche in certe grotte asciutte. Le pareti delle condotte presentano talora piccole ondulazioni date dalle « impronte di corrente » (ingl.: *scallops*): depressioni poco profonde ed asimmetriche determinate dalla turbolenza dell'acqua in prossimità delle pareti.

3) *Condotte suborizzontali con solco d'erosione sul fondo*: si tratta di forme derivate dalle precedenti in seguito ad un'erosione del fondo da parte di acqua scorrente « a pelo libero ». Il solco viene scavato quando si verifica un mutamento delle condizioni idriche da freatiche a vadose; la sezione trasversale, che in origine si presentava subcircolare, tende ad assumere un aspetto caratteristico « a buco di serratura ».

4) *Gallerie e condotte con «canali di volta»*: si formano quando il torrentello che le percorre, anziché scavare la roccia del fondo, deposita abbondante materiale che ne innalza il letto fino a provocare una incisione del soffitto della galleria. In molte grotte nei gessi dell'Appennino i fenomeni di deposizione ed erosione del soffitto hanno portato all'escavazione

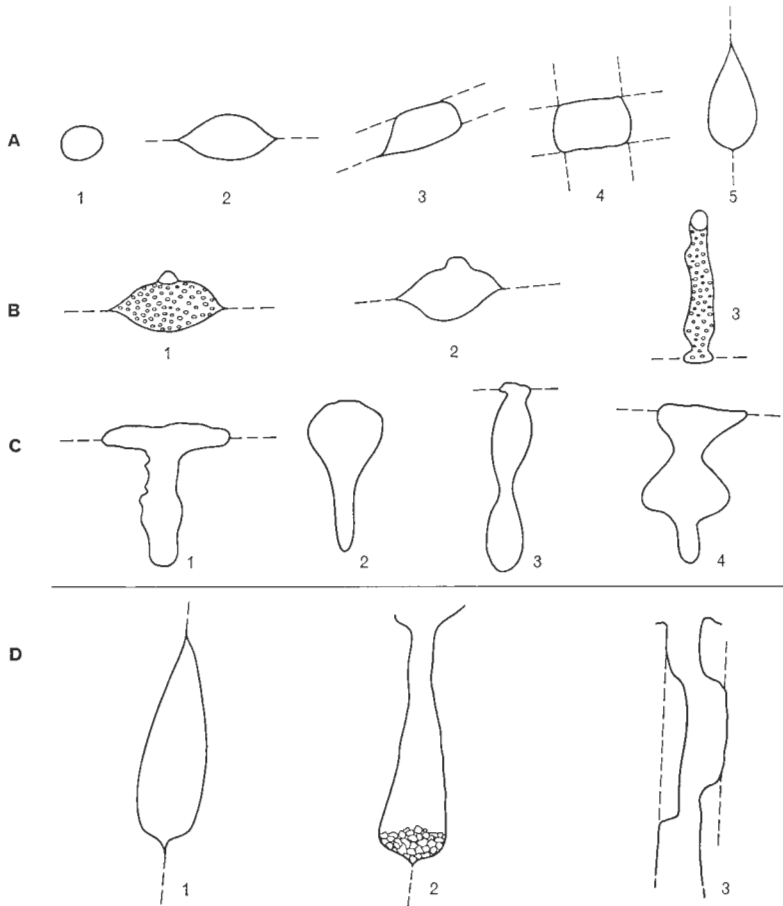


Fig. 9.17. Sezioni verticali di cavità carsiche (da varie fonti).

A, B, C. Sezioni di cavità a sviluppo orizzontale prevalente; D. Sezioni di cavità a sviluppo verticale.  
 A. Tipi di condotte freatiche: 1. circolare, 2. ellittica, sviluppata lungo un interstrato, 3. trapezoidale, 4. rettangolare, influenzata dagli interstrati e da piani subverticali di fratturazione, 5. fusoidale, lungo un piano verticale di fratturazione; B. Condotte modificate da erosione di tipo «antigravitativo»: 1. condotta riempita dai sedimenti con conseguente sviluppo di un «canale di volta», 2. condotta del tipo precedente dopo erosione dei sedimenti, 3. condotta «antigravitativa», che si è sviluppata verso l'alto in seguito a sedimentazione continua; C. Ex-condotte freatiche con inciso sul fondo un solco d'erosione vadosa: 1, 2. tipi semplici, 3, 4. tipi complessi; D. Cavità a sviluppo verticale: 1. pozzo fusoidale semplice, 2. pozzo semplice derivante da una forma di tipo 1, in seguito a fenomeni graviclastici, 3. pozzo complesso.

di *pseudo tubi freatici* con il fondo sviluppato nei materiali di deposizione e un andamento del tutto indipendente da quello dei piani di debolezza lungo i quali si erano impostate le condotte originarie (si veda la nota di G. Pasini in AA.VV., 1973).

5) *Pozzi-cascata*: forme di erosione strette alla cima e molto larghe alla base; nell'ipotesi del Dematteis (AA.VV., 1973) rappresentano l'evoluzione di tratti di condotte situati lungo piani strutturali inclinati rispetto alla verticale; i torrentelli determinano qui la formazione di pozzi ad asse verticale e di marmitte alla base di questi, per l'azione erosiva della cascata che li occupa.

Nelle grotte poco attive dal punto di vista idrico, cioè praticamente senz'acqua, si possono trovare, più o meno ben conservate, alcune delle forme descritte sopra. Spesso però queste forme non sono più riconoscibili in seguito a fenomeni di concrezionamento o di caduta di materiali rocciosi; in quest'ultimo caso le pareti ed i soffitti delle gallerie e delle sale possono mostrare superfici irregolari, date da tante nicchie di distacco di blocchi angolosi; la forma d'insieme si presenta come una volta « ad arco » che corrisponde ad un certo tipo di equilibrio meccanico.

### 9.5.3. Depositi di grotta.

Nell'evoluzione delle vecchie grotte, assumono grande importanza i fenomeni di riempimento. Questi sono distinguibili sulla base dei tre gruppi di processi speleogenetici che li determinano, già indicati nel paragrafo 9.5.2.

È possibile distinguere i depositi delle acque correnti in alloctoni (portati dall'esterno e talora da territori non carsici) e autoctoni (che hanno cioè subito un trasporto limitato all'interno del reticolo carsico sotterraneo). Chiaramente autoctoni sono i depositi di crollo e di concrezionamento. Un tipo particolare di deposito frequente nelle grotte è costituito da sostanze organiche (ossa di animali, guano di pipistrello).

Senza dubbio i depositi di grotta più noti e caratteristici sono le concrezioni calcaree che abbondano soprattutto nelle grotte delle regioni temperate e calde, mentre mancano quasi completamente nelle grotte delle regioni fredde.

Le forme concrezionali più comuni sono:

— *le stalattiti*, forme cilindriche o coniche pendenti dal soffitto, spesso sottili e talora lunghe parecchi metri;

— *le stalagmiti*, simili alle precedenti ma rivolte verso l'alto a partire dal pavimento; certe forme tozze raggiungono altezze di 30-40 m;

— *le colonne*, che derivano dalla fusione di una stalattite con una stalagmite;

— *le croste concrezionali*, che ricoprono le pareti dei vani, e si prolungano sul pavimento di questi con l'aspetto di *colate*.

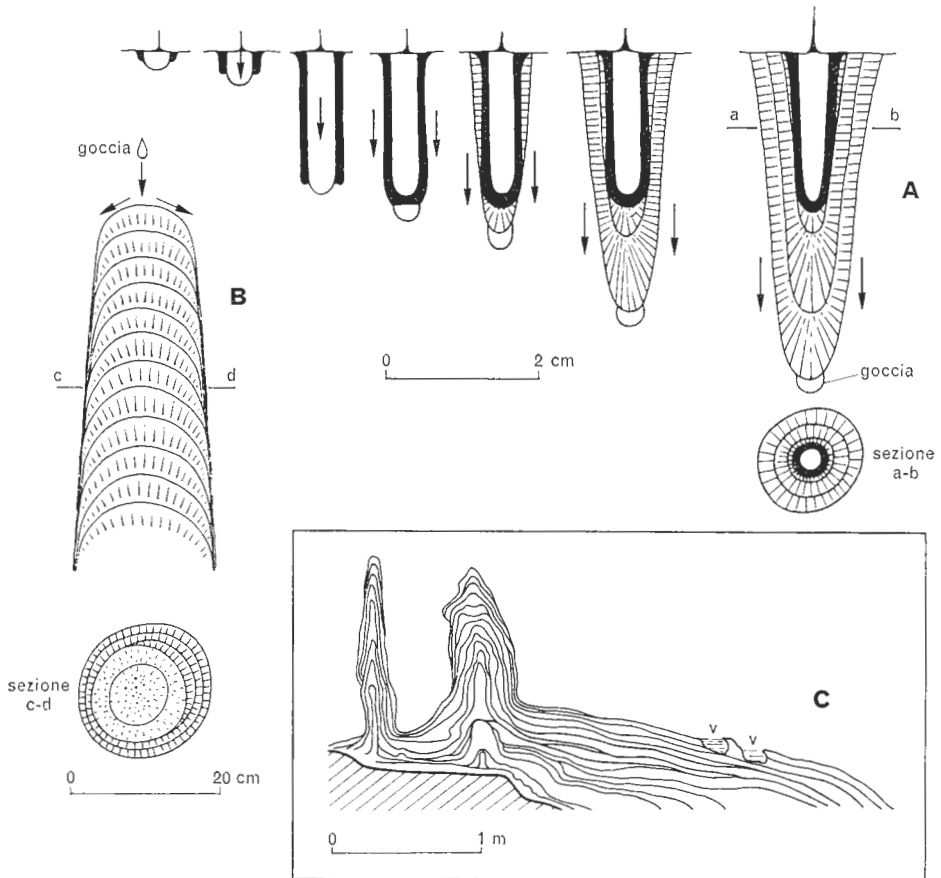


Fig. 9.18. Schemi dello sviluppo di stalattiti e stalagmiti (da J. N. JENNINGS, *Karst*, ed. The MIT Press, 1972, ridis. e modif.).

A. Stalattiti. In una prima fase la goccia si costruisce un tubicino (« spaghetti ») scorrendo all'interno di questo; dopo l'ostruzione dell'apice del tubicino un velo d'acqua scorre all'esterno depositandovi strati concentrici di calcite (le frecce mostrano le posizioni e il senso di scorrimento dell'acqua). In basso a destra è disegnata una sezione trasversale; B. Stalagmiti. Sezioni schematiche verticale e orizzontale di una stalagmite del tipo « a pila di piatti rovesciati ». Si osservi la disposizione delle « cupole », spesse al centro e via via più sottili ai margini; C. Stalagmiti a laminazioni concentriche che si prolungano di lato come colata concrezionale; v. vaschette di grotta. — Le differenti scale hanno valore solo indicativo.

Una stalattite comincia a formarsi come un sottile tubicino di calcite (*stalattite tubolare* o *spaghetto*); l'acqua che fuoriesce da una fessura della volta scorre all'interno del tubicino e cade goccia a goccia dall'estremità. Mentre si forma la goccia la soluzione risente della scarsa pressione parziale del CO<sub>2</sub> nell'atmosfera della grotta, e libera questo gas facendo precipitare CaCO<sub>3</sub>. La calcite si deposita sull'orlo del tubicino come un anellino di tanti piccoli cristalli. Col tempo l'estremità del tubicino si ostruisce e la soluzione, che fuoriesce da fessure situate in prossimità della base, deposita vari strati concentrici attorno al tubicino iniziale che in questo modo si ingrossa e si allunga; di qui la struttura « a tronco d'albero » delle stalattiti (fig. 9.18). Un tipo particolare di stalattiti sono le eccentriche o electiti: si tratta di forme ramificate, con elementi rivolti verso l'alto, risultanti da una sovrapposizione di cristalli di calcite; questi si formano all'estremità di microfessure dove la soluzione percola sotto pressione idrostatica.

Le stalagmiti, più che una struttura concentrica, tipo stalattite, ne presentano una a « cupole sovrapposte » (fig. 9.18). Poiché le cupole possono prolungarsi ai lati con delle lamine sottili, le forme risultanti sono molto varie e fantasiose: a *pila di piatti rovesciati*, a *grandi foglie*, a *cavolfiore* ecc.

Al passaggio fra il soffitto e la parete possono costituirsi a poco a poco forme laminari sottili dette *vele* o *cortine*; ciò accade quando una goccia prima di cadere scorre obliquamente e depone una nervatura di calcite.

*Concrezioni da splash* si formano invece su pareti che ricevono spruzzi o gocce di rimbalzo; gli straterelli di calcite assumono strutture mammellonari caratteristiche.

Lo scorrimento di una lama d'acqua sulle pareti e sui pavimenti può dar luogo a imponenti *colate concrezionali* sulle quali talora si individuano dei complessi di piccole dighe di sbarramento disposte a « festoni », che delimitano tante *vaschette di grotta* ripiene d'acqua limpida.

Da quanto esposto sinora si può rilevare che in genere una grotta, nel corso della sua vita, passa da una fase freatica ad una fase vadosa, e quindi ad una fase caratterizzata da fenomeni di crollo e di riempimento. Nelle prime fasi la grotta si può considerare una forma « giovanile » e *attiva*, nell'ultima, in cui non è più in corso di escavazione, essa è diventata « senile » ed *inattiva*; se si verifica un riempimento totale della cavità resta al suo posto una struttura particolare detta *grotta fossile*. Le grotte fossili, che talora si riconoscono su sezioni artificiali e naturali in rocce calcaree, sono le testimonianze di antichi episodi di carsificazione di quelle rocce (*paleocarso*) (fig. 9.19).

Questo tipo di sequenza di fasi evolutive è legato prima di tutto al fatto, già illustrato, del progredire dei processi speleogenetici dall'alto verso il basso, a cui corrisponde un abbassamento della zona freatica. Occorre però sottolineare che molti fenomeni di erosione e deposizione nelle grotte sono strettamente con-

dizionati dal clima delle regioni e che variazioni nei caratteri di questo possono influire sul tipo di evoluzione delle cavità sotterranee. Così nelle grotte delle regioni temperate fredde, la presenza di una spessa crosta stalagmitica si può considerare come testimonianza di processi avvenuti in un periodo temperato-caldo del passato: un livello di frammenti rocciosi, intercalato in depositi di altro tipo, all'imboccatura di una grotta si può correlare con un'antica fase climatica freddo-umida; lacune stratigrafiche nei depositi di grotte inattive possono essere il risultato di azioni erosive da parte di acque correnti durante periodi più umidi; il

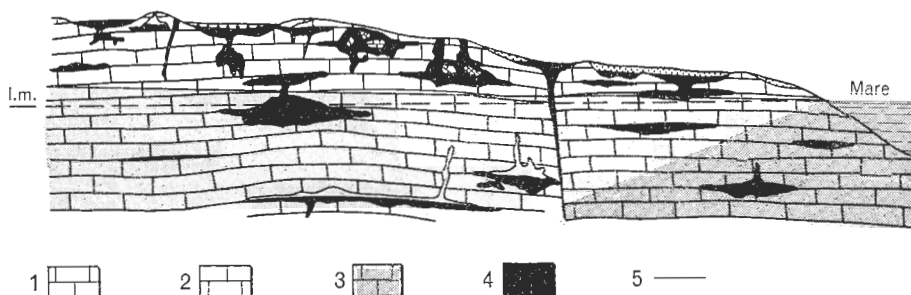


Fig. 9.19. Sezione schematica di un sistema carsico delle Murge (Puglia) (da D. GRASSI, L. ROMANAZZI e G. SPILOTRO, in « Geol. Appl. e Idrogeol. », 10, 1975).

1. Rocce carbonatiche mesozoiche; 2. Idem, interessate dalla falda carsica; 3. Idem, interessate dall'acqua di mare; 4. Riempimenti di *terra rossa*; 5. Superficie freatica (o piezometrica) della falda carsica. — Molte grotte sono vecchie cavità (paleocarsismo) ora completamente riempite da terra rossa proveniente dall'esterno (grotte fossili), altre rappresentano serbatoi d'acqua carsica freatica di ricambio lentissimo.

riempimento di cavità da parte di paleosuoli esterni mobilitati dal soliflusso presumibilmente si verifica nelle fasi freddo-umide successive a periodi caldi.

L'analisi isotopica delle concrezioni calcitiche delle grotte spesso fornisce dati sulle temperature alle quali questi sedimenti si sono depositi (rapporto fra  $0^{16}$  e  $0^{18}$ ), e sull'età assoluta, determinabile grazie al carbonio radioattivo o ad altri isotopi dell'uranio, del torio, ecc.

In questo modo forme e depositi ci permettono di ricostruire l'evoluzione degli ambienti e quindi delle situazioni ecologiche attraversate dalle varie regioni carsiche terrestri.

## 9.6. I paesaggi carsici.

Sin qui abbiamo usato il termine « paesaggio carsico » come sinonimo di « paesaggio dei calcari », ma dobbiamo tener conto che esistono vari altri tipi di rocce solubili che possono essere modellate da processi di tipo « carsico ». Però, in genere, le rocce solubili non calcaree (dolomie, gessi, quarziti) non presentano delle forme dovute alla soluzione, così grandi, abbondanti e varie come quelle che si osservano nei calcari. Anelli (in AA.VV.

1973) chiama *paracarsici* i fenomeni e le forme determinate dalla soluzione delle rocce non calcaree, *pseudocarsiche* le forme simili alle carsiche ma legate a processi completamente diversi.

Qualunque sia la roccia nella quale sono modellate, le forme carsiche arricchiscono il paesaggio conferendovi un'impronta speciale. Un paesaggio si può definire « carsico » se dall'insieme delle forme che lo compongono spiccano chiaramente quelle carsiche. Molti paesaggi sono dominati da forme che non sono soltanto carsiche ma che hanno avuto origini diverse, o legate all'azione contemporanea di più processi. Così un paesaggio si può definire *tectocarsico* quando le forme carsiche sono inserite in un rilievo del quale si distinguono molto bene le forme tettoniche (scarpate di faglia, di flessura ecc.); *fluviocarsico* sarà invece un paesaggio in cui le forme carsiche sono scavate in un rilievo eminentemente fluviale; *glaciocarsico* è il paesaggio dato da forme che rivelano sia il modellamento glaciale che quello carsico (conche di sovriscavazione glaciale approfondite dalla corrosione, Karren sui dossoni calcarei montonati, doline su morene calcaree, ecc.).

Gli *altopiani carsici* sono rilievi complessi, caratterizzati da estese superfici suborizzontali, delimitate da ripide scarpate. Numerose doline, valli secche ed altre forme carsiche contribuiscono a rendere minutamente tormentate tali superfici, nelle quali si aprono gli ingressi di cavità sotterranee a prevalente sviluppo verticale. Se la conservazione delle superfici suborizzontali si può spiegare considerando la mancanza di un'idrografia superficiale, che eserciti azioni di erosione lineare, più difficile è spiegarne la genesi. In qualche caso esiste una chiara corrispondenza fra la forma dell'altopiano e la struttura geologica (si parlerà allora di grande forma di tipo tectocarsico). Ma in altri casi la superficie dell'altopiano non è influenzata dalla struttura, troncando la stratificazione; si devono allora ammettere fenomeni di spianamento, avvenuti nel corso di una lunga e complessa storia evolutiva.

Poiché i primi studi sul carsismo riguardano la regione dinarica, il paesaggio di questa è stato assunto per lungo tempo come tipo di riferimento per tutti gli altri paesaggi carsici del mondo. Però già dopo la prima guerra mondiale, alcuni studiosi si sono accorti che le regioni calcaree situate in posizioni climatiche diverse da quelle del Carso dinarico presentavano anche forme diverse. Si è tentato quindi di correlare i climi con le forme carsiche, di stabilire cioè quali sono i rapporti fra clima, modalità del processo carsico e forme carsiche. Si sono inoltre studiati gli effetti delle oscillazioni climatiche sull'evoluzione del rilievo carsico.

Nei gessi delle montagne italiane si trovano estese aree con un rilievo paracarsico ben sviluppato. Le forme più comuni possono essere le piccole



doline ad imbuto (es. Moncenisio con aree con oltre 1000 doline per km<sup>2</sup>), le grandi conche chiuse (es. Appennino Bolognese, fig. 9.20), o vallette cieche con inghiottitoi in prossimità del contatto litologico gessi-roccie insolubili (es. Sicilia). Nei gessi si trovano grotte profonde (es.: la grotta Michele Gortani nell'Appennino Modenese ha uno sviluppo di 2015 m).

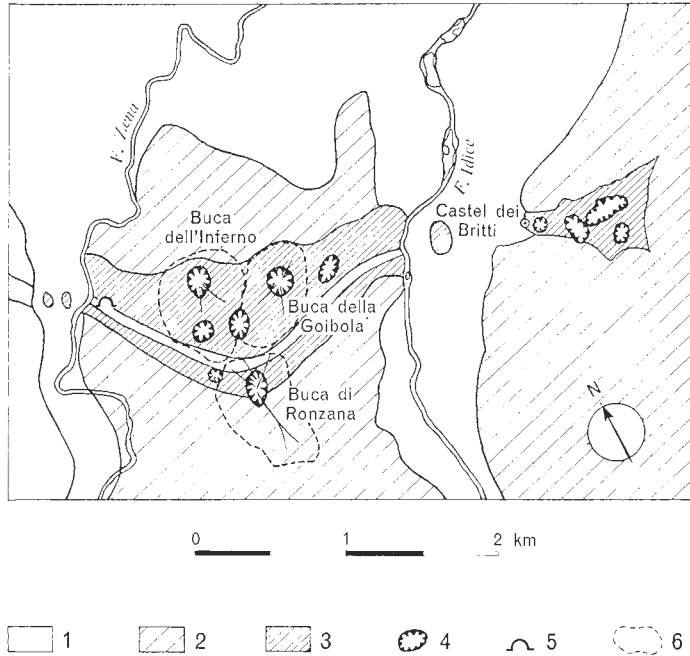


Fig. 9.20. Esempio di fenomeni carsici nei gessi dell'Appennino, presso Bologna (da S. BELLONI, B. MARTINIS e G. OROMBELLI, in HERAK e STRINGFIELD, *Karst, Important karst regions in the Northern Hemisphere*, Ed. Elsevier, Amsterdam, 1972).

1. Depositi quaternari; 2. Argille, marne e sabbie di età terziaria; 3. Gesso (Miocene); 4. Dolina; 5. Grotta importante; 6. Conca chiusa.

Che fenomeni di « soluzione » possano originare forme e paesaggi di tipo « carsico » (o paracarsico) anche in rocce poco solubili è dimostrato tra l'altro da recenti scoperte sulle arenarie quarzitiche degli altopiani venezuelani, ove si aprono alcuni grandi pozzi di crollo (il maggiore possiede diametro e profondità entrambi di circa 400 metri) e varie grotte fra cui una lunga 1350 m, contenente stalagmiti di opale alte oltre 4 m <sup>(1)</sup>. Si tratta

<sup>(1)</sup> E. SZCZERBAN, F. URBANI, *Carsos de Venezuela, Parte 4: Formas carsicas en areniscas precambricas del Territorio Federal Amazonas y Estado Bolivar*, « Bol. Soc. Venezolana Espel. » 5/1, 1974 (vedi anche Rep. in U.I.S. Bull. 1 (13), 1976).

di un « carsismo » molto vecchio che si è formato nel corso di decine e forse centinaia di milioni di anni.

### 9.7. Il clima e la morfogenesi carsica.

Gli elementi del clima che influenzano maggiormente il processo carsico sono due, e precisamente la temperatura e la piovosità (o disponibilità di acqua). Infatti dalla temperatura dipendono gli equilibri della reazione di dissoluzione, nella quale l'acqua entra come elemento indispensabile. In rapporto con le condizioni termiche e pluviometriche stanno anche gli organismi, che forniscono CO<sub>2</sub> ed altri acidi corrosivi.

Il primo studioso che si è posto il problema delle analisi delle acque carsiche in vari ambienti terrestri è stato il francese J. Corbel (1957). Oggi, in base a numerosi dati raccolti da vari ricercatori, è possibile farsi un quadro dell'importanza dei processi di « erosione » carsica nel mondo. Fra le numerose formule proposte di recente sulla velocità dell'erosione carsica in rapporto alle condizioni climatiche si cita la seguente, di M. Pulina:

$$Dm = 0,0126 \cdot \Delta T \cdot q \cdot \varepsilon$$

in cui:

$Dm$  = erosione carsica media in millimetri di spessore per 1000 anni, o in m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> per anno;

$\Delta T$  = differenza espressa in mg/litro fra la mineralizzazione media delle soluzioni acquose che abbandonano, per via superficiale o sotterranea una certa area carsica, e di quelle che entrano in tale area sotto forma di precipitazioni o di corsi d'acqua alloctoni;

$q$  = quantità media di acqua (espressa in litri) che « entra », durante un secondo, in 1 km<sup>2</sup> dell'area carsica considerata;

$\varepsilon$  = variabile legata a fattori climatici e ambientali non ben definiti, con valori per lo più intorno ad 1, ma oscillanti in qualche caso fra 0.2 e 3.

Ammettiamo, per esempio, che un altopiano carsico, della superficie di 1 km<sup>2</sup>, riceva solo acqua meteorica nella quantità di 1000 mm annui (cioè di 1 miliardo di litri per km<sup>2</sup>) e con mineralizzazione media di 2 mg/litro; e che le sorgenti ai margini dell'altopiano presentino una mineralizzazione di 72 mg/litro. Sarà:  $\Delta T = 70$ ,  $q = 32$  e se  $\varepsilon = 1$ ,  $Dm = 28$  (infatti se in un km<sup>2</sup> cadono un miliardo di litri all'anno, poiché un anno è composto da poco più di 31,5 milioni di secondi, in ogni secondo entrano in media 32 litri d'acqua).

È opportuno rilevare come queste formule esprimano dei valori di corrosione areali medi, utili per valutare l'ordine di grandezze del fenomeno; nella realtà

molti aspetti dell'erosione carsica restano ancora da chiarire e sono difficilmente quantificabili. Nelle condizioni di cui sopra, una dolina del diametro di 50 metri e della profondità di 15 e con un bacino idrografico non più grande della stessa forma, dovrebbe formarsi in non meno di 180.000 anni; una dolina di 500 metri di diametro e di 100 metri di profondità dovrebbe richiedere almeno 1.200.000 anni.

Come abbiamo già detto, certi aspetti dinamici del fenomeno dell'erosione carsica dipendono, oltre che dalle precipitazioni, dalla temperatura: infatti mentre nei climi temperato-freddi la reazione chimica di dissoluzione è lenta, ma la soluzione è concentrata e notevolmente stabile per l'alta solubilità del CO<sub>2</sub> in acqua, nei climi caldi la reazione è veloce e la soluzione instabile. Ciò determina, nei climi caldo-umidi, la tendenza alla corrosione veloce delle superfici rocciose esposte, ma anche la riprecipitazione rapida del carbonato di calcio nel regolite e nelle fessure, fatto che limita la carsogenesi profonda.

Tra le regioni climatiche più interessanti per il carsismo nomineremo:

1) le regioni temperato-fredde (carso irlandese, carso alpino, carso dei Carpazi, ecc.);

2) le regioni temperato-calde ad umidità variabile (carso dinarico, carso dell'Italia centro-meridionale, carso spagnolo, ecc.);

3) le regioni caldo-umide (gran parte delle regioni carsiche situate nella fascia intertropicale).

Nei climi temperato-freddi la corrosione superficiale è lenta, ma data la stabilità delle soluzioni il processo risulta favorevole all'allargamento delle fessure profonde e quindi alla percolazione dell'acqua all'interno dei massicci. Le cavità sotterranee sono molto poco concrezionate: per lo più si tratta di pozzi o gallerie nude ove alla corrosione si affiancano i fenomeni clastici. Le forme carsiche di superficie sono spesso modificate per l'intervento di processi non carsici come i fenomeni periglaciali e quelli glaciali. In particolare l'asimmetria di alcune doline è imputabile alla *nivazione*, e certe grandi conche chiuse che costituiscono il fondo di circhi modellati in rocce calcaree si possono considerare forme miste glaciali e carsiche (conche glaciocarsiche).

Il carso delle regioni temperate-calde ad umidità variabile non si discosta molto dal precedente, per quanto riguarda le forme superficiali. Nelle cavità sotterranee acquistano però maggior importanza i fenomeni di concrezionamento. In queste regioni si trova quindi la maggior parte delle grotte più suggestive.

Il carso delle regioni caldo-umide si presenta molto sviluppato e mostra una gamma assolutamente singolare di forme. Fra queste le più comuni sono le seguenti (fig. 9.21):

A) *Carso a cockpit* (o carso poligonale) e *colline emisferiche* (Giava, Giamaica): gruppi di colline emisferiche delimitano depressioni chiuse di

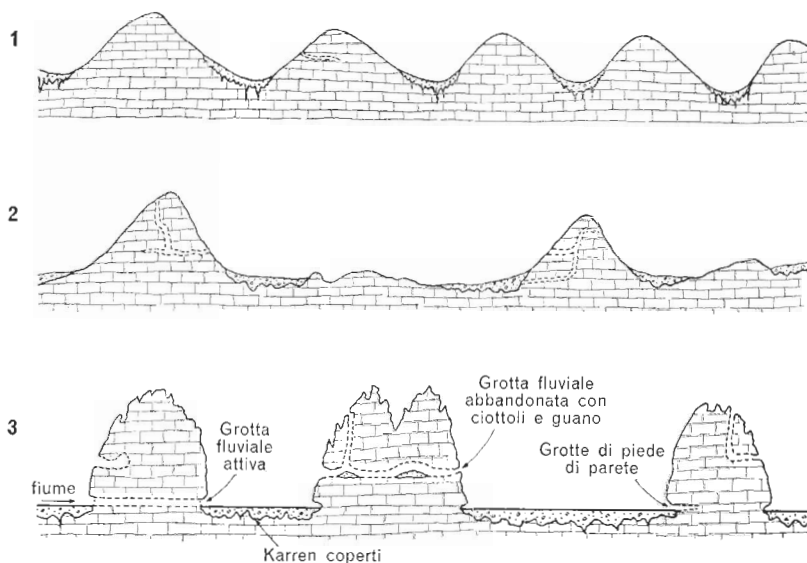


Fig. 9.21. Profili di tre tipi del rilievo carsico tropicale.

1. Carso a cupole e cockpit: fra le colline a cupola arrotondata sono comprese grandi depressioni chiuse del tipo « cockpit »; 2. Carso a coni: colline di forma conica dominano superfici subpianeggianti, con ondulazioni modeste e irregolari; 3. Carso a torri e pianure carsiche: alte torri di roccia si ergono su una pianura percorsa da fiumi che lambiscono il piede di alcune pareti e talora attraversano gallerie all'interno dei rilievi.

forma stellare o poligonale (*cockpit*). Le piccole selle che sono situate fra le colline si trovano a quote che corrispondono alla media fra la quota del fondo dei *cockpit* e quella delle sommità circostanti (v. anche fig. 9.9).

B) *Carso a coni* (Nuova Guinea, Porto Rico ecc.): le colline emisferiche sono sostituite da colline coniche (*mogote*), dai versanti più ripidi. Fra queste colline non sono comprese depressioni importanti ma una pianura o una superficie lievemente ondulata.

C) *Carso a polje aperti e a torri* (ted. *Turmkarst*) (Cina meridionale, Vietnam del Nord, Malaisia, Nuova Guinea, Cuba, ecc.): i rilievi sono delle vere e proprie torri con pareti verticali che si innalzano su una pianura alluvionale sulla quale scorrono vari corsi d'acqua. Questo tipo di paesag-

gio presenta analogie con quello dei *pediment con inselberg*, in rocce cristalline, delle regioni subtropicali e tropicali.

Nel carso tropicale umido si passa quindi da complessi di forme che ricordano il paesaggio a doline (*carso a cockpit*) ad altri complessi di forme paragonabili ai *polje* (pianura alluvionale dei *polje* e pianura del carso a torri); solo che, rispetto al carso dinarico, qui assume grande importanza paesaggistica il ruolo dei rilievi isolati e delle forme fluviali. La presenza appunto delle grandi pianure carsiche (*Karstrandebenen*) e delle vallette che

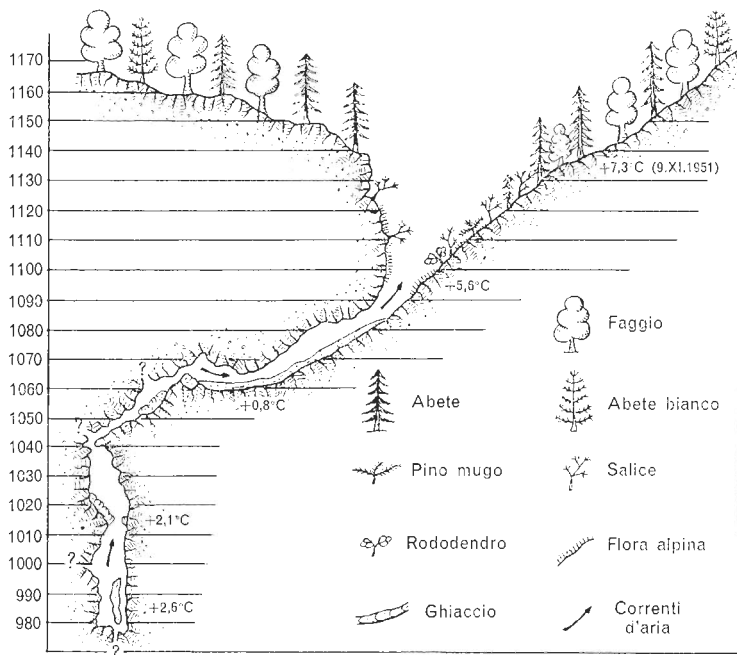


Fig. 9.22. Sezione di una dolina che comunica con una grotta (secondo HRIBAR, I. GAMS, 1974).

Nella sezione è illustrato il fenomeno dell'«inversione della vegetazione» in rapporto con i microclimi presenti all'interno della cavità.

La temperatura si abbassa dall'esterno verso l'interno fino ad un certo punto, oltre il quale può verificarsi un leggero aumento. La vegetazione più termofila è quella situata sul bordo della dolina, le piante situate sul fondo della dolina, cioè all'imboccatura della grotta, sono invece microterme (flora di tipo alpino).

La differenziazione microclimatica che si determina all'interno delle depressioni carsiche influenza gli stessi processi morfogenetici che sono alla base dell'ulteriore evoluzione della cavità.

solcano i versanti delle conche conferendo loro forma stellata (*cockpit*) sono il risultato di una combinazione di processi carsici e fluviali che si spiega considerando le grandi quantità d'acqua disponibili in questi ambienti. Il carso tropicale si può perciò considerare un tipo di «fluvio-carso» parti-

colare nel quale i due gruppi di processi fluviali e carsici, che normalmente vengono considerati incompatibili, operano contemporaneamente.

Nei paesaggi del tipo *Turmkarst* delle regioni equatoriali (caldo umide) i processi carsici sono concentrati essenzialmente in corrispondenza delle pianure alluvionali. Le grotte attive sono scavate nelle emergenze calcaree alla quota della pianura ed hanno l'andamento orizzontale di questa. Antiche grotte inattive o poco attive possono trovarsi più in alto, a vari livelli, all'interno delle torri di roccia (fig. 9.21).

Nei carsi temperati invece il fenomeno carsico ha una maggior estensione in profondità.

### 9.8. Cenni su alcune regioni carsiche.

Tratteremo ora brevemente i connotati principali dei paesaggi di alcune delle regioni carsiche più vicine a noi.

*Carso di Trieste* (in senso stretto): altopiano costiero dalla superficie dolcemente ondulata, butterata da innumerevoli doline che gli conferiscono un aspetto lunare; per chilometro quadrato si contano circa 20-50 doline con diametri intorno ai 50-100 metri (alcune però superano i 500 metri); le forme tettoniche e fluviali (inattive) sono modeste e si rilevano solo attraverso un'attenta analisi.

*Carso sloveno*: il rilievo è più energico; vi si riconoscono polje attivi delimitati da dorsali montagnose, altopiani e qualche valle e pianura fluviale; gli altopiani e la sommità delle dorsali sono costellati di doline ed uvala. Nell'insieme questo paesaggio rivela alcune forme tettoniche e fluviali rispetto alle quali però prevalgono nettamente gli elementi carsici anche di grandi dimensioni.

*Prealpi Venete*: nell'ambito di un rilievo energico dato da altopiani e dorsali si distinguono poche forme carsiche di grandi dimensioni date da conche (conca del Cansiglio), canyon e valli secche; aree a doline (Cansiglio, zona sommitale dell'altopiano di Asiago, Baldo meridionale), o doline isolate e situate in posizioni morfologico-strutturali ben definite (M. Lessini), elementi glaciocarsici nelle zone sommitali (« circhi » del Baldo e del Cavallo, Karren su rocce montonate ecc.), paesaggi del tipo città di roccia, modellati anche dai processi crioclastici (M. Lessini). Per la chiarezza degli elementi tettonico-strutturali e della loro influenza sul carsismo si può definire il paesaggio prealpino un « tectocarso ».

*Appennini centrali e meridionali*: in un rilievo energico sono inserite numerose forme carsiche anche di grandi dimensioni, fra cui polje per lo più inattivi, aree a doline, valli secche, ecc.

I polje, che sono allungati secondo le direzioni tettoniche appenniniche, risultano spesso raggruppati alla periferia di massicci carsici (es.: del Gran Sasso,

della Maiella). All'interno dei massicci si trovano canyon asciutti e valli cieche. Nelle aree carsiche a doline dell'Appennino Laziale sono molto frequenti le cavità di crollo.

Nella Gola di Frasassi (Fabriano, Marche) da alcuni anni è in corso di esplorazione uno dei più complessi e interessanti sistemi carsici sotterranei d'Europa.

*Puglie*: vi si distinguono numerosi tipi di paesaggi carsici fra cui spiccano quelli dell'altopiano del Gargano, simili per qualche aspetto ai paesaggi prealpini; quelli delle Murge con forme morbide date da ampie doline; quelli del Salento con numerose grotte e sorgenti costiere e altre forme carsiche modeste, impostate su una « gradinata » di terrazzi marini.

Degni di nota, fra i paesaggi carsici italiani, sono anche alcuni della Sicilia e della Sardegna sui quali però non ci soffermeremo. Fra le grotte italiane attrezzate per il turismo speleologico le più belle sono quelle del Fiume Vento (Fabriano, Appennino Marchigiano) e di Castellana (Murge pugliesi, vicino a Bari).

### Indicazioni bibliografiche.

- ANELLI F., *Nomenclatura italiana dei fenomeni carsici*. « Le Grotte d'Italia », s. 3, v. 2, 1956, pp. 5-36.
- AUTORI VARI, *Atti del Seminario di Speleogenesi della S.S.I.* « Le Grotte d'Italia », s. 4, v. 4, 1973, pp. 418.
- BAUER E. W., *Mondo senza sole*. Ed. Rizzoli Int. Lib., Milano, 1971, pp. 128.
- BELLONI S., MARTINIS B. e OROMBELLI G., *Karst of Italy*. In HERAK e STRINGFIELD (v. sotto), Ed. Elsevier, Amsterdam, 1972, pp. 85-128.
- BIROT P., *Le relief calcaire*. Ed. C.D.U., Paris, 1966, pp. 238.
- BÖGLI A., *Kalklösung und Karrenbildung*. « Zeitschr. für Geom. », Supplementband 2, 1960, a cura di H. LEHMANN, pp. 4-21.
- BÖGLI A., *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Ed. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978, pp. 300.
- CORBEL J., *Les Karst du Nord-Ouest de l'Europe e de quelques régions de comparaison; étude sur le rôle du climat dans l'érosion calcaire*. Inst. Etud. Rhodaniennes, Univ. Lyon, « Mem. Doc. », 12, Lyon, 1957, pp. 531.
- CVIJIĆ J., *La géographie des terrains calcaires*. Monogr. Acad. Serbe Sc. Art., t. 341, Cl. Sci. Mat. et Nat. n. 26, Belgrado, 1960 (opera postuma).
- FÉNÉLON P. (a cura di), *Phénomènes karstiques*. Centre Rech. Doc. Cart. Géogr. C.N.R.S., « Mem. et Doc. » 4 e 15 (vol. I e II), Paris, 1968-1974.
- FORD D. C., *Geologic structure and a new explanation of limestone cavern genesis*. « Trans. Cave Research Group of Great Britain », 13, 1971, pp. 81-94.
- FORD T. D. e CULLINGFORD C. H. D., *The Science of Speleology*. Ed. Academic Press, London, 1976, pp. 593.

- GAMS I., *Kras*. Ed. Izdala-Slov. mat., Ljubljana, 1974, pp. 360.
- GAMS I. (a cura di), *Karst processes and relevant landforms*. U.I.S., Comm. on karst Denudation, Ljubljana, 1975, pp. 211.
- GAMS I. (a cura di), *Slovene Karst Terminology*. Norodov, Knjiga 1, Ljubljana, 1973, pp. 78.
- GÈZE B., *Les conditions hydrogéologiques des roches calcaires*. « Chronique d'Hydro-géol. », 7, 1965, pp. 9-39.
- HERAK M. e STRINGFIELD V. T. (a cura di), *Karst. Important karst regions in the Northern Hemisphere*. Ed. Elsevier, Amsterdam, 1972, pp. 551.
- JAKUCS LÁZLO, *Morphogenetics of Karst Regions. Variants of Karst Evolution*. Ed. Adam Hilger, Bristol, 1977, pp. 384.
- JENNINGS J. N., *Karst*. Ed. The M.I.T. Press, London, 1971, pp. 253.
- MARINELLI O., *Fenomeni carsici nelle regioni gessose d'Italia*. « Mem. Geogr. », Suppl. « Riv. Geogr. Ital. », 11, n. 34, 1917, pp. 363-411.
- MAUCCI W., *L'ipotesi dell'erosione inversa come contributo allo studio della speleogenesi*. « Boll. Soc. Adr. Sc. Nat. », 46, 1952, pp. 60.
- NANGERONI G., *Il Carsismo e le Grotte*. In « *L'Italia Fisica* », Touring Club Italiano, Milano, 1957, pp. 284-303.
- NANGERONI G., *Il carsismo e l'idrografia carsica in Italia*. « Atti 17° Congr. Geogr. It. », Bari, 1957, 2, pp. 83-111.
- NICOD J., *Pays et paysages du calcaire*. Ed. Presses Univ. de France, Paris, 1972, pp. 244.
- PERNA G. e SAURO U., *Atlante delle microforme di dissoluzione carsica superficiale del Trentino e del Veneto*. « Mem. Museo Trident. Sc. Nat. », 22, n. serie, Trento, 1978, pp. 176.
- PULINA M., *Danudacja chemiczna na obszarach Krasu weglanowego*. Polska Akad. Nauk, Inst. Geogr., « Pr. geogr. » 105, Wroclaw, 1974, pp. 159.
- RENAULT P., *La formation des cavernes*. Ed. Presses Univ. de France, Paris, 1970, pp. 128.
- SEGRE A. G., *I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio*. « Pubbl. Ist. Geogr. Univ. Roma », s. A, n. 7, 1948, pp. 248.
- SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA, *Manuale di Speleologia*. Ed. Longanesi, Milano, 1978, pp. 582.
- SWEETING M. M., *Karst landforms*. Ed. Macmillan, London, 1972, pp. 362.
- SWEETING M. M. e PFEFFER K. H. (a cura di), *Karst processes*. « Zeitschr. für Geom. », Supplementband 26, 1976, pp. 209.
- TROMBE F., *Traité de Spéléologie*. Ed. Payot, Paris, 1952.

Il Centro Studi per la Geografia Fisica del C.N.R. presso l'Istituto di Geografia dell'Università di Bologna aveva curato, fra il 1948 e il 1955, la pubblicazione di una serie di « Memorie sulla morfologia e idrografia carsica in Italia ».



Tra le numerose riviste speleologiche ci limitiamo a citare:

*Le Grotte d'Italia* (Redaz. Via Zamboni 67, 40127 Bologna).

*Atti e Memorie della Commissione Grotte E. Boegan*. Soc. Alpina Giulie (Trieste).

*Annales de Spéléologie*. C.N.R.S., Moulis, Ariège (Francia).

*International Journal of Speleology*. Si pubblicava ad Amsterdam; dal 1978 viene ripresa la pubblicazione a Milano come rivista ufficiale dell'UIS.

Fra le organizzazioni speleologiche ricordiamo la « Società Speleologica Italiana » (Segreteria Dr. Sergio Macciò, Via Gramsci 11, 60035 Jesi) che pubblica un notiziario bimestrale.

L'« Unione Speleologica Internazionale » (UIS), riconosciuta dall'UNESCO, rappresenta oltre 30 società speleologiche nazionali. Essa promuove, ogni quattro anni, l'organizzazione di un « Congresso Speleologico Internazionale ».