

FABIO BRUNAMONTE*, ALBERTO PRESTININZI**, CARLO ROMAGNOLI***

*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti c/o E.N.E.A. - D.I.S.P., via V. Brancati - Roma

**Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi "La Sapienza", Roma

***Via di Donna Olimpia, 166 - Roma

GEOMORFOLOGIA E CARATTERI GEOTECNICI DEI DEPOSITI DI TERRE ROSSE NELLE AREE CARSICHE DEGLI AURUNCI ORIENTALI (LAZIO MERIDIONALE, ITALIA)

Le aree carsiche italiane, poste generalmente nelle zone montuose, pongono numerosi problemi in fase di pianificazione territoriale per l'oggettiva difficoltà di suddividere l'ammasso carbonatico in aree con differente grado di carsificazione, variamente interconnesse con la rete di condotti e cavità ipogee. Negli studi di vulnerabilità queste aree definiscono settori con differente esposizione della falda carsica e possono fornire un valido contributo all'esame idrogeologico delle strutture calcaree.

I risultati degli studi, svolti sulla dorsale carbonatica di Monte Maio (Aurunci Orientali - Lazio Meridionale), mostrano come il rilevamento geomorfologico si integri con l'analisi geotecnica delle terre rosse e consenta l'adozione di una classificazione dei depositi integrata a quella delle forme carsiche ed espressa in termini di stabilità dell'accumulo nei confronti dei processi di asporto laterale e/o verticale. La metodologia adottata prevede l'individuazione delle aree a differente dinamica carsica attraverso il rilevamento geomorfologico e l'analisi morfometrica delle forme carsiche, nonché la verifica delle distinzioni operate mediante l'analisi delle proprietà geotecniche dei depositi di terre rosse, indicatori del grado di connessione con il reticolo ipogeo. Il settore preso in esame è costituito da una sequenza carbonatica relativa al dominio di sedimentazione della piattaforma "Laziale - Abruzzese", smembrata in blocchi ad assetto monoclinale che si ripetono da WSW verso ENE con una sostanziale congruenza delle giaciture e delle immersioni.

Il rilevamento geomorfologico e l'analisi morfometrica evidenziano in questa zona un carsismo polifasico con doline ampie centinaia di metri, un'ampia varietà di campi solcati ed un reticolo ipogeo ben sviluppato, ad assetto subverticale. Tali forme sono riconducibili ad un processo carsico relativo alla carsificazione areale (corrosione dorsale) oppure all'approfondimento ed alla connessione con il reticolo carsico ipogeo (corrosione frontale). Infatti la distribuzione areale, lo sviluppo ed il grado di conservazione delle forme di dissoluzione di corrosione dorsale, sia grandi che di dettaglio, sono condizionate dalla posizione topografica, dai caratteri giacitureali e dall'esistenza di alcuni lineamenti guida nel rilievo, che condizionano lo scorrimento delle acque superficiali. Viceversa, nell'ambito della corrosione frontale, il grado di fratturazione dell'ammasso calcareo e le connessioni dirette con il reticolo di condotti e cavità ipogee esercitano un controllo locale sull'infiltrazione e determinano l'esistenza di campi solcati con andamento non conforme al versante e l'approfondimento delle doline, spesso disposte in posizioni topografiche poco adatte allo sviluppo di una libera azione dissolutiva.

I depositi di terre rosse sono distribuiti nelle aree di recapito dell'asporto idrico superficiale, quali i fondovalle e le depressioni carsiche; in particolare le doline rivestono il ruolo di "trappole morfologiche" in cui si realizzano le migliori condizioni per la formazione del deposito. Nelle aree a corrosione dorsale l'instaurarsi, all'interfaccia deposito - substrato calcareo, dei processi di "corrosione statica" determina l'apertura del setto divisorio delle doline, se sufficientemente sottile, e la rimobilizzazione delle terre rosse ad opera delle acque dilavanti. Nelle aree a corrosione frontale l'esistenza di un "substrato calcareo assorbente" causa la tendenza all'approfondimento sino a realizzare una connessione idraulica con il reticolo ipogeo. In tali zone la presenza, alla base degli accumuli, di zone fratturate, cavità o condotti carsici, comporta l'asporto dei livelli inferiori del terreno e lo sviluppo di forme di collasso superficiale (*sinkhole*), le cui dimensioni sono correlabili allo spessore del deposito ed alla tipologia delle aperture esistenti nel substrato calcareo.

Le differenze osservate nelle proprietà indici di 80 campioni prelevati in differenti posizioni (accumulo, dolina, frattura, cavità ipogea) e tipologia di substrati (calcarei carsificati in varie situazioni di connessione con il reticolo carsico ipogeo, calcari non carsificati, bauxiti, substrati non calcarei) nell'ambito della struttura carbonatica, verificate con metodi statistici, consentono di suddividere i depositi in base al grado di connessione con il reticolo carsico ipogeo in:

- 1 - depositi non in comunicazione con il reticolo di fessure e cavità ipogee
- 2 - depositi in comunicazione con il reticolo di fessure e cavità ipogee
- 3 - depositi in fratture e cavità ipogee.

Le caratteristiche di densità, compressibilità e le proprietà connesse al ritiro variano in relazione al grado di isolamento del deposito dai nuovi apporti di materiale, nonché al grado di addensamento causato dai fenomeni di essiccamento. Tali parametri consentono di suddividere ulteriormente i depositi in:

- A - depositi isolati dallo scorrimento idrico superficiale;
- B - depositi alimentati sede di nuovi apporti di materiale durante la stagione piovosa;
- C - depositi alimentatori di altri accumuli posti alle quote minori;
- D - depositi sede di apporto-asporto di materiale.

I caratteri di plasticità, l'attività e la composizione mineralogica delle terre rosse, pur correlandosi con l'entità della carsificazione del substrato ed il grado di isolamento del deposito da nuovi apporti, risultano ulteriormente influenzati dagli apporti di materiale vulcanico dai centri esplosivi laziali e campani che, a luoghi, si intercalano nei depositi od occupano il fondo delle depressioni.

PAROLE CHIAVE: *Carsismo, inghiottitoi in terra, terre rosse.*

KEY WORDS: *Karstic phenomena, sinkhole, red soils.*

Introduzione

La pianificazione territoriale nelle aree carsiche, che ospitano gran parte delle risorse idropotabili disponibili in Italia, deve necessariamente prevenire e ridurre i rischi di inquinamento legati agli insediamenti ed alle attività antropiche, individuando i settori più direttamente connessi alla circolazione idrica sotterranea. Esiste in tal senso un'oggettiva difficoltà nel suddividere l'ammasso carbonatico in settori caratterizzati da un diverso grado di carsificazione, per i quali siano definibili i livelli di connessione con la rete di condotti e cavità ipogee. La delimitazione di queste aree, che possiedono differenti valori di esposizione della falda idrica alle fonti di inquinamento (Prestininzi & Romagnoli, 1991; Prestininzi & Romagnoli, 1992), fornisce un valido contributo agli studi di vulnerabilità ed all'analisi idrogeologica delle strutture carbonatiche. In tale contesto viene presentato uno studio fondato sull'integrazione dei risultati del rilevamento geomorfologico con i dati dell'analisi geotecnica, condotto sui depositi di terre rosse associati a morfologie carsiche. Infatti, i processi che presiedono all'infiltrazione delle acque meteoriche nel substrato determinano un'evoluzione nel profilo fisico del deposito il cui sviluppo risulta correlabile al grado di carsificazione del substrato.

L'area studiata è costituita dal rilievo di Monte Maio (Monti Aurunci - Lazio meridionale), caratterizzato dall'affioramento di diverse litologie carbonatiche e da un'ampia casistica di situazioni morfologiche che determinano, in un'area relativamente ristretta, la presenza di diverse dinamiche carsiche e la variabilità dei rapporti tra substrato e depositi di terre rosse. Nella zona, inoltre, l'esistenza di numerose cave consente l'analisi dei contatti tra la base dei depositi ed il substrato, l'osservazione diretta del grado di carsificazione nonché il prelievo di campioni sia in sequenze verticali all'interno del deposito che nel reticolo di fratture e cavità ipogee.

Inquadramento geologico

Il rilievo di Monte Maio costituisce una dorsale carbonatica, estesa per circa 86 km², disposta in direzione NW - SE, tra le piane di Formia e Cassino (F. 160 "Cassino", II SW e II SE, F. 171 "Gaeta", I NW e I NE). La successione carbonatica, relativa al dominio di sedimentazione della Piattaforma Laziale - Abruzzese (Accordi *et alii*, 1986), è caratterizzata dalla prevalenza, nei settori meridionali della struttura, dei termini calcarei e calcareo-dolomitici del Giurassico Superiore - Cretacico Inferiore, mentre, nelle parti restanti del rilievo, affiorano i calcari del Cretacico Superiore - Paleocene. Presso il margine occidentale della dorsale si estendono i calcari organogeni del Miocene Medio-Superiore. I depositi quaternari, con

i maggiori spessori disposti all'interno delle depressioni carsiche, sono composti da terre rosse e, subordinatamente, da detrito di falda e da piroclastiti risedimentate relative all'attività esplosiva degli apparati vulcanici campani. L'assetto strutturale dell'area è relativo ad una serie di blocchi monoclinali immergenti a SW che si ripetono, con analoghe giaciture, da WSW verso ENE. I lineamenti tettonici più significativi sono costituiti da sistemi di faglie dirette e trascorrenti che delimitano la struttura ad Est e la dislocano longitudinalmente ad Ovest, sovrapprendendosi agli elementi compressivi.

Il processo carsico

L'attività carsica ha originato forme epigee ed ipogee ad elevato grado di evoluzione in tutta l'area, con un'ampia casistica di forme nei campi solcati, doline di grandi dimensioni e cavità in prevalenza a sviluppo subverticale. La concentrazione e lo sviluppo di tali forme assume tuttavia aspetti diversi in relazione alla giacitura, alle condizioni strutturali dei calcari, alla posizione nel rilievo ed al reticolo di drenaggio superficiale ed ipogeo. Per questo motivo lo studio del carsismo è stato sviluppato attraverso la misura diretta e l'elaborazione statistica di una serie di parametri morfometrici, inerenti lo sviluppo dimensionale e direzionale dei campi solcati e delle doline (Gortani, 1908; Cvijic, 1918; Cramer, 1941; Segre, 1948; Anelli, 1959; Maucci, 1960; Williams, 1972; Lupia Palmieri & Zuppi, 1977; Kyralli, 1968; 1970), da porre a confronto con gli assetti giaciture e strutturali.

Le forme rilevate sono quelle epigee rappresentate da campi solcati e forme di dettaglio, doline e uvala, bacini carsici sia aperti che chiusi, adottando la terminologia e le classificazioni rese standard da vari autori (Anelli, 1959; Fenelon, 1972; Cvijic, 1918; Lupia Palmieri & Zuppi, 1977). Unica eccezione riguarda la suddivisione delle doline in base all'eccentricità, in cui viene introdotta la classe delle doline subcircolari (eccentricità compresa tra 0,75 ed 1) che consente una migliore rappresentazione statistica delle doline ellissoidali. Queste ultime, infatti, rappresenterebbero una classe di ampiezza doppia (eccentricità compresa tra 0,5 ed 1) rispetto alle altre classi (doline allungate eccentricità < 0,25; doline ellittiche, eccentricità compresa tra 0,25 e 0,5). I valori degli assi, nelle doline di grandi dimensioni, sono stati ottenuti mediante l'uso della tavoletta digitalizzatrice su ingrandimenti 1:10.000 della cartografia I.G.M. alla scala 1:25.000, a seguito del rilevamento geomorfologico di campagna e della fotointerpretazione. Per la misura della profondità delle doline è stata utilizzata una coppia di altimetri Paulings, in grado di apprezzare dislivelli di 1 metro.

Tali forme sono state successivamente classificate e raggruppate nell'ambito della dinamica carsica se-

condo i regimi di corrosione dorsale o frontale ad essi corrispondenti (Aubert, 1967; 1969; Castany, 1967; Fenelon, 1972; Forti, 1972; 1973; 1975). I risultati del rilevamento geomorfologico pongono in evidenza un accentuato sviluppo verticale del reticolo ipogeo ed una espansione areale delle forme epigee sino a dimensioni delle centinaia di metri. Tale sviluppo è relativo ad un carsismo polifasico plio-quadernario, caratterizzato dal ringiovanimento di forme evolute e da fenomeni di riattivazione con creazione di nuove doline (Monte Barruzza, Case Palombari, Monte Maio, Coreno Ausonio e Cardito, Monte Calvo, ecc.). Nell'area sono inoltre presenti i depositi bauxitici relativi al paleociclo cretaco-paleocenico (Coreno Ausonio, Colle Arnale e Monte Barruzza).

L'assetto complessivo della rete carsica appare congruente a quello delle altre catene peritirreniche, in cui il livello carsico più depresso risulta disposto al di sotto dell'attuale livello del mare (Boni *et alii*, 1980; Agostini, 1980; 1983), conseguentemente alle oscillazioni eustatiche quaternarie legate alle variazioni climatiche ed ai movimenti neotettonici lungo la costa tirrenica.

Le forme carsiche di dettaglio

Il modellamento carsico di dettaglio, nonostante presenti una casistica di forme molto varia, consente di individuare all'interno della struttura tre differenti tipologie di carsismo:

1 - carsismo con azione prevalente di corrosione dorsale (Aubert, 1969), caratterizzato da *Rillenkarren* o microscolchi (Boegli, 1960; Bauer, 1962; Lupia Palmieri & Zuppi, 1977), *Rinnenkarren* (Fenelon, 1972; Perna & Sauro, 1978), vaschette di dissoluzione e *Maanderkarren* (Fenelon, 1972; Perna & Sauro, 1978). Occupa le sommità pianeggianti e gran parte dei versanti esposti all'azione di dilavamento da parte di veli d'acqua che, sul versante a reggipoggio, origina microscolchi rettilinei (*Rillenkarren*) e sviluppa, sul versante a franapoggio, i *Rinnenkarren*, solchi doccia-formi a sezione emisferica e semiellittica rettilinei o meandriformi (*Maanderkarren*). Le forme di solubilità statica (Castany, 1967), diffuse ovunque e connesse al ristagno di acqua su superfici di roccia affiorante, sono rappresentate soprattutto da vaschette di dissoluzione (*Kamenitze*) (Boegli, 1960; Belloni & Orombelli, 1970; Forti, 1972; Perna, 1974; Perna & Sauro, 1978), talvolta di dimensioni decimetriche;

2 - carsismo con azione prevalente di corrosione frontale (Aubert, 1969), con tendenza all'approfondimento delle forme, caratterizzata da *Flachkarren* (Fenelon, 1972; Perna & Sauro, 1978), solchi dalle creste aguzze con larghezza variabile dai 2 ai 10 cm sviluppati in profondità (10 cm - 30 cm) e lunghezza e *Rundkarren*, analoghi ma con le creste arrotondate e più comuni (Lupia Palmieri & Zuppi, 1977; Perna & Sauro,

1978), docce verticali e di ampie dimensioni, fori di dissoluzione, generalmente verticali, talvolta orizzontali nei "calcarei miocenici a losanghe", *Kluftkarren* (Fenelon, 1972; Perna & Sauro, 1978) (Fig. 1) sia a diaclase, in cui il solco si assottiglia gradualmente con la profondità, sia più raramente a trincea (*Schichfugenkarren*), dove il solco è interrotto in corrispondenza della superficie di strato sottostante;

3 - carsismo coperto (Boegli, 1951; 1960; Bauer, 1962) distribuito nei luoghi di accumulo delle terre rosse, con forme carsiche relitte incise nei calcari emergenti dalla copertura di terre rosse.

I campi di *karren* con i solchi frammentari dalla sezione arrotondata talvolta decimetrica e dalla scarsa individualità, con setti divisorii poco pronunciati, colmati di terre rosse, costituiscono termini di transizione tra le forme della corrosione dorsale ed il carsismo coperto.

Le direzioni preferenziali di sviluppo (Fig. 2) dei campi solcati sono congruenti con il reticolo diaclastico associato ai sistemi distensivi (N10, N45W) ed in parte a quelli trascorrenti (N70W, N30W e N15E), mentre sono praticamente assenti lungo le direzioni del sistema inverso (N45E).

Le doline

La distribuzione areale di queste forme epigee non è uniforme ma, analogamente allo sviluppo dimensionale ed al grado di conservazione, è condizionata dall'esistenza di alcuni lineamenti guida nell'assetto morfologico del rilievo e dall'intensità della fratturazione nell'ammasso roccioso. Il raddoppio delle linee di cresta, le variazioni nell'orientazione ed esposizione dei versanti, le rotture di pendio e la presenza di ripiani carsici, unitamente al reticolo diaclastico, condizionano l'intensità dell'infiltrazione determinando un controllo locale sul regime di dissoluzione. Nei diagrammi di Fig. 3 e 4 sono riportati i valori di eccentricità e forma delle doline (Lupia Palmieri & Zuppi, 1977). Analogamente a quanto operato con i *karren*, si possono distinguere (Aubert, 1969; Forti, 1972; 1975; Forti *et alii*, 1975):

— doline in cui prevalgono i processi di corrosione dorsale, con evoluzione tendenzialmente areale della forma carsica;

— doline in cui prevalgono i processi di corrosione frontale, condizionate dal reticolo diaclastico, in cui lo sviluppo della depressione si manifesta prevalentemente nel senso dell'approfondimento;

— doline colmate da depositi di terre rosse (carsismo coperto), con svolgimento dei processi di dissoluzione all'interfaccia deposito - substrato, prevalentemente associate in forme coalescenti, dai contorni mal definiti.

Le doline di corrosione dorsale sono distribuite nelle situazioni morfologiche ove si realizzano le con-



FIG. 1 — Località Vatelloni: campo solcato con *karren* a trincea (*Schichfugenkarren*) impostato nei calcari del Cretacico superiore.

— Vatelloni area: *Schichfugenkarren* in the limestones of the Upper Cretaceous.

dizioni per il ristagno dell'acqua meteorica ed in particolare: sulle linee di cresta e presso le rotture di pendio. Le doline di cresta si dispongono sul franapoggio poco inclinato presso la sommità del rilievo (Colle Le

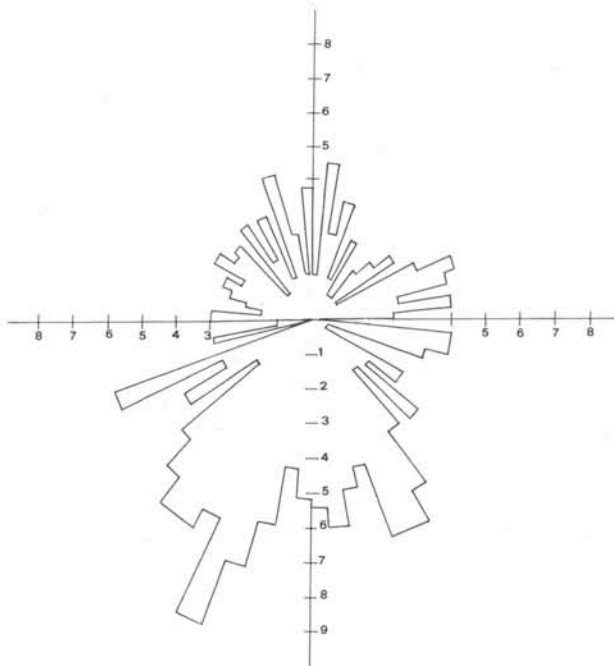


FIG. 2 — Confronto tra orientazioni di *karren* ed i sistemi di faglie. Il diagramma riporta nell'emisfero superiore le orientazioni di *karren* e, in quello inferiore, le direzioni di faglia. I dati sono espressi in percentuale rispetto al totale delle misure.

— Azimuthal distribution of *karren* and fault systems. The diagram shows, in the upper hemisphere, directions of *karren*, while fault directions are reported in the lower hemisphere. Data are expressed in percentage respect to total measures.

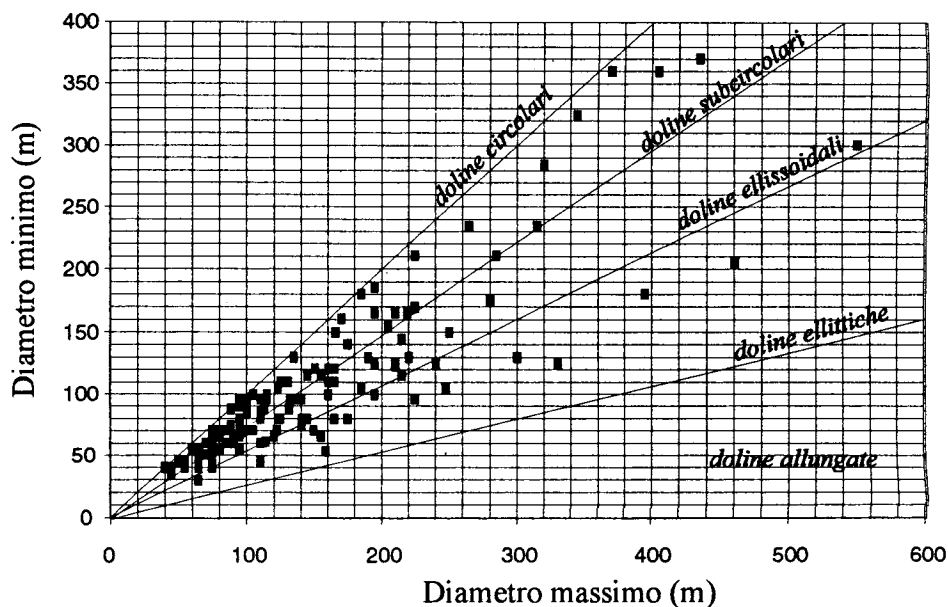
Forche, Colle Vallicelle, Monte Feuci, Monte Faito) e sono generalmente ascrivibili al gruppo delle mesodoline con una ricorrenza delle forme a piatto. Il loro diametro maggiore risulta costantemente disposto nel senso di scorrimento dell'acqua, spesso coincidente con l'immersione degli strati. In queste doline i versanti trasversali alla giacitura degli strati sono simmetrici e più sviluppati in altezza di quelli disposti in direzione del pendio. Le doline poste in prossimità delle rotture di pendio risultano scarsamente condizionate dalla giacitura della stratificazione e possiedono versanti ben sviluppati ed asimmetrici disposti concordeamente all'immersione del pendio. Per queste doline il valore dell'eccentricità è molto variabile, compreso tra 0,9 e 0,5, in dipendenza dell'esistenza o meno di uno sbocco del drenaggio.

Le doline di corrosione frontale si dispongono sia in gruppi, tra spartiacque ravvicinati (Chianare, Campi di Crisano, Monti di Suio), sia in forme isolate, spesso poste in posizioni topografiche inusuali a causa dell'eccessiva acclività del versante (doline di C.le Aurito, Monte Pietragna, La Forcella, Monte Maio, Pozzo della Polviana, ecc.). A differenza del gruppo precedente sono composte per la maggior parte da macrodoline, dal marcato sviluppo dimensionale (valore medio del diametro maggiore pari a 230 m) con forme generalmente a scodella.

Dal punto di vista dell'accrescimento areale del bordo vi è una marcata ricorrenza dei contorni subcircolari e circolari che evidentemente risultano le forme più in equilibrio di altre rispetto ad una azione dissolutiva rivolta soprattutto in senso verticale. Viceversa le forme ellissoidali possiedono generalmente zone di assorbimento preferenziale disposte eccentricamente rispetto al fondo della dolina. Le forme ellittiche, si-

FIG. 3 — Classificazione delle doline sulla base del parametro eccentricità (rapporto tra diametro minimo e diametro massimo).

— Classification of dolines based on eccentricity index (minimum and maximum diameter ratio).



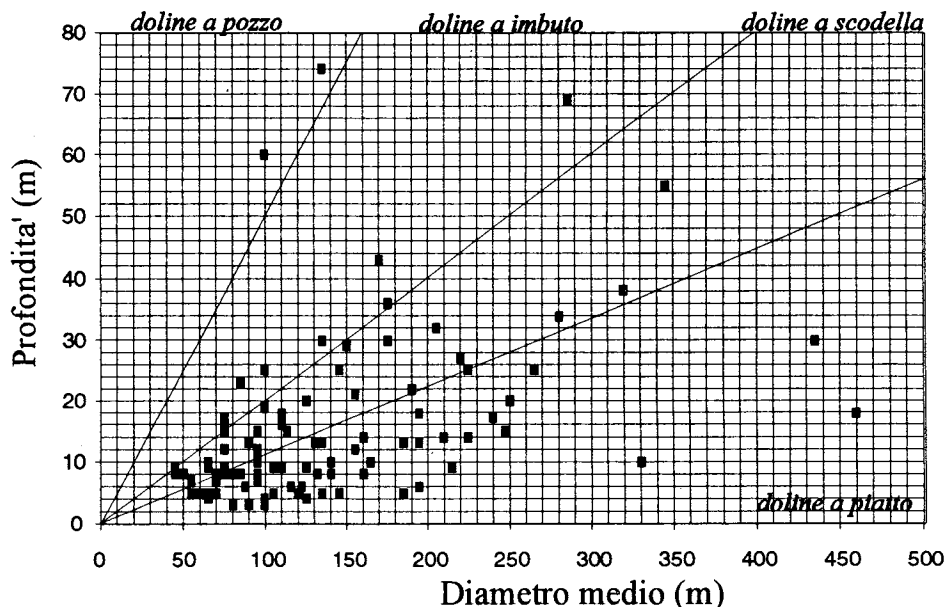
tuate frequentemente tra creste ravvicinate, risultano impostate su rocce cataclate (doline di Costa Carosa e di Chianare) che costituiscono un "substrato assorbente" facilmente corrodibile. Altra caratteristica essenziale delle doline di corrosione frontale è costituita dall'ottima rispondenza riscontrata tra l'assetto del reticolo diaclasico e le orientazioni degli assi delle doline. Questa relazione viene evidenziata nel diagramma di Fig. 5, nel quale sono posti a confronto le direzioni degli assi delle doline, espresse in percentuale di frequenza cumulata sulla lunghezza totale dei diametri maggiore e minore, con le direzioni del reticolo di discontinuità, espresse in frequenza percentuale sul totale delle misure. In queste doline le direzioni di

massimo sviluppo coincidono con l'orientazione dei sistemi distensivi ad andamento meridiano ed appenninico e con quelli trascorrenti N15E e N70E.

Le doline relative al carsismo coperto si caratterizzano per la limitata individualità del contorno e la coalescenza delle forme, spesso colmate di terre rosse. L'azione dissolutiva, che avviene in prevalenza all'interfaccia deposito - substrato in mancanza di un drenaggio preferenziale, privilegia lo sviluppo di perimetri circolari. Tuttavia i tratti morfometrici più ricorrenti sono quelli relativi ad una poligonaltà dei contorni (Williams, 1972) conseguente la coalescenza delle forme, con rari rilievi calcarei relitti o, più frequentemente, con la totale assenza di interpluvi. Sono fre-

FIG. 4 — Classificazione delle doline sulla base del parametro forma (rapporto tra diametro medio e profondità).

— Classification of dolines based on form index (medius diameter and depth ratio).



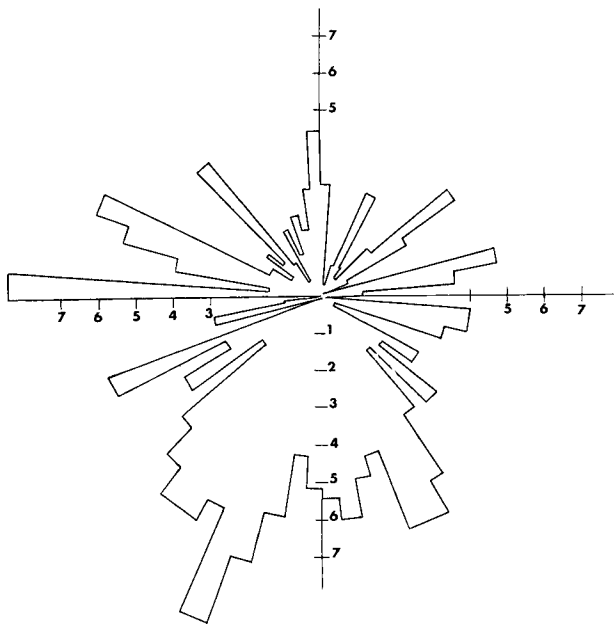


FIG. 5 — Confronto tra le direzioni degli assi delle doline ed i sistemi di faglie e fratture. Il diagramma pone a confronto la direzione dei diametri delle doline (a), espresse come percentuale di lunghezza cumulata, con quelle dei sistemi di faglie e fratture (b). La scarsa rispondenza tra gli assi delle doline ed i sistemi di discontinuità, per alcune direzioni, indica la presenza di forme connesse alla corrosione dorsale, il cui sviluppo è generalmente poco influenzato dal reticolo di faglie e fratture.

— Azimuthal direction diagram between axis of dolines and tectonic dislocations. The diagram shows the relation between diameter directions of dolines (a), expressed as percentage of cumulated length, and tectonic systems. The low grade of correlation between discontinuity systems and axial direction of dolines highlights the superficial karstic corrosion.

quenti uvala e “associazioni a grappolo” derivanti dall’unione di doline circolari (Valle Zintonia), o depressioni dallo sviluppo marcatamente allungato se la fusione avviene tra doline allineate (Castelnuovo Parano e Vallemaio). Le forme più ricorrenti sono quelle a piatto e subordinatamente quelle a scodella.

Le forme carsiche ipogee

Le informazioni raccolte sulle cavità ipogee (Segre, 1948) mostrano l’esistenza di due tipi di cavità: le grotte a sviluppo orizzontale e quelle verticali. Le grotte suborizzontali, diffuse nel calcare miocenico presso Coreno Ausonio, dopo un tratto iniziale ad assetto verticale, si stabilizzano presso il giunto di strato dove si sviluppano con lunghezze dai 15 ai 70 m ed altezze della volta mediamente di 2 - 3 m. Le grotte a pozzo (Pimpinelli, Torricelli, Casali e Suio), a forma di imbuto rovesciato, hanno sviluppo prevalentemente verticale con una ristretta apertura presso la superficie; le profondità note sono comprese tra i 90 ed i 130 m.

Zonazione del fenomeno carsico

Le informazioni ed i dati raccolti consentono di schematizzare il fenomeno carsico suddividendo la dorsale calcarea in:

- zone con prevalente sviluppo dei processi di corrosione dorsale, con tendenza all’espansione areale delle forme e drenaggio prevalentemente superficiale. Sono ridotti i legami con le forme carsiche ipogee;
- zone con prevalente sviluppo dei processi di corrosione frontale con tendenza all’approfondimento delle forme carsiche e drenaggio orientato in senso verticale. Frequenti i legami diretti (inghiottitoi, substrati filtranti, grotte subaffioranti, ecc.) con il reticolo carsico ipogeo.

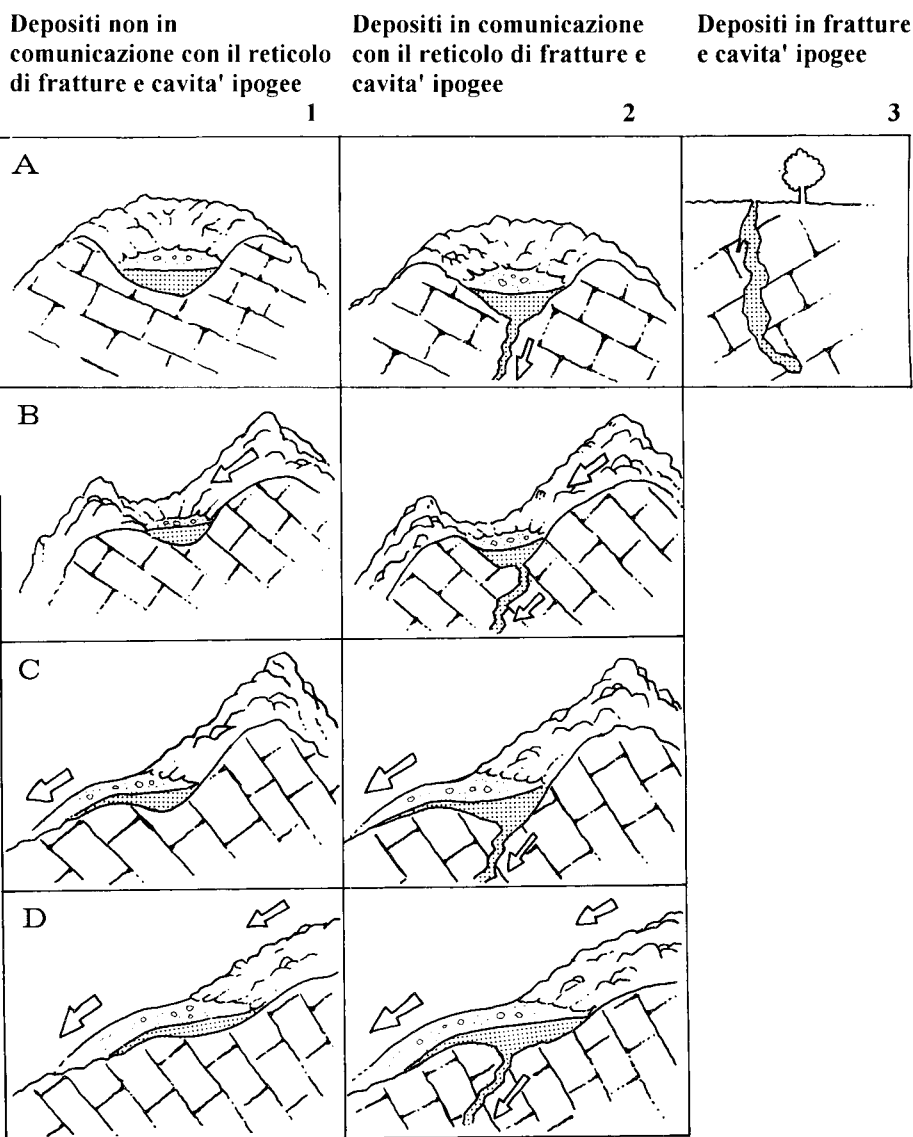
La ripartizione di tali zone all’interno della struttura non risulta casuale. Le zone a corrosione dorsale prevalgono nelle aree di cresta subpianeggiante e presso i pendii meno acclivi, in particolare nel settore centro-settentrionale. Le aree a corrosione frontale risultano più diffuse nella zona centro meridionale e, in particolare, presso alcune significative situazioni strutturali.

Depositi di terre rosse

Le terre rosse, presenti nei depositi rilevati, sono terreni a granulometria limo-argillosa, fortemente decalcificati, ricchi in ossidi ed idrossidi di ferro ed alluminio, residuo della dissoluzione dei carbonati, di colore variabile dal rosso cupo al rosso mattone ed all’ocra, a cui sono frammiste particelle estranee relative ad apporti eolici ed elementi di origine vulcanica (piccole pomice, cristalli, frammenti di vetro, ecc.) prodotti dai centri esplosivi dell’Italia Centrale e, in particolare, dall’apparato del Roccamonfina e dall’area flegrea. Questi terreni risultano particolarmente esposti ai processi erosivi per la scarsa protezione dei depositi dalle acque di scorrimento superficiale. Nell’ambito della struttura calcarea i depositi si distribuiscono nelle aree di recapito dell’apporto idrico, quali i fondovalle e le depressioni carsiche; in particolare le doline costituiscono le trappole morfologiche in cui si realizzano le condizioni migliori per l’origine e la conservazione dell’accumulo. In questo contesto le opere di terrazzamento agricolo, realizzate in passato, costituiscono un fattore importante nella stabilizzazione degli accumuli naturali e nella formazione di depositi lungo il versante. La permanenza delle terre rosse all’interno di una depressione carsica determina l’instaurarsi dei processi di dissoluzione all’interfaccia deposito - substrato calcareo (Boegli, 1951; 1960; Bauer, 1962). Nelle aree a corrosione dorsale, questa azione dissolutiva apre una via di drenaggio nel setto divisorio della dolina, quando sufficientemente sottile da essere corrosivo. Conseguentemente il deposito viene esposto ai processi erosivi connessi allo scorrimento

FIG. 6 — Tipologie di deposito in relazione alle interconnessioni con il reticolo carsico ipogeo (1, 2 e 3) ed ai rapporti con le acque di scorrimento superficiale (A, B, C e D). Tipi di deposito distinti in relazione al grado di carsificazione del substrato. 1: depositi non in comunicazione con il reticolo di fratture e cavità ipogee; 2: depositi in comunicazione con il reticolo di fratture e cavità ipogee; 3: depositi in fratture e cavità ipogee. Tipi di deposito distinti in base ai rapporti con le acque di scorrimento idrico superficiale. A: Depositi isolati dal reticolo di scorrimento idrico superficiale; B: depositi "alimentati" con prevalente apporto di terre rosse; C: depositi "alimentatori" con prevalente asporto di terre rosse; D: depositi "alimentati e alimentatori": con apporto/asporto di terre rosse.

— Type of deposit in relation to karstic connection between superficial areas and hypogeous network (1, 2 and 3) and to runoff waters (A, B, C and D). Type of deposit related to substrate carsification degree. 1: deposit not connected with hypogeous network; 2: deposit connected with hypogeous network; 3: deposit in karstic. Type of deposit related to runoff water. A: Red soils not connected with runoff water; B: red soils feeded by runoff water flowing into the doline; C: red soils feeding deposits by runoff water flowing out of the doline; D: red soils both feeded by runoff water flowing into and feeding deposits by runoff water flowing out of the doline.



superficiale. Nelle aree a corrosione frontale si tende, invece, a realizzare una connessione idraulica con il reticolo carsico ipogeo. In questo caso il deposito subisce un'azione di dilavamento della frazione più fine verso la profondità ed un'evoluzione nel profilo fisico.

In questo contesto la stabilità del "sistema terre rosse - substrato", inteso quale sede di processi fisici e chimici che determinano strutture, tessiture e comportamento geotecnico delle terre rosse, dipende non soltanto dal grado di protezione del deposito rispetto all'azione delle acque di ruscellamento superficiale, ma anche dal grado di isolamento rispetto all'asporto verso il reticolo carsico ipogeo. Le osservazioni di campagna, successivamente confermate dalle analisi di laboratorio, hanno consentito di individuare 3 tipologie di deposito, riferite al grado di carsificazione raggiunto dal substrato (Fig. 6):

1 - depositi non in comunicazione con la rete di fessure e cavità ipogee, caratterizzati da un profilo del terreno omogeneo ed uniforme;

2 - depositi in comunicazione con la rete carsica ipogea, distinguibili per la comparsa e sviluppo degli orizzonti dilavati dalle frazioni granulometriche più fini;

3 - depositi in fratture e cavità ipogee, costituiti dalle frazioni dilavate dalla superficie ed accumulate all'interno del reticolo ipogeo, con presenza di concrezioni calcitiche ed alabastrine interne al deposito.

Tali tipologie di deposito possono riscontrarsi in differenti contesti di dinamica carsica e rappresentare il prodotto dello stesso stadio evolutivo, oppure riferirsi a diversi stadi evolutivi nell'ambito dello stesso regime di dissoluzione. Infatti mentre i depositi 2 e 3 si riscontrano nelle aree a corrosione frontale, il deposito di tipo 1 costituisce il medesimo stadio evolutivo

osservabile in regime di corrosione dorsale oppure essere relativo ad una fase meno sviluppata della dissoluzione frontale.

Queste tipologie di deposito si possono diversificare ulteriormente in relazione al grado di isolamento dall'azione delle acque di scorrimento superficiale in (Fig. 6):

A - depositi isolati da fenomeni di asporto laterale e privi di apporti significativi;

B - depositi alimentati con processi di deposizione attivi durante i cicli piovosi;

C - depositi alimentatori di altri accumuli situati alle quote minori;

D - depositi alimentati e alimentatori con caratteristiche di entrambi i tipi B e C.

La formazione dell'accumulo da parte delle acque di ruscellamento superficiale è generalmente caratterizzata dalla presenza di ciottoli calcarei di piccole dimensioni variamente elaborati. Questi ciottoli sono diffusi in tutto il deposito se la velocità di deposizione è superiore all'azione dissolutiva esercitata nel deposito o, viceversa, sono concentrati nelle porzioni sommitali o sono del tutto assenti. In tal caso si osservano microcavità rivestite da panneggiamenti calcitici ("impronte fantasma"). Questi depositi, analogamente ai precedenti, possono idealmente costituire differenti stadi evolutivi. Infatti l'azione dissolutiva esercitata alla base del deposito, in assenza di un elevato grado di carsificazione e fratturazione ipogea, apre una via di drenaggio nel setto divisorio della dolina, quando sufficientemente sottile da essere corroso. In tal caso il deposito, in origine del tipo B, viene in genere rimobilizzato dalle acque di scorrimento superficiale e va ad accrescere altri accumuli (tipo C). Esistono inoltre depositi, che frequentemente costituiscono accumuli naturali di versante ma si dispongono anche presso doline aperte, che sono sede di apporti e di asporti da parte delle acque dilavanti il pendio (tipo D). Il tipo A costituisce una situazione di stabilità in cui la depressione carsica è isolata dagli apporti dello scorrimento idrico (ad esempio doline di cresta chiuse) oppure è una forma chiusa non alimentata dai versanti.

Le caratteristiche geotecniche dei depositi

La varietà di situazioni esistenti in termini di stabilità del deposito nei confronti dell'asporto idrico sia superficiale che rivolto verso il reticolo ipogeo determina una accentuata variabilità delle caratteristiche geotecniche delle terre rosse, in particolare sotto il profilo granulometrico e delle densità. I risultati delle analisi di laboratorio sulle proprietà fisiche e le caratteristiche di compressibilità di 80 campioni di terre rosse possono complessivamente schematizzarsi nel modo seguente:

— il limite liquido varia in modo continuo da 50% a 102%, secondo una distribuzione di tipo gaussiano

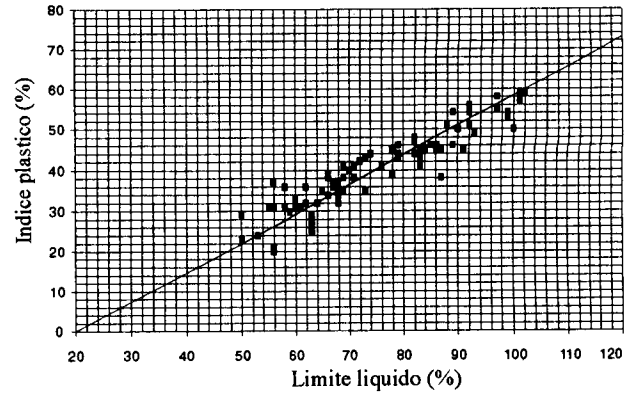


FIG. 7 — Abaco di plasticità relativo al totale dei campioni di terre rosse prelevati.

— Plasticity chart of the total samples of red soils.

con coda posta verso i valori più elevati (valore medio di 74,6% e dev. st. 13,9%);

— il campo plastico è racchiuso tra il 20% ed il 59% con media a 40,2 % e dev. st. di 9,22%; la regressione lineare costruita sull'abaco di plasticità (Fig. 7) presenta un'equazione:

$I_p = 0,612 * (LL - 8,936)$ la cui retta è meno inclinata della linea A [$I_p = 0,73 * (LL - 20)$];

— il limite di ritiro varia da 10% a 22% senza una precisa rispondenza con le proprietà plastiche del materiale. Su 28 dati il valore medio è di 14,9% con dev. st. 3,25%;

— l'attività colloidale, compresa tra 0,37 e 1,17, ben si correla con la mineralogia dei depositi che denotano la presenza di argilla appartenente al gruppo delle illiti nel 25 % dei casi;

— il contenuto d'acqua naturale misurato in situ nei periodi aprile-maggio e ottobre-novembre fornisce un intervallo di variabilità compreso tra il 23% ed il 46% , con raggiungimento della saturazione per valori superiori al 30%;

— l'indice dei vuoti varia da 0,55 a 1,25 con valore medio a 0,857 e risulta congruente con l'ampio spettro di densità misurate in situ;

— la densità naturale varia da 1,71 gr/cm³ a 2,06 gr/cm³ con media 1,88 gr/cm³ mentre la densità secca da 1,37 gr/cm³ a 1,52 gr/cm³ con media a 1,41 gr/cm³;

— l'indice di compressibilità su rimaneggiato (C_c') è compreso tra 0,324 e 0,537 ed aumenta in relazione all'abbondanza della frazione < 2 μ secondo la relazione: $C_c' = 0,016 * (\% < 2 - 30,38)$.

Queste variazioni, talvolta osservate su campioni prelevati a breve distanza, sono state correlate alle tipologie di deposito in precedenza distinte. In particolare le proprietà indici quali LL, IP, le frazioni granulometriche (Fig. 8), e l'indice di compressibilità C_c' su rimaneggiato sono caratteristici del grado di dilavamento verso il reticolo ipogeo e ben si correlano alle

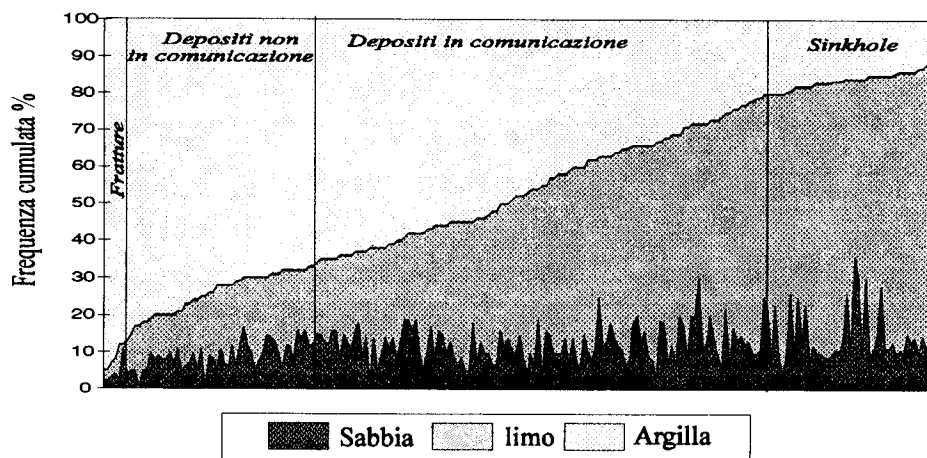


FIG. 8 — Variazione della composizione granulometrica in relazione alla tipologia di deposito.

— Cumulated frequency distribution of grain sizes related to type of deposit.

tipologie di deposito 1, 2 e 3. Viceversa, le densità in situ e secche, gli indici dei vuoti, il contenuto d'acqua, il limite di ritiro, l'ampiezza del campo solido e le caratteristiche di compressibilità su indisturbato dipendono dal grado di isolamento del deposito e dall'addensamento conseguente i fenomeni di essiccamento (Tab. 1, 2, 3 e 4).

I caratteri di plasticità, l'attività colloidale e la composizione mineralogica pur correlandosi con la tipologia di deposito, risultano condizionati dagli apporti vulcanici dell'adiacente apparato di Roccamonfina e dei Campi Flegrei. Infatti l'esame al microscopio della frazione < 63 μ evidenzia contenuti variabili, crescenti da Nord verso Sud, di cristalli estranei al residuo insolubile dei calcari, quali fenocristalli di feldspati, pirosseni, miche nere, metallici, quarzo e vetro vulcanico. Nell'area meridionale è stata ricono-

sciuta, tramite diffratogrammi, anche la presenza di zeoliti nella frazione sabbiosa e limosa. Solo nei campioni prelevati in frattura si registra la scarsità e talvolta l'assenza di cristalli di genesi vulcanica unitamente all'abbondanza di calcite e noduli bauxitici. I diffratogrammi eseguiti sulle singole frazioni granulometriche mostrano una prevalenza dei cristalli vulcanici sugli ossidi e idrossidi di ferro ed alluminio nelle classi sabbioso-limose nel settore meridionale dell'area investigata.

Nel settore settentrionale, la presenza di diaspro, goethite e brucite risulta superiore a quello osservato nella zona meridionale pur restando inferiore ai minerali vulcanici. I risultati delle analisi diffrattometriche sulla frazione < 2 μ mostrano l'esistenza di minerali argillosi a strati misti del tipo caolinite-illite la cui composizione mineralogica varia arealmente nell'am-

TAB. 1 — Parametri fisici dei terreni distinti in base alle tipologie di deposito riferite al grado di carsificazione del substrato. 1: Depositi non in comunicazione con il reticolo di fratture e cavità ipogee; 2: depositi in comunicazione con il reticolo di fratture e cavità ipogee; 3: depositi in fratture e cavità ipogee.

— Physical parameters of red soils. Type of deposit related to substrate carsification degree. 1: Deposit not connected with hypogeous network; 2: deposit connected with hypogeous network; 3: deposit in karstic conduit.

deposito	LL	LP	IP	LR	Ritiro	Ac	Sabbia	Limo	< 2μ	<10μ
tipo 1	%	%	%	%	%	---	%	%	%	%
N.camp.	30	30	30	8	8	30	30	30	30	30
media	86.10	38.63	47.13	15.25	21.25	0.71	8.63	15.50	66.33	82.83
dev.stand	4.16	5.16	3.56	4.68	0.09	3.61	4.18	7.24	4.59	7.16
val.max	100	50	58	21	27	0.91	17	23	7	91
val.min	72	30	38	11	14	0.5	2	9	50	71
coeff.var.	51.29	17.30	26.65	12.69	21.94	0.01	13.03	17.45	52.36	21.07
tipo 2										
N.camp.	42	42	42	15	10	42	42	42	42	42
media	63.98	30.14	33.83	14.87	15.0	0.67	13.24	23.24	54.12	72.24
dev.stand	6.09	4	5.59	2.99	4.09	0.16	3.39	6.82	10.8	6.55
val.max	74	38	44	21	24	1.17	19	44	77	87
val.min	50	19	20	10	9	0.37	5	12	30	52
coeff.var.	37.12	15.98	31.23	8.92	16.76	0.03	11.51	46.47	116.5	42.90
tipo 3										
N.camp.	6	6	6	4	4	6	6	6	6	6
media	96.67	43.33	53.33	15.25	28.75	0.61	3.33	6	86	93.67
dev.stand	4.71	1.6	5.34	3.63	5.02	0.05	1.11	3.74	5.51	3.64
val.max	102	46	59	21	35	0.67	5	13	92	97
val.min	91	41	45	11	21	0.53	2	3	77	87
coeff.var.	22.22	2.56	28.56	13.19	25.19	0.003	1.22	14	30.33	13.22

A- depositi isolati	γ_{dry}	γ_{nat}	ICS	n
	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%
N.campioni	10	10	3	10
media	1.459	1.905	23.67	44.50
dev.stand.	0.084	0.057	3.4	2.98
val.max	1.642	2.02	27	50
val.min	1.326	1.82	19	38
coeff.var.	0.007	0.003	11.57	8.85

B- depositi alimentati	γ_{dry}	γ_{nat}	ICS	n
	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%
N.campioni	13	13	6	13
media	1.337	1.825	16	48.77
dev.stand.	0.074	0.041	4.5	3.70
val.max	1.45	1.90	24	54
val.min	1.239	1.76	9	42
coeff.var.	0.005	0.002	20	13.72

C- depositi alimentatori	γ_{dry}	γ_{nat}	ICS	n
	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%
N.campioni	15	15	2	15
media	1.537	1.939	20.5	43.33
dev.stand.	0.07	0.043	5.5	3.82
val.max	1.659	2.04	26	54
val.min	1.439	1.90	15	38
coeff.var.	0.005	0.002	30.25	14.62

D- depositi tipo B+C	γ_{dry}	γ_{nat}	ICS	n
	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%
N.campioni	13	13	3	13
media	1.396	1.867	17	47.08
dev.stand.	0.05	0.03	4.08	2.17
val.max	1.454	1.91	22	51
val.min	1.309	1.82	12	44
coeff.var.	0.002	0.001	16.67	4.69

TAB. 2 — Parametri fisici riferiti alle tipologie di deposito distinti in base al grado di comunicazione con il reticolo di scorrimento idrico superficiale. A: Depositi isolati dal reticolo di scorrimento idrico superficiale; B: depositi "alimentati" con prevalente apporto di terre rosse; C: depositi "alimentatori" con prevalente apporto di terre rosse; D: depositi "alimentati e alimentatori": con apporto/apporto di terre rosse.

— Physical parameters of red soils. Type of deposit related to connection with runoff waters. A: Red soils not connected with runoff water; B: red soils fed by runoff water flowing into the doline; C: red soils feeding deposits by runoff water flowing out of the doline; D: red soils both fed by runoff water flowing into and feeding deposits by runoff water flowing out of the doline.

bito della struttura calcarea: gli strati di tipo caolinite prevalgono su quelli di tipo illite nelle porzioni meridionali, mentre in quelle settentrionali e alle quote più elevate del settore centrale divengono predominanti gli strati di tipo illite. A tali variazioni nella composizione mineralogica si associa la tendenza all'aumento dell'indice di plasticità rilevata nei depositi procedendo da SW verso NE.

I sinkhole

I valori del coefficiente di permeabilità delle terre rosse, desunti da prove di laboratorio, conducono generalmente a ritenere l'intero deposito come una barriera naturale a bassa conducibilità idraulica stesa a copertura del substrato calcareo. Tuttavia le forme di collasso e lo svuotamento di volubri e laghetti evidenziano l'azione dei processi di filtrazione e l'esistenza di fenomeni di instabilità nel sistema terre rosse (mezzo poroso) - substrato calcareo (mezzo fessurato-fratturato). I differenti gradi di stabilità di questo sistema sono fondamentalmente connessi allo sviluppo ed alle caratteristiche del fenomeno carsico (corrosione dorsale e frontale) e sono espressi dal grado di isolamento del deposito con la rete di fessure e cavità ipogee (depositi di tipo 1, 2 e 3). Sulla base di tali considerazioni nell'area in esame risulta possibile correlare il comportamento fisico-meccanico e l'evoluzione dei depositi di terre rosse ai tipi di contatti osservati alla base dei depositi:

— presenza di substrato non assorbente (*calcari* non carsificati o substrato non calcareo - marne, piroclastiti, lenti bauxitiche cementate) con depositi di tipo 1;

— presenza di substrato assorbente (*calcare* carsificato) con depositi di tipo 2 in superficie e 3 in profondità.

Nel primo caso il sistema presenta buone condizioni di stabilità ed elevata tenuta idraulica consentendo l'invaso delle acque se vi sono adeguate condizioni di isolamento dall'asporto laterale. In queste situazioni all'interno delle doline non è infrequente osservare la presenza di bacini di raccolta addossati al versante e canalette per agevolare lo scolo delle acque verso la roccia fratturata e carsificata (Colle Santa Lucia).

Quando invece il substrato è carsificato il deposito presenta un'evoluzione con asporto delle frazioni fini verso il sistema di fratture e diaclasi beanti in profondità (Fig. 9) che preclude alla formazione di un *sinkhole* o "voragine in terra". L'osservazione diretta mostra che l'origine di un *sinkhole* può essere a) rapida e realizzata in un unico evento oppure b) lenta con progressivo cedimento. Nel caso a) il substrato calcareo è interessato da inghiottitoi isolati dalla superficie tramite i riempimenti di terra rossa ed il deposito presenta un'accentuata differenziazione in una zona a granulometria sabbioso-limoso impoverita della frazione argillosa ed in un livello basale argilloso, che colma l'imbocco del condotto ipogeo. La frazione argillosa costituisce inoltre il riempimento delle fratture e ammette una lenta filtrazione connessa al richiamo delle acque dal deposito poroso soprastante, come dimostrano le concrezioni alabastrine e calcitiche rinvenute.

Il riempimento argilloso può essere rimosso per varie cause quali l'azione della filtrazione con erosione regressiva dal basso verso l'alto, uno shock sismi-

TAB. 3 — Significatività delle differenze fra le medie e le varianze relative alle tipologie di deposito riferite al grado di connessione con il reticolo carsico ipogeo (1: depositi non in comunicazione; 2: depositi in comunicazione; 3: depositi in fratture e cavità ipogee) considerate a due a due. Per le medie in ogni riquadro sono indicati la somma del numero di campioni relativi a ciascuna popolazione, il valore del t-Student ed il livello di significatività (* modesto; ** medio; *** alto). Per le varianze viene indicato il rapporto fra il numero di campioni meno uno, il valore di F-Fisher ed il livello di significatività.

— Significance of differences between medius and variance for type of deposit referred to interconnection with hypogeous network.

Limite liquido				Frazione < 2 μ			
media				media			
	1	2	3		1	2	3
1		n=30+42 t=20.402 ***	n=30+6 t=11.629 ****	1		n=30+42 t=7.120 ***	n=30+6 t=11.629 ****
2	n=29/41 F=1.909 ***		n=42+6 t=36.321 ***	2	n=41/29 F=4.954 ***		n=42+6 t=20.139 ***
3	n=5/29 F=2.327 ***	n=5/41 F=2.790 ***		3	n=5/29 F=2.979 ***	n=5/41 F=14.719 ***	
varianza				varianza			

Indice plastico				Frazione < 10 μ			
media				media			
	1	2	3		1	2	3
1		n=30+42 t=10.901 ***	n=30+6 t=5.909 ****	1		n=30+42 t=11.504 ***	n=30+6 t=17.225 ****
2	n=30/40 F=1.171 ***		n=42+6 t=16.146 ***	2	n=41/29 F=4.143 ***		n=42+6 t=24.995 ***
3	n=6/30 F=1.196 ***	n=6/30 F=1.148 ***		3	n=5/29 F=2.539 ***	n=5/41 F=10.525 ***	
varianza				varianza			

Densità secca γ_{dry}				
media				
	A	B	C	D
A		n=10+13 t=1.285 ***	n=10+15 t=0.869 ***	n=10+13 t=0.775 ***
B	n=9/12 F=1.637 ***		n=13+15 t=2.328 ***	n=13+13 t=0.764 ***
C	n=9/14 F=2.014 ***	n=12/14 F=1.231 ***		n=12+14 t=1.994 ***
D	n=9/12 F=8.198 ***	n=12/14 F=5.008 ***	n=14/12 F=4.015 ***	
varianza				

Densità naturale γ_{nat}				
media				
	A	B	C	D
A		n=10+13 t=1.580 ***	n=10+15 t=1.045 ***	n=10+13 t=0.820 ***
B	n=9/12 F=3.747 ***		n=13+15 t=3.109 ***	n=13+13 t=1.139 ***
C	n=9/14 F=2.954 ***	n=12/14 F=1.269 ***		n=12+14 t=1.994 ***
D	n=9/12 F=13.179 ***	n=12/14 F=3.519 ***	n=14/12 F=4.462 ***	
varianza				

porosità n				
media				
	A	B	C	D
A		n=10+13 t=6.161 ***	n=10+15 t=1.593 ***	n=10+13 t=4.717 ***
B	n=9/12 F=2.402 ***		n=13+15 t=6.911 ***	n=13+13 t=2.742 ***
C	n=9/14 F=2.730 ***	n=12/14 F=1.137 ***		n=12+14 t=5.663 ***
D	n=9/12 F=3.566 ***	n=12/14 F=8.566 ***	n=14/12 F=9.735 ***	
varianza				

Indice di campo solido ICS				
media				
	A	B	C	D
A		n=3+6 t=5.815 ***	n=3+2 t=2.259 ***	n=3+3 t=5.501 ***
B	n=2/5 F=2.995 ***		n=6+2 t=2.726 ***	n=6+3 t=0.770 ***
C	n=1/2 F=6.853 ***	n=1/5 F=2.288 ***		n=2+3 t=2.233 ***
D	n=2/2 F=2.080 ***	n=2/5 F=1.444 ***	n=1/2 F=3.294 ***	
varianza				

TAB. 4 — Significatività delle differenze fra le medie e le varianze relative alle tipologie di deposito riferite al grado di connessione con il reticolo di scorrimento idrico superficiale (A: depositi isolati; B: depositi alimentati; C: depositi alimentatori; D: depositi alimentati e alimentatori) considerate a due a due. Per le medie in ogni riquadro sono indicate la somma del numero di campioni relativa a ciascuna popolazione, il valore del t-Student ed il livello di significatività (* modesto; ** medio; *** alto). Per le varianze sono indicate il rapporto fra il numero di campioni meno uno, il valore di F-Fisher ed il livello di significatività.

— Significance of differences between medius and variance for type of deposit referred to interconnection with runoff water.

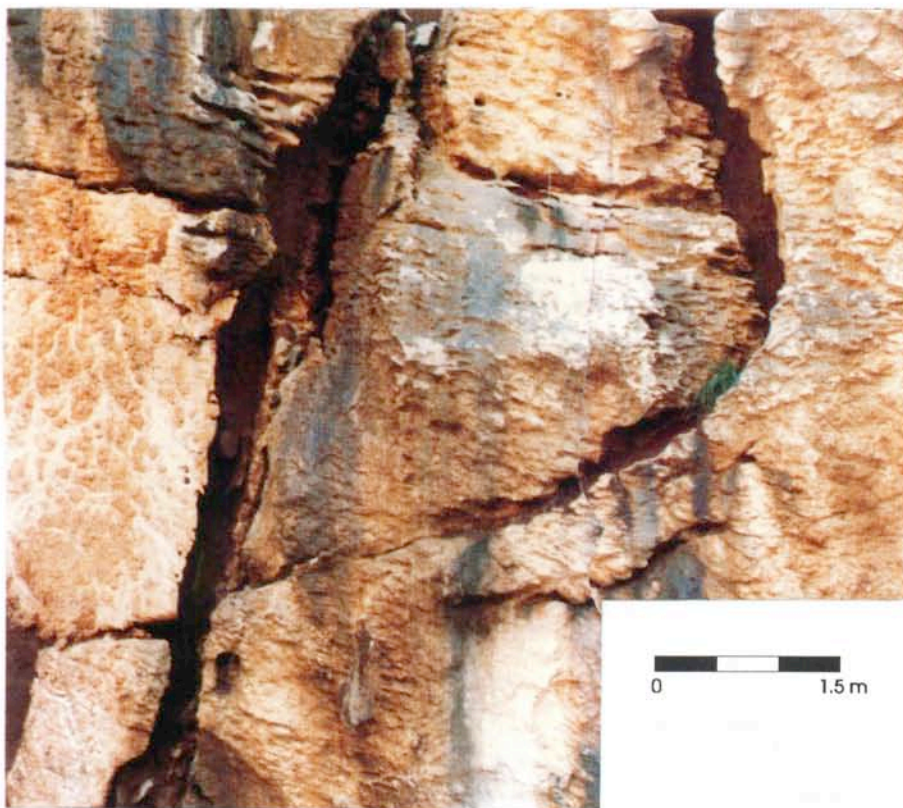


FIG. 9 — Coreno Ausonio: sistema di fratture beanti, colmate di terre rosse ed esposte su una parete di cava abbandonata nei calcari organogeni del Miocene medio-sup.

— Coreno Ausonio: exposure in quarry of bioclastic limestones of Miocene Middle-Upper showing open fractured system, filled by red soils.

co, l'azione dissolutiva sulle pareti della frattura con il conseguente ampliamento. La riapertura del condotto carsico determina l'asporto del deposito per erosione regressiva dal basso verso l'alto. Il *sinkhole* generalmente coinvolge l'intero spessore del deposito con una caratteristica forma imbutiforme. Spesso è direttamente esposto sul fondo il substrato calcareo

ed il *sinkhole* assume il ruolo di inghiottitoio con le pareti modellate nel deposito di terre rosse (Fig. 10). In tal caso, tuttavia, sia le dimensioni che la forma del *sinkhole* sono destinate ad alterarsi rapidamente per l'azione delle acque di ruscellamento che sono richiamate verso la frattura.

Nel caso b) lo sviluppo del *sinkhole* avviene per fe-



FIG. 10. — *Sinkhole* di tipo "a", evolutosi rapidamente per la riattivazione di un inghiottitoio carsico. La differenziazione cromatica verticale del deposito è conseguente anche al depauperamento delle frazioni fini connesso all'azione dei processi di filtrazione.

— *Sinkhole* type "a", due to reactivity of karstic sinkhole. Vertical chromatic difference comes also from the depaupering of silty and clayey fractions.

FIG. 11 — Sinkhole di tipo "b" in evoluzione per lento e progressivo cedimento che coinvolge volumi sempre più grandi di deposito.

— Sinkhole type "b", in evolution for low subsidence involving greater volumes of deposit.



nomeni di lento dilavamento, dal basso verso il tetto del deposito, con un asporto selezionato dal substrato calcareo assorbente che risulta privo di inghiottitoi. In tale situazione l'incremento di porosità determina un cedimento progressivo reso manifesto dal coinvolgimento di volumi di deposito più grandi (Fig. 11). Il fenomeno, una volta innescatosi, tende ad autosostenersi ed a sviluppare un'accelerazione nel tempo poiché, l'incremento di porosità determina una variazione della permeabilità con conseguente aumento del flusso idrico per il richiamo esercitato nelle zone adiacenti.

Conclusioni

Lo studio geomorfologico e geotecnico, condotto sulle aree carsiche della dorsale montuosa di Monte Maio, ha evidenziato le connessioni tra le caratteristiche del fenomeno carsico e le proprietà fisico-meccaniche delle terre rosse identificando l'azione di specifici processi di filtrazione che condizionano la stabilità dei depositi. Questi ultimi sono stati classificati in tre tipi riferiti al grado di carsificazione del substrato carbonatico e ulteriormente distinti in base al grado di isolamento con il reticolo di scorrimento idrico superficiale. Tali suddivisioni, effettuate con criterio geomorfologico, trovano riscontro nelle ca-

ratteristiche geotecniche dei depositi (densità secca e densità naturale, indice di campo solido, porosità, limite liquido, indice plastico, frazioni granulometriche $< 2 \mu$ e $< 10 \mu$).

I processi di instabilità sono stati differenziati in base alla diversa evoluzione del fenomeno di collasso. In particolare le forme di collasso gravitativo sono connesse alla riattivazione di preesistenti inghiottitoi nel substrato carbonatico, mentre le forme di lento e progressivo cedimento derivano dall'impoverimento delle frazioni fini ad opera dei processi di filtrazione.

L'analisi congiunta dei dati geomorfologici con quelli geotecnici consente il riconoscimento del regime di corrosione carsica di un'area (corrosione dorsale e/o frontale) permettendo l'individuazione dei settori con più elevata vulnerabilità della falda idrica. Non trascurabile, del resto, è il rischio connesso con l'eventuale realizzazione di opere (quali ad esempio bacini idrici, edifici, infrastrutture viarie, ecc.), in relazione ai caratteri peculiari degli accumuli di terre rosse, i cui parametri geotecnici risultano variabili non soltanto in relazione all'intensità dei processi di filtrazione verso il substrato carbonatico ed al grado di isolamento del deposito nei confronti dei processi di apporto-asporto di materiale, ma anche alla loro composizione mineralogica. Quest'ultima risulta palesemente condizionata dai depositi piroclastici di *air fall* connessi all'attività esplosiva degli apparati vulcanici.

SUMMARY

A new classification based on residual soil deposits and karst dynamics for vulnerability evaluation and land-planning into karst areas is presented. The geotechnical properties and stability condi-

tions of deposits are referred to the superficial and/or ground erosion processes, controlled by features of karst phenomena.

Manoscritto presentato il 28 ottobre 1992.

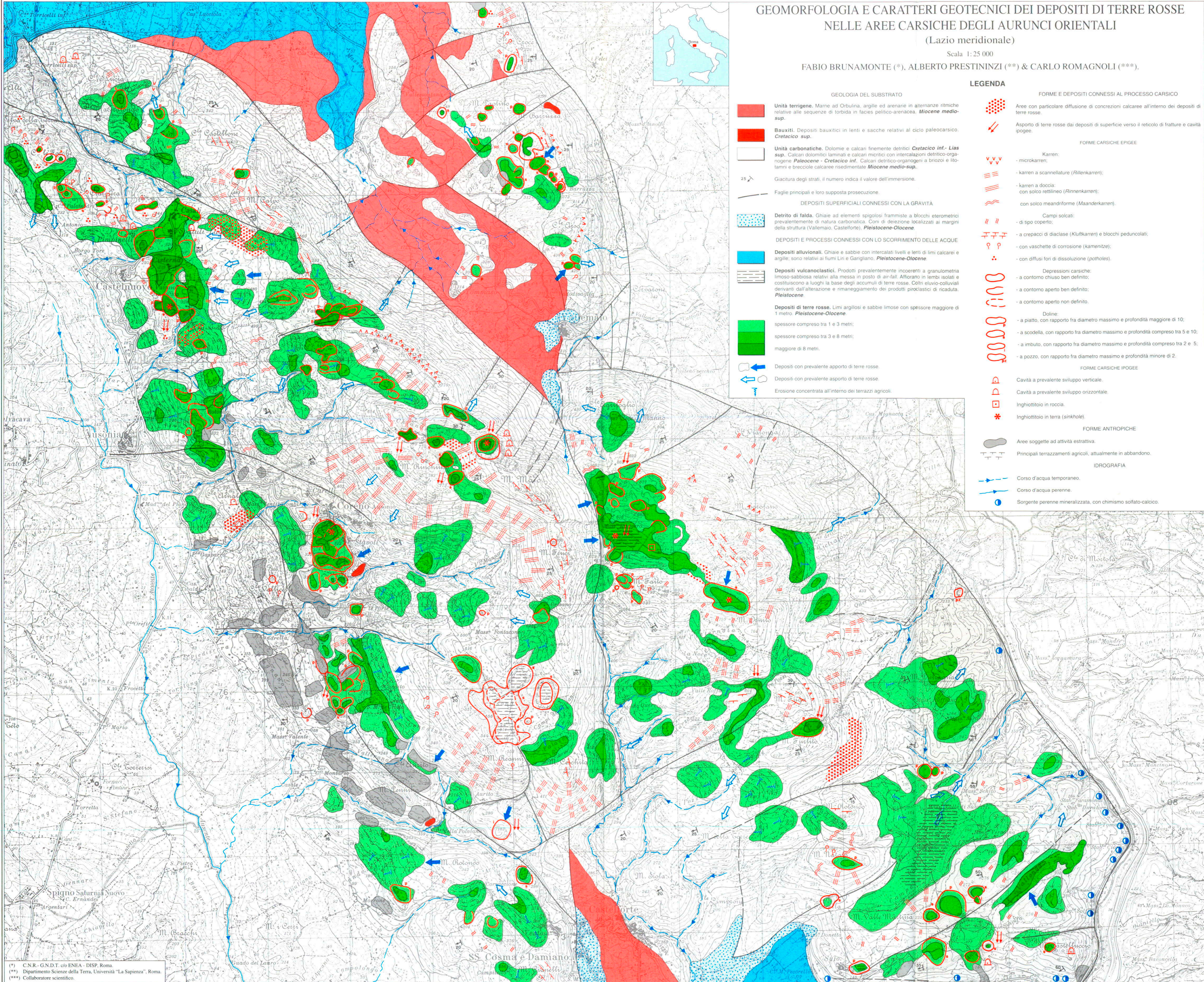
BIBLIOGRAFIA

- ACCORDI G., CARBONE F., CIVITELLI G. CORDA L., DE RITA D., ESU D., FUNICIELLO R., KOTSAKIS T., MARIOTTI G. & SPOSATO A. (1986) - Lithofacies map of Latium - Abruzzi and neighbouring areas. *Quaderno C.N.R. "La Ricerca Scientifica"*, **114** (5): 223 pp., 1 carta, Roma.
- AGOSTINI S. (1980) - Rapporti tra fenomeni carsici e caratteristiche litostratigrafiche e tettoniche nelle strutture dell'Appennino centrale: i Monti Lepini. *Not. Circ. Spel. Romano*, **25**, Roma.
- AGOSTINI S. (1983) - Tipologie carsiche nell'Appennino centrale e assetto strutturale: ipotesi di correlazione tra discontinuità carsiche e deformazioni tettoniche nelle rocce carbonatiche. *Grotte d'Italia*, **11** (4), Trieste.
- ANELLI F. (1959) - Nomenclatura italiana dei fenomeni carsici. *Grotte d'Italia*, **3** (3): 3-56, Castellana Grotte.
- AUBERT D. (1967) - Structure, activite et evolution d'une doline. *Bull. Soc. neuch. Sc. Nat.* **89**: 113-120, 1 fig., 1 tab., Neuchatel.
- AUBERT D. (1969) - Phenomenes et formes du Karst jurassien. *Eclogae geol. Helv.* **62** (2): 325-399, 44 figg., 4 tabb., Bale.
- BELLONI & OROMBELLI G. (1970) - Osservazioni e misure su alcuni tipi morfologici nei campi solcati del Carso triestino. *Atti Soc. It. Sc. Nat. e Museo Civ. St. Nat. di Milano*, **60** (h. 4), Milano.
- BOEGLI A. (1951) - Probleme der karrenbildung. *Geogr. Helvetica* **6**: 191 - 204, Zurigo.
- BOEGLI A. (1960) - Solution of limestone and karren formation. In: Karst morphology (edited by Sweeting H., 1972).
- BONI C.F., BONO P., CALDERONI G., LOMBARDI S. & TURI B. (1980) - Indagine idrogeologica e geochimica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella pianura pontina (Lazio meridionale). *Geologia Appl. e Idrog.* **15**, 203-247, 16 figg., 2 tabb., Bari.
- CASTANY G. (1967) - Traite pratique des eaux souterraines. 661 pp., 409 figg., 84 tabb., Dunod, Paris.
- CVUJIC J. (1918) - The dolines. In: Karst morphology. (edited by Sweeting H., 1972): 23-41, 2 tabb., New York.
- CRAMER H. (1941) - La systematique des dolines karstiques, avec considerations speciales sur les effondrements du sol, les cheminees, de mineraies et les phenomenes analogues. *BRGM, Service d'information geologique*, traduction **2165**: 96 pp., Paris.
- FENELON P. (1972) - Vocabulaire francais des phenomenes karstiques. *Edition du Centre Nat. Rech. Scient. Mem. et doc. de Serv. de doc. et de cart. geogr., N.S.*: 13-68, Paris.
- FORTI F. (1972) - Le "vaschette di corrosione". Rapporti tra geomorfologia carsica e condizioni geolitologiche delle carbonatiti affioranti nel Carso Triestino. *Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan"*, **11**: 37-65, Trieste.
- FORTI F. (1973) - Studio geomorfologico dei fori di dissoluzione nelle carbonatiti calcaree del Carso Triestino. *Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan"*, **12**: 19-27, Trieste.
- FORTI F. (1975) - Modelli di dissoluzione carsica. *st. Geol. e Paleont. Univ. di Trieste*, **131**: 13-20, Trieste.
- FORTI F., STEFANINI S. & ULCIGRAI F. (1975) - Relazione tra solubilità e carsificabilità nelle rocce carbonatiche del Carso Triestino. *Atti Mem. Comm. "E. Boegan"*, **14**, 19-49, Trieste.
- GRASSI D., ROMANAZZI L. & SPILOTRO G. (1975) - Caratteristiche geotecniche delle terre rosse della Puglia in relazione alla composizione chimico - mineralogica ed ai diversi tipi di depositi. *Geol. Appl. e Idrog.*, **10** (1): 309-337, 20 figg., 4 tabb., Bari
- GORTANI M. (1908) - Appunti per una classificazione delle doline. *Rend. sess. R. Acc. Sc. Ist. Bologna, classe Sc. fisiche*: 3-28, Bologna.
- KYRALI L. (1968) - Elements structuraux et alignement de phenomenes karstiques (Region du Gouffre du Petit Pre de Saint Livres, Jura Vaudois). *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, **91**: 127-146, 10 figg., Neuchatel.
- KYRALI L. (1970) - Rapport sur l'etat actuel des connaissances dans le domaine des caracteres physiques des roches karstiques. In: Hydrogeology of karstic terrains (edited by A. Burger & L. Dubertret for I.A.H. Commission for Hydrogeology of Karst). *International Union of Geological Sciences*, **B** (3): 53-67, 10 figg., 1 tabb., Paris.
- LUPIA PALMIERI E. & ZUPPI G.M. (1977) - Il carsismo degli altopiani di Arcinazzo (Lazio). *Geologica Romana*, **16**: 309-390, 36 figg., 18 tabb., 1 carta, Roma.
- MAUCCI W. (1960) - Contributo per una terminologia speleologica italiana. *Boll. Soc. Adr. Sc. Nat.*, **51**: 309-334, 17 figg., Trieste.
- PERNA G. (1974) - Il fitocarsismo nella formazione delle kamenitze ("vaschette di corrosione"). *Natura Alpina*, **25** (1), Trento.
- PERNA & SAURO (1978) - Atlante delle microforme di dissoluzione carsica superficiale del Trentino e del Veneto. *Mem. Museo Tridentino Sc. Nat.*, **22**, Trento.
- PRESTININZI A. & ROMAGNOLI C. (1991) - La vulnerabilità degli acquiferi negli studi a scala regionale. *Atti del Congresso ANDIS, Roma 11-13 dicembre 1991*, **1**: 205-216, 4 figg., Roma.
- PRESTININZI A. & ROMAGNOLI C. (1992) - La vulnerabilità degli acquiferi nei siti di discarica e nella bonifica di aree inquinate. *Atti del Simposio Italo-Brasiliano di Ingegneria Sanitaria ed Ambientale, Rio de Janeiro 29 marzo - 3 aprile 1992*, **2**: 112-126, 7 figg., Rio de Janeiro, Brasile.
- SEGRE A.G. (1948) - I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio. *Pubbl. Ist. Geogr. Univ. Roma*, **A**, (7): 293 pp., 33 figg., 1 carta, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1960) - Note illustrative dei fogli geologici n. 160 e 171.
- WILLIAMS P. W. (1972) - Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **83**: 761-796; New York.

GEOMORFOLOGIA E CARATTERI GEOTECNICI DEI DEPOSITI DI TERRE ROSSE NELLE AREE CARSIICHE DEGLI AURUNCI ORIENTALI (Lazio meridionale)

Scala 1:25 000

FABIO BRUNAMONTE (*), ALBERTO PRESTININZI (**), & CARLO ROMAGNOLI (***)



GEOLÓGIA DEL SUBSTRATO

- Unità terrigene. Marne ad Orbulina, argille ed arenarie in alternanze ritmiche relative alle sequenze di torbida in facies pelitico-arenacea. *Miocene medio-sup.*
- Bauxiti. Depositi bauxitici in lenti e sacche relativi al ciclo paleocarsico. *Cretacico sup.*
- Unità carbonatiche. Dolomie e calcari finemente detritici *Cretacico inf. - Lias sup.*. Calcari dolomitici laminati e calcari micritici con intercalazioni detritico-organogene *Paleocene - Cretacico inf.*. Calcari detritico-organogeni a briozoi e lito-lami e breccie calcaree risedimentate *Miocene medio-sup.*
- 25. Giacitura degli strati, il numero indica il valore dell'immersione.
- Faglie principali e loro supposta prosecuzione.

DEPOSITI SUPERFICIALI CONNESSI CON LA GRAVITÀ

- Detrito di falda. Ghiaie ad elementi spigolosi framme a blocchi eterometrici prevalentemente di natura carbonatica. Coni di deiezione localizzati ai margini della struttura (Vallemaio, Castellforte). *Pleistocene-Olocene*.

DEPOSITI E PROCESSI CONNESSI CON LO SCORRIMENTO DELLE ACQUE

- Depositi alluvionali. Ghiaie e sabbie con intercalati livelli e lenti di limi calcarei e argille; sono relativi ai fiumi Liri e Gangliano. *Pleistocene-Olocene*.
- Depositi vulcanoclastici. Prodotti prevalentemente incoerenti a granulometria limoso-sabbiosa relativi alla messa in posto di *air-fall*. Affiorano in lembi isolati e costituiscono a luoghi la base degli accumuli di terre rosse. Coltri eluvio-colluviali derivanti dall'alterazione e rimarraggiamento dei prodotti piroclastici di ricaduta. *Pleistocene*.
- Depositi di terre rosse. Limi argillosi e sabbie limose con spessore maggiore di 1 metro. *Pleistocene-Olocene*.
 - spessore compreso tra 1 e 3 metri;
 - spessore compreso tra 3 e 8 metri;
 - maggiore di 8 metri.
- Depositi con prevalente apporto di terre rosse.
- Depositi con prevalente asporto di terre rosse.
- Erosione concentrata all'interno dei terrazzi agricoli.

LEGENDA

FORME E DEPOSITI CONNESSI AL PROCESSO CARSIICO

- Arece con particolare diffusione di concrezioni calcaree all'interno dei depositi di terre rosse.
- Asporto di terre rosse dai depositi di superficie verso il reticolo di fratture e cavità ipogee.

FORME CARSIICHE EPIGEE

- Karren:
 - mikrokarren;
 - karren a scannellature (Rillenkarren);
 - karren a doccia: con solco rettilineo (Rinnenkarren);
 - con solco meandriforme (Maanderkarren).
- Campi solcati:
 - di tipo coperto;
 - a crepacci di diaclasi (Kluftkarren) e blocchi pedunculati;
 - con vaschette di corrosione (kamenitez);
 - con diffusori fori di dissoluzione (potholes).
- Depressioni carsiche:
 - a contorno chiuso ben definito;
 - a contorno aperto ben definito;
 - a contorno aperto non definito.
- Doline:
 - a piatto, con rapporto fra diametro massimo e profondità maggiore di 10;
 - a scodella, con rapporto fra diametro massimo e profondità compreso tra 5 e 10;
 - a imbuto, con rapporto fra diametro massimo e profondità compreso tra 2 e 5;
 - a pozzo, con rapporto fra diametro massimo e profondità minore di 2.

FORME CARSIICHE IPOGEE

- Cavità a prevalente sviluppo verticale.
- Cavità a prevalente sviluppo orizzontale.
- Inghiottoio in roccia.
- Inghiottoio in terra (sinkhole).

FORME ANTROPICHE

- Arece soggette ad attività estrattiva.
- Principali terrazzamenti agricoli, attualmente in abbandono.

IDROGRAFIA

- Corso d'acqua temporaneo.
- Corso d'acqua perenne.
- Sorgente perenne mineralizzata, con chimismo solfato-calcico.

(*) CN.R. - G.N.D.T. ex ENEA - DISP. Roma.
 (**) Dipartimento Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma.
 (***) Collaboratore scientifico.