

M. PAPPALARDO (*), C. PORROTTO (**), E. M. SPAGNOLO (*)

RICOSTRUZIONE PALEOMORFOLOGICA DELL'AREA VULCANICA DI RADICOFANI (TOSCANA SUD-ORIENTALE)

Riassunto - Il presente lavoro fornisce un contributo alla conoscenza della paleomorfologia dell'area vulcanica di Radicofani (Toscana sud-orientale). Il neck di Radicofani appartiene ad un apparato vulcanico formatosi presumibilmente 1,3 Ma fa ed è circondato da migliaia di blocchi di vulcaniti che poggiano su di un substrato pliocenico prevalentemente argilloso. Questi blocchi di diametro massimo intorno al metro formano accumuli di detrito alla base del muro lavico mentre appaiono irregolarmente distribuiti lungo i versanti del rilievo in un raggio di circa 3 km². L'elemento morfologico dominante nella zona è il sistema di forme d'erosione da acque correnti (calanchi), tipico dei litotipi argillosi e ben noto in questo contesto morfo-climatico. L'analisi geomorfologica di dettaglio è stata corredata da analisi spaziali realizzate con l'ausilio di un Sistema Informativo Geografico su un modello digitale del terreno relativo all'area in esame. Tutti i blocchi di vulcaniti, rilevati da fotointerpretazione, sono stati digitalizzati ed è stata così realizzata una carta della densità dei blocchi. È stata inoltre effettuata un'ulteriore elaborazione informatica al fine di quantificare la distribuzione dei clasti sugli alti e bassi morfologici. In questo modo, è stato possibile riconoscere il rispettivo ruolo dei diversi agenti morfogenetici nel determinare la presente, eterogenea, distribuzione dei blocchi di vulcaniti. Un contributo alla ricostruzione della morfologia originaria dell'apparato di Radicofani è rappresentato dal riconoscimento di nuove colate oltre alle due già note in letteratura, e precisamente una verso sud, una verso OSO ed una verso NE rispetto al centro effusivo di Radicofani. Sulla base di osservazioni morfologiche un secondo centro effusivo viene poi ipotizzato nei pressi di Poggio Casano, dove è presente una disposizione di blocchi che erano stati riconosciuti più antichi degli altri blocchi vulcanici affioranti nell'area. I rapporti fra argille plioceniche e colate residuali evidenziano come l'area di studio abbia subito un fenomeno di inversione del rilievo. Infine, coerentemente con il diverso stato di conservazione dei blocchi vulcanici analizzati, è stato possibile identificare una differente maturità delle forme nel versante nord-orientale ed in quello sud-occidentale dell'apparato, dovuta forse ad una differente attività tettonica recente.

Parole chiave - Geomorfologia vulcanica, telerilevamento, analisi GIS, inversione del rilievo, Radicofani (Toscana).

Abstract - *Paleomorphological reconstruction of the Radicofani area (South-eastern Tuscany).*

This paper is a contribution to the paleo-morphological knowledge of the Radicofani volcanic area (SW Tuscany). The Radicofani neck is related to a volcanic apparatus that was formed about 1.3 My and it is surrounded by volcanites

blocks lying on a Pliocene clay substratum. These blocks (maximum diameter around 1 m) form detritic accumulations at the base of the summit scarp while they are irregularly distributed on the flanks of the relief for about 3 km². The dominant geomorphological element in the area are the erosive features due to running water (calanchi), typical of clay rocks and well-known in this morpho-climatic context.

The detailed geomorphological field work was carried on together with a GIS spatial analysis of the local DEM. The volcanites blocks, mapped on aerial photos, were digitised and elaborated to create a blocks density map. Moreover, the data were processed in order to quantify the blocks distribution within actual high and low topography. In this way, it was possible to understand the role of each different morphological agent in determining the present heterogeneous distribution of the volcanites blocks. Part of the original morphology of the Radicofani volcanic apparatus was reconstructed thanks to the detection of the original lava flows. In particular, three new lava flows were recognized: one towards south, one towards WSW and another one towards NE starting from the effusive centre. On the basis of the morphological observations a second effusive centre is hypothesized near Poggio Casano, where the volcanites blocks are older than the other ones in the area. The relationship between the Pliocene clays and the residual lava flows shows that the area underwent an evident relief inversion. Finally, coherently with the different conservation status of the blocks, it was possible to identify a different maturity of the morphologies of the NW and SE volcanic apparatus flanks, probably related to a different recent tectonic behaviour.

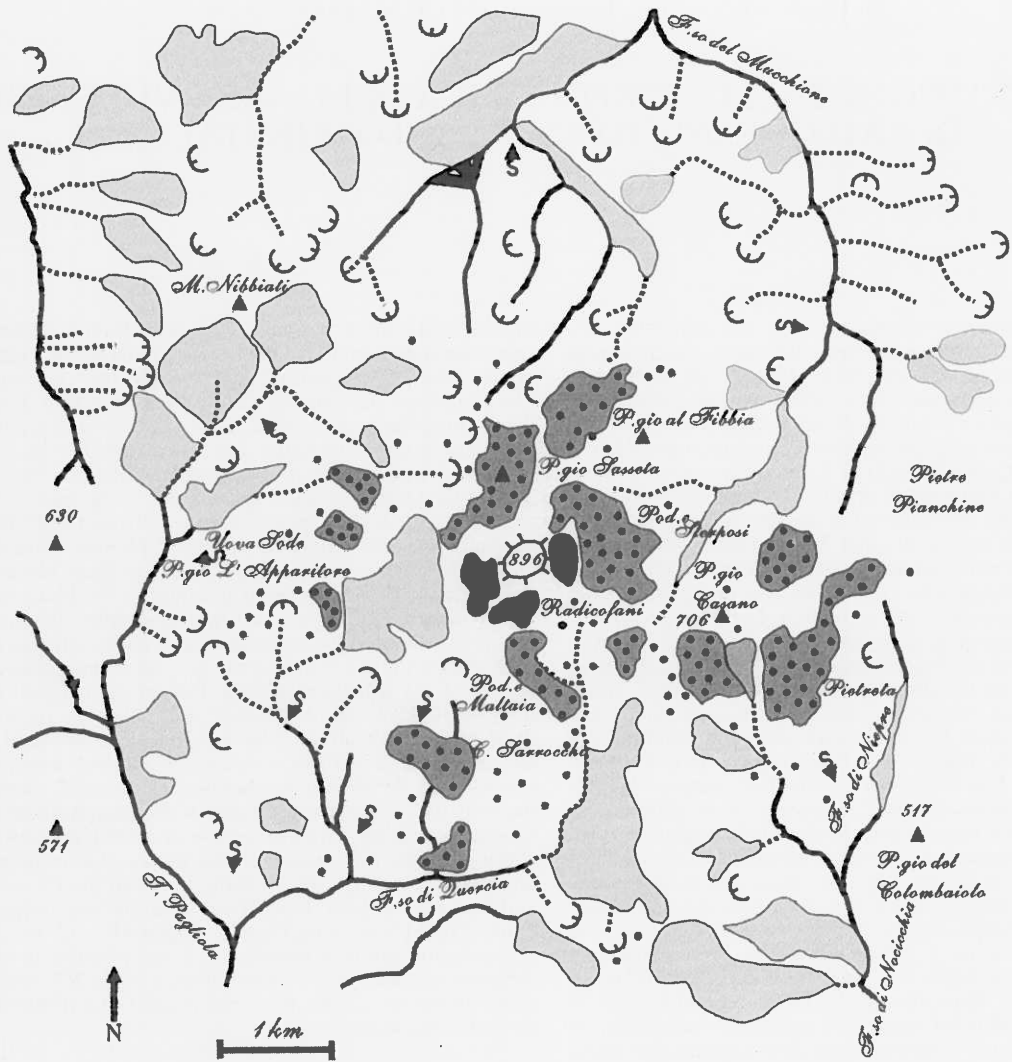
Key words - Volcanic geomorphology, remote sensing, GIS analysis, relief inversion, Radicofani (Tuscany).

INTRODUZIONE

Lo scopo della nota è lo studio geomorfologico di una tipica zona sede di vulcanismo quaternario, l'area di Radicofani, nella Toscana sudorientale. Gli studi geomorfologici sui vulcani, specie se recenti, rivestono un particolare interesse (Ollier, 1988), tanto che una specifica branca, la Geomorfologia Vulcanica, ha assunto una propria individualità disciplinare nell'ambito della Geomorfologia (Freda, 1997; Thouret, 1997). La rupe, ai piedi della quale sorge il paese di Radicofani, è costituita da un affioramento di vulcaniti (shoshoniti, shoshoniti ultrapotassiche e latiti ultrapotassiche) interpre-

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa.

(**) Piazza Cairoli 8, Calci (PI).



LEGENDA





-  Corso d'acqua perenne o temporaneo
-  Gully
-  Forma calanchiva a sviluppo areale
-  Forma calanchiva a sviluppo lineare
-  Cono alluvio-torrentizio
-  Soliflusso o colamento
-  Gruppo di blocchi di lava senza soluzione di continuità
-  Gruppo di blocchi di lava
-  Blocchi sparsi di lava
-  Orlo di scarpata di neck



Fig. 1 - Schema geomorfologico dell'area di studio.

tato in letteratura come un *neck*, appartenente ad un apparato vulcanico formatosi presumibilmente 1,3 Ma fa. Tutto attorno all'apparato centrale sono presenti blocchi di vulcaniti, di dimensioni mediamente attorno al metro, che poggiano su di un substrato costituito in prevalenza da argille plioceniche, dando luogo ad un paesaggio caratterizzato dagli effetti dell'erosione selettiva. Questi blocchi, mentre formano accumuli di detrito clasto-sostenuto alla base del muro lavico, appaiono irregolarmente distribuiti lungo i versanti del rilievo in un raggio di circa 3 km².

Il motivo di interesse dello studio della morfologia di quest'area sta appunto nel modo particolare in cui l'erosione si è esplicata, diverso sulle argille e sulle vulcaniti, nel corso dell'ultimo milione di anni. La morfologia attuale è caratterizzata da un rilievo nella parte centrale dove affiorano le rocce del condotto vulcanico, mentre lungo i versanti si individuano due fasce concentriche caratterizzate da una pendenza più dolce e gradualmente decrescente dal centro verso la periferia: nella fascia più interna i prodotti vulcanici sono disgregati per alterazione in posto ma anche parzialmente dislocati ad opera di fenomeni gravitativi (crolli di porzioni del condotto vulcanico), mentre nella fascia più esterna, nella quale si osserva una dispersione di blocchi di vulcaniti in un raggio di 3 km, il contributo dell'agente morfogenetico gravitativo è difficilmente valutabile. Il fattore antropico risulta di estrema importanza nella modificazione della morfologia sia della parte centrale dell'apparato, sulla quale esiste un insediamento medievale, sia della fascia esterna più prossima ad essa, punteggiata da cave per l'estrazione delle rocce del condotto vulcanico, che di quella ancor più esterna, nella quale è a tratti evidente l'intervento umano nella dislocazione dei blocchi di vulcaniti, soprattutto per fini agricoli.

L'analisi geomorfologica si è sviluppata partendo da un rilevamento sul terreno a grande scala, del quale si presenta una sintesi (Fig. 1). Per evidenziare i rapporti fra i diversi blocchi di vulcaniti e fra essi e il condotto centrale, si è posta particolare attenzione alla loro caratterizzazione litologica, integrando i dati desunti dalla letteratura con osservazioni sul terreno. Per quanto riguarda la morfologia originaria delle colate, al fine di individuarne gli assi principali sono stati messi in relazione i dati altimetrici con la densità di distribuzione dei blocchi. A tale scopo è stato acquisito ed opportunamente elaborato un modello digitale del terreno (DTM) relativo all'area in esame.

Una prima elaborazione del DTM ha permesso di mettere in luce la presenza di alti morfologici allineati e disposti radialmente rispetto al centro dell'originale condotto. La digitalizzazione a video di tutti i blocchi di vulcaniti, rilevati grazie a fotointerpretazione di fotografie aeree ad alta risoluzione opportunamente digitalizzate e georeferenziate (ortofoto), ha permesso di realizzare con l'uso di specifici softwares geografici, una carta della densità dei blocchi. Da questa carta, per confronto con il DTM, è stato possibile evidenziare cartograficamente l'andamento originario delle colate. Infine, un'ulteriore elaborazione informatica, realizzata col supporto di specifiche estensioni di "analisi area-

le" (*spatial analyst*) in ambiente GIS, ha permesso di quantificare la distribuzione dei clasti residuali in base alla loro posizione (alto o basso morfologico).

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

L'area studiata è situata nella Toscana sud-orientale, lungo la direttrice che collega Siena con Roma (Strada Statale Cassia o, più precisamente, la sua variante medievale nota come Via Francigena). La rupe vulcanica di Radicofani (Fig. 2), che raggiunge 896 m s.l.m., è separata dalla Valle del Paglia dal rilievo del Monte Amiata, mentre il solco dell'Orcia lo divide dalla catena appenninica. L'insediamento umano sulla rupe risale ad epoca etrusca, ma il segno principale dell'impatto antropico sul paesaggio consiste nell'imponente fortificazione che occupa la porzione sommitale della rocca, la cui edificazione risale all'epoca carolingia, ma modifiche ed ampliamenti sono stati realizzati sino alla metà del XVI secolo. Questa fortificazione si inserisce mirabilmente fra gli affioramenti lavici, sfruttandone la morfologia a scopo difensivo. Nel secondo dopoguerra, inoltre, a seguito di una discutibile politica locale, è stato realizzato il rimboschimento della rupe (Giardini, 1997), obliterando gli affioramenti di blocchi di vulcaniti dislocati lungo le pendici del cono.

L'apparato vulcanico di Radicofani si trova all'interno di un bacino sedimentario nell'omonimo graben che si estende in direzione circa NO-SE. Il graben è delimitato a SO dal rilievo vulcanico del Monte Amiata (1738 m s.l.m.) e dall'horst di Monte Civitella (1107 m)-Monte Elmo (829 m), a NE dall'horst di Monte Cetona (1148 m).

Il graben di Radicofani rientra nella tipologia delle strutture distensive che hanno preso origine nel versante tirrenico dell'Appennino tra il Tortoniano Superiore e il Quaternario, in seguito al manifestarsi di una tettonica estensionale di stile rigido che ha scomposto i moti plicativi generatisi durante la tettonica collisionale. L'evento estensionale che ha strutturato i graben orientati NO-SE è caratterizzato da una serie di faglie normali molto inclinate che tagliano le strutture precedenti,

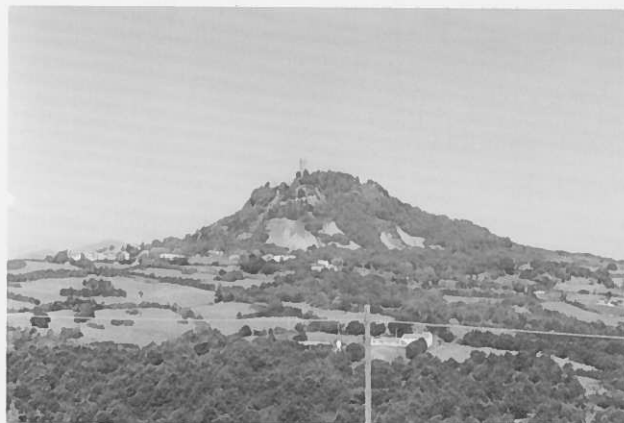


Fig. 2 - Il *neck* di Radicofani visto da da sud.

probabilmente secondo un modello a faglie listriche. Diversi Autori (Gelmini, 1974; Funicello *et al.*, 1977; Boccaletti *et al.*, 1977; Boccaletti & Coli, 1979; Alexander & Formichi, 1993) hanno individuato nell'area di studio una serie di lineamenti tettonici E-O, N-S, NO-SE e NE-SO. In realtà, solo pochi lineamenti E-O e N-S possono ritenersi attivi (Boccaletti *et al.*, 1977), mentre in letteratura sono sempre più documentate (prevalentemente attraverso l'analisi azimutale dei corsi d'acqua) direzioni circa appenniniche (NO-SE) e anti-appenniniche (NE-SO) (Alexander & Formichi, 1993). Inoltre, sempre secondo Boccaletti *et al.* (1977), i maggiori eventi sismici avvenuti nella Toscana Meridionale devono in gran parte riferirsi a faglie anti-appenniniche.

L'intero bacino di Radicofani è costituito essenzialmente da argille di colore grigio della trasgressione marina del Pliocene Inferiore e Medio e poggiano su depositi lacustri del Miocene. Le argille si intercalano a strati argillosi, arenacei e argilloso-arenacei di tipo torbiditico e a conglomerati (Liotta, 1992; Bossio *et al.*, 1993). Sui terreni neogenici si sovrappongono i depositi vulcanici dell'apparato di Radicofani.

I dati petrologici e le relative interpretazioni sono stati desunti dalla letteratura sull'argomento, ed in particolare da D'Orazio *et al.*, 1991 e D'Orazio *et al.*, 1994. Il rilievo troncoconico è interpretato da questi Autori come un neck con diametro basale di circa 400 m ed altezza di un centinaio di metri, al quale si associano una serie di blocchi di vulcaniti rinvenibili in un raggio di 3 km dal centro dell'apparato, in parte riconducibili a colate laviche di composizione ed età diversa. Il neck non è omogeneo: vi si ritrovano infatti shoshoniti nella parte basale e mediana e shoshoniti ultrapotassiche nella parte superiore, distinguibili in affioramento per il colore, la vescicolazione e le diverse forme di alterazione. Le età radiometriche ottenute con diversi metodi dalle vulcaniti del neck indicano che l'apparato di Radicofani si è messo in posto nel Pleistocene Inferiore, precisamente attorno a 1,3 Ma. La caratterizzazione petrografica, nota in dettaglio per le diverse parti del neck, non lo è altrettanto per i blocchi di vulcaniti presenti nell'area circostante, ad eccezione di quelle che si trovano presso Poggio Sasseta, che sono identiche alle rocce del neck, e quelle di Poggio Casano che sono latiti ultrapotassiche e risultano più giovani delle prime.

GEOMORFOLOGIA

Il neck

L'apparato vulcanico di Radicofani è costituito essenzialmente dal neck, che corrisponde alla parte affiorante del condotto. Le opere dell'uomo hanno modificato e parzialmente cancellato la morfologia sommitale del neck, il cui limite superiore coincide con l'inizio della scarpata del muro lavico. Nel versante orientale il limite è evidenziato dalla base della cinta muraria. La sommità del neck è una superficie debolmente inclinata verso ovest di 5° 5' circa con un dislivello di 10 m; in essa si trovano sparsi blocchi di vulcaniti, e di scorie

rossastre di varie dimensioni dette volgarmente "Pepa di Radicofani", ora rimossi ed inglobati nei più recenti restauri della rocca.

Le lave affioranti ed i blocchi di vulcaniti appartengono a colate diverse. Le mura della fortificazione inglobano in molti punti lave in posto, come nel lato occidentale del bastione. Dai blocchi scoriacei leggeri e molto vescicolati di colore rossastro, che si trovano nella parte più vicina al lato ovest della cinta muraria, si passa progressivamente, scendendo fino al muro lavico, a blocchi sempre più compatti e sempre meno vescicolati, con le vescicole appena percepibili ad occhio nudo. Esse sono del tutto assenti proprio nei blocchi al margine del muro lavico, all'altezza della prima curva della rotabile che scende dalla rocca.

Il muro lavico presenta fratture principali di raffreddamento verticali. Lungo la strada sterrata che va da sotto la Porta del Vento fino a al Palazzo Pretorio, le fratture principali di raffreddamento si intensificano variando le loro lunghezze. Davanti al Palazzo Pretorio si trovano almeno tre-quattro ordini di scarpate nel muro (opera antropica recente), dove sono stati operati dei rinforzi con reti metalliche e con pali. Le fratture verticali hanno la lunghezza dell'intera parete e presentano scarse fratture secondarie di raffreddamento molto più piccole. Le fratture secondarie, orizzontali, si intensificano alla curva dove si dirama la strada sterrata. Sono state fatte opere di rinforzo in tutte le pareti laviche della rocca, con iniezioni di cemento nelle fratture verticali ed infissione di micropali in particolare nella parte sud-occidentale della parete. Nel lato sud-orientale tali fratture orizzontali si intensificano verso l'alto: questo è il punto del neck dove la fratturazione secondaria orizzontale risulta più evidente. I blocchi lavici isolati dalle fratture presentano a tratti delle esfoliazioni. In corrispondenza delle fratture e nelle esfoliazioni si esplica preferenzialmente la degradazione della roccia. Affioramenti di lava con frequenti esfoliazioni si trovano sopra il cimitero e ed anche nell'area ad esso circostante.

La base del neck

Il limite inferiore del neck viene fatto coincidere con la base della relativa parete rocciosa. A parte il versante nord-occidentale, dove il neck risulta in continuità con gli affioramenti attribuiti in letteratura alla colata di Poggio Sasseta, la base della parete rocciosa scompare al di sotto di una fascia di detrito che si può genericamente definire di origine gravitativa. Esso si presenta come un deposito clasto-sostenuto, formato prevalentemente da blocchi di dimensioni superiori al m, con scarsissima matrice ghiaioso-sabbiosa. La sua genesi è legata al disfacimento progressivo dell'apparato per processi gravitativi, ma potrebbe in parte essere costituito da residui di colate, delle quali mal si distingue l'andamento.

Lungo il lato orientale del neck, alla base del muro lavico, il detrito non è più presente in forma di fascia ma costituisce un grosso accumulo, la cui superficie alterna porzioni concave e convesse; questo accumulo è il prodotto dell'erosione in posto di una colata, alla quale si sono sovrapposti modesti depositi risultanti da frane

di crollo distaccatesi dalle pareti del neck.

Altri due grandi accumuli simili al precedente sono presenti nel versante sud ed in quello ovest del neck, là dove questo sovrasta il centro abitato. Prima dell'edificazione del nuovo campo sportivo e la recente espansione del tessuto urbano i due accumuli costituivano un'unica area. La rigogliosa vegetazione d'alto fusto e di sottobosco, sviluppata a seguito dei rimboschimenti, rende mal delineabile la morfologia originaria degli ammassi; si può comunque affermare che la mancanza di freschezza della parete di distacco rende più dubbio il riconoscimento di una componente gravitativa nella dislocazione dei blocchi.

A partire dall'insediamento urbano del paese di Radicofani il limite inferiore del neck è poi spesso obliterato dalle opere dell'uomo. Alcuni fronti di vecchie cave sono mal distinguibili fra la vegetazione. Uno si trova sul lato nord-occidentale sopra il cimitero ed è riconoscibile grazie alla disposizione dei blocchi di lava che non corrisponde ad alcuna possibile messa in posto di tipo naturale. Parallelamente sul versante est si trovano più cave, il cui fronte è maggiormente distinguibile, e sopra la Fonte Antese si scorge un muro che divide un fronte di cava inferiore da uno superiore. Un altro fronte di cava si trova, parzialmente obliterato dalla vegetazione, nel lato nord della rocca.

L'area circostante il neck

Intorno all'apparato vulcanico di Radicofani troviamo numerosi blocchi di lava giacenti senza continuità sul substrato argilloso. La loro dislocazione è in parte frutto dell'opera dell'uomo, come appare evidente dalla regolare localizzazione di allineamenti degli stessi lungo corsi d'acqua o limiti di proprietà, ma molti si trovano nella loro posizione naturale, o come residui di un affioramento roccioso, probabilmente una colata, rimasti in posto e isolati dall'erosione, o come prodotti dell'alterazione di un ammasso roccioso e spostati ad opera degli agenti morfogenetici. Parte di questi blocchi sono già stati riconosciuti come appartenenti a colate del neck di Radicofani ma secondo D'Orazio *et al.* (1994) l'unica colata definibile con certezza è quella che parte dalla parete nord della rocca e che arriva fino a Poggio a Sasseta.

Altre due colate invece sono solo ipotizzate da D'Orazio *et al.* (1994). Una sembra partire dal lato nord est del neck e dirigersi verso Poggio al Fibbia; la sua esistenza è desumibile dalla concentrazione di blocchi e maggiormente dall'andamento significativamente convesso del profilo topografico. L'altra presunta colata si svilupperebbe a partire da un grosso ammasso di blocchi di vulcaniti lungo il versante ENE del neck e si estenderebbe sino in Località Sterposi. La grande concentrazione di blocchi di lava presso Poggio Casano potrebbe sembrare anch'essa il residuo di una colata, ma D'Orazio *et al.* (1994) rilevano una incompatibilità litologica fra le rocce dei blocchi di questo ammasso e quelle del neck, come è stato sottolineato in precedenza.

Attraverso l'intero apparato e per la sommità del neck passa, con andamento NO-SE lo spartiacque tra i bacini idrografici del Paglia e dell'Orcia. Le tre probabili

colate delle quali si è detto sopra si trovano tutte nel bacino idrografico dell'Orcia, ed è in tutti e tre i casi possibile intuirne il profilo in rilievo.

Nel bacino idrografico della Paglia, invece, l'erosione ha agito con maggiore intensità. Qui l'unica evidenza che possa far supporre l'esistenza di colate è la presenza di ammassi di blocchi di vulcaniti. Tre altre grandi concentrazioni di blocchi si ritrovano infatti ad ovest e nord-ovest dell'apparato di Radicofani.

La prima di esse si trova in Località Uova Sode; i blocchi sono rossastri chiari e taluni presentano forme di esfoliazione, che possono interessare quasi interamente il blocco stesso. La seconda si trova presso Poggio L'Apparitore: qui i blocchi sono di colore più chiaro del caso precedente, sono spesso vescicolati, con vescicole grosse a forma di goccia. Infine a sud di Radicofani si trova un ammasso di blocchi chiari vescicolati presso il podere di Maltaia, ed a sud-ovest di questo, presso il Podere Sarrocchi, blocchi di colore grigio, con vescicole fitte e piccole, sono concentrati in due ammassi principali. Allineamenti dei medesimi blocchi si rinvengono lungo le sponde del Fosso di Quercia e dei suoi affluenti di destra: in questo caso (come, in misura minore, presso il Podere Sterposi) la naturale distribuzione dei blocchi è mascherata dall'opera antropica. Come appare evidente dalla sintesi del rilevamento geomorfologico (Fig. 1), i maggiori ammassi di blocchi lavici sono intervallati da aree dove la densità dei medesimi è notevolmente minore, tanto da non consentire, se non con un'inaccettabile approssimazione, di definirne i limiti areali. Sono state effettuate osservazioni di terreno relativamente ad alcune caratteristiche di questi blocchi, in particolare la forma, le dimensioni, il tipo di alterazione, la presenza di esfoliazioni, fratturazioni ed il loro grado di arrotondamento, allo scopo di mettere in luce eventuali processi secondari di trasporto. Sulla base di queste analisi si può ritenere che i blocchi siano i residui di un processo di alterazione complessa (*weathering in situ*) di una lava fratturata. Poiché l'analisi geomorfologica risulta poco efficace a rendere ragione della loro distribuzione, si è proceduto ad un'indagine della loro distribuzione per mezzo di applicazioni GIS (par. 4).

LA MORFOLOGIA DEL SUBSTRATO ARGILLOSO

La natura litologica del substrato sul quale si è messo in posto il neck di Radicofani favorisce lo sviluppo di morfotipi legati alle acque correnti ed alla gravità. In particolare sono estremamente diffusi i calanchi, ed in misura notevolmente minore le cosiddette "biancane", le note forme d'erosione mammellonari che si generano a seguito dei medesimi processi che danno origine ai calanchi (Vittorini, 1977; Guasparri, 1978; Mazzanti & Rodolfi, 1988; Rodolfi 1991; Colica, 2000). Secondo Ciccacci *et al.*, (1988) i calanchi si sono formati nella porzione sommitale del bacino grazie alle forti acclività determinate dall'effetto protettivo sulle argille di materiale vulcanico meno erodibile. Le forme calanchive dell'area nella fase attuale mostrano scarsa attività; questa recente quiescenza le acco-

muna a quelle della Val d'Era, ed è stata spiegata da Vittorini (1997) in termini di modificazioni delle condizioni climatiche a breve termine. Sono state distinte, sulla base dell'analisi geomorfologica, forme calanchive a prevalente sviluppo areale da altre a prevalente sviluppo lineare. Queste ultime sono caratterizzate da un canale tipo *gully* molto inciso, in evidente retrogressione, e le aree di interfluvio sono modellate a creste aguzze e continue; il pattern formato dai diversi elementi lineari è poco ramificato, ed essi tendono a drenare tutti in un collettore principale di basso ordine. I calanchi a prevalente sviluppo areale, invece, sono vallecole dai versanti molto più estesi e meno acclivi dei precedenti, dove su ciascuno dei due versanti è incisa una fitta rete di microcanali che si ramificano. Inoltre, fra i calanchi a prevalente sviluppo areale cartografati sono evidenti coalescenze verificatesi in passato o tuttora in atto. Queste caratteristiche di forma riflettono diversi stadi evolutivi: i calanchi lineari possono essere considerati incipienti, mentre gli altri maturi.

I calanchi a prevalente sviluppo lineare sono maggiormente diffusi nella parte nord-orientale dell'area di studio (bacino dell'Orcia), mentre l'area che drena verso il bacino del Paglia è caratterizzata da forme più mature. Questa diversa morfologia potrebbe rispecchiare una diversità di composizione nelle argille, in particolare una diversa abbondanza di carbonato di calcio (Vittorini, 1977). Tuttavia nel bacino del Paglia sono anche massimamente diffusi i fenomeni di soliflusso e colamento (unificati simbolicamente in Fig. 1); anche secondo Ciccacci *et al.* (1988) i colamenti, in quest'area, sono spesso associati ai fenomeni di tipo calanchivo. Questo maggiore sviluppo dei processi geomorfici giustifica molto bene la minore conservazione delle colate e la maggiore dispersione dei blocchi di vulcaniti che contrappone l'area sud-occidentale a quella nord-orientale, come già osservato in precedenza. Sulla base della tesi, caldeggiata da una parte degli autori che si sono occupati dell'argomento (Mazzanti & Rodolfi, 1988), secondo la quale la formazione dei calanchi sarebbe stimolata dall'attività neotettonica, le diverse caratteristiche geomorfologiche osservabili nelle due porzioni del territorio studiato potrebbero dipendere da una più intensa attività tettonica recente nel bacino del Paglia rispetto a quello dell'Orcia.

Infine i corsi d'acqua che si sviluppano a partire dalle falde del neck sono disposti grossomodo radialmente, rispettando il tipico pattern dell'idrografia vulcanica, che rende evidente il sollevamento dovuto alla messa in posto del magma. Fanno eccezione i canali che confluiscono verso il bacino del Paglia: si veda ad esempio l'andamento degli affluenti di destra del F.so di Quercia, che sono tutti paralleli fra di loro con orientazione NNO-SSE, così come il corso principale del Torrente Pagliola, il F.so di Niepre ed il F.so di Nocicchia. Questo parallelismo suggerisce un'attività dei lineamenti tettonici ad orientazione grossomodo N-S successiva alla fase di attività dell'apparato di Radicofani.

RICOSTRUZIONE PALEOMORFOLOGICA

L'individuazione e la ricostruzione delle antiche colate del vulcano ormai inattivo è la premessa essenziale per poter comprendere la paleomorfologia dell'area di studio. Al fine di riconoscere le diverse colate laviche che devono aver caratterizzato le fasi attive del centro vulcanico di Radicofani, si è proceduto al confronto e all'integrazione di tre analisi diverse: il rilevamento geomorfologico, la fotointerpretazione e l'elaborazione dei dati raccolti attraverso un Sistema Informativo Geografico.

Attualmente delle ipotetiche colate laviche non restano che ammassi di blocchi di lava, con o senza soluzione di continuità, inframezzati da aree a blocchi sparsi e meno concentrati. Il rilevamento e la fotointerpretazione di queste forme relitte hanno consentito l'individuazione di possibili allineamenti o direzioni preferenziali che potrebbero essere espressione residuale di colate laviche distinte. Per la fotointerpretazione è stato utilizzato il volo 22 giugno 1976 (Regione Toscana, quota 9000 m). I fotogrammi relativi ad un'area di circa 35 km² centrata sull'apparato di Radicofani sono stati acquisiti tramite scanner, georeferenziati e mosaicati grazie a particolari applicazioni GIS. Le diverse fotografie sono quindi state direttamente interpretate a video con l'individuazione dei singoli blocchi vulcanici e la creazione di un nuovo tematismo informatico costituito da punti corrispondenti ai diversi blocchi individuati. Nel nuovo tematismo così originato ed automaticamente georeferenziato, per ogni blocco rilevato (oltre 11.000) è possibile conoscere immediatamente la sua posizione geografica in termini di latitudine, longitudine e quota sul livello del mare.

Parallelamente all'analisi fotointerpretativa, si è proceduto con un'indagine più tipicamente topografica, che ha visto l'elaborazione del modello digitale del terreno (DTM). Il DTM dell'area di studio, acquistato dal Servizio Cartografico dell'Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI), è derivato da un processo di digitalizzazione delle carte topografiche (tavolette) in scala 1:25.000 prodotte dall'IGMI stesso ed è perciò caratterizzato da un passo di 20 metri. L'analisi del DTM ha permesso di enfatizzare alcuni tratti morfologici altrimenti mal visibili e di quantificare alcune relazioni ipotizzate nella distribuzione degli elementi relitti. Da una prima elaborazione del DTM sono state ottenute, grazie a specifiche estensioni GIS (Spatial Analyst e 3D Analyst di Arcview), carte relative alle diverse fasce altimetriche e all'esposizione e pendenza dei versanti nonché modelli tridimensionali dell'area di studio ed immagini ombreggiate (shadow relief). Associando a queste immagini (e in particolare all'elaborazione tridimensionale) il tematismo puntuale relativo ai relitti lavici nonché le ortofoto (Fig. 3) è stato possibile individuare una distribuzione preferenziale dei blocchi relitti secondo determinati assi direzionali, radiali rispetto al neck stesso, ed una loro stretta associazione con gli alti morfologici dell'area di studio, ad indicare un processo di inversione del rilievo.

Per meglio evidenziare e quantificare queste caratteri-

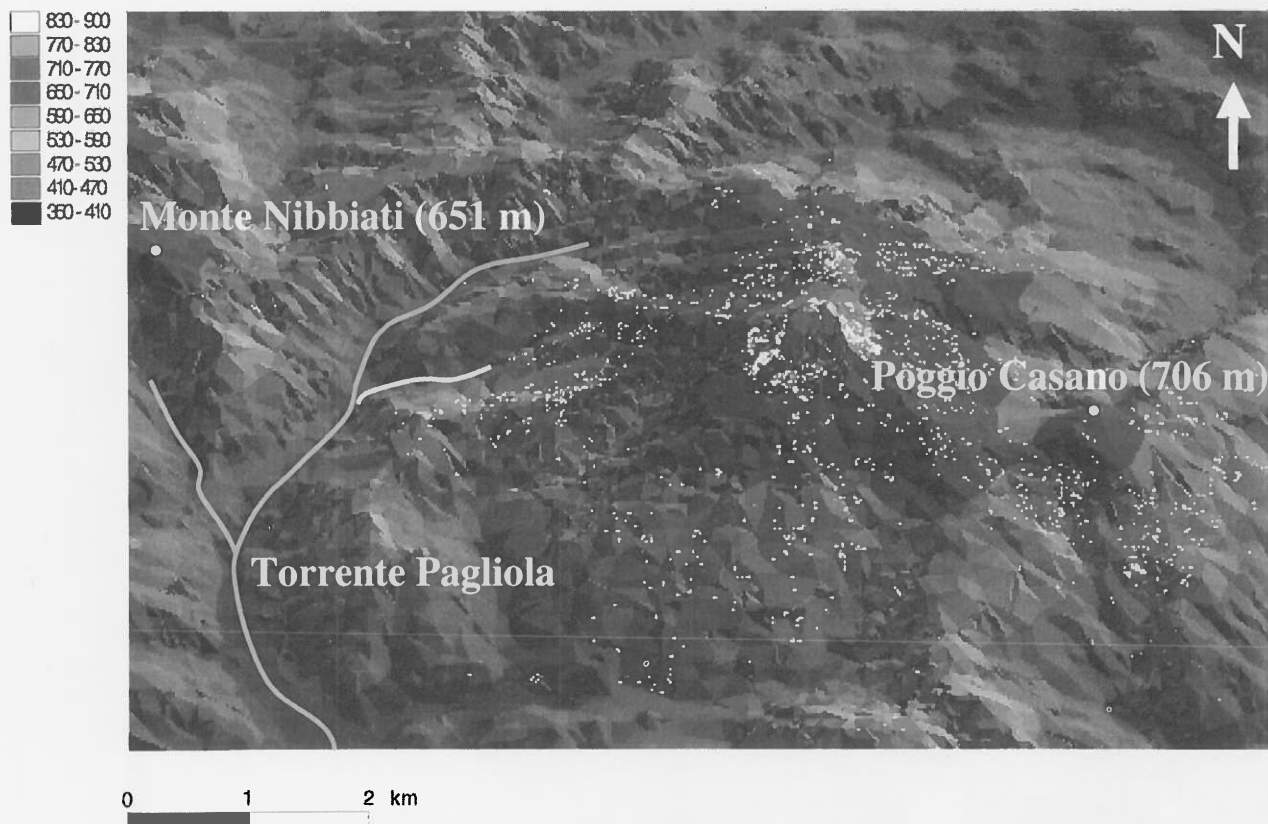


Fig. 3 - Immagine tridimensionale dell'area di studio (in bianco i principali affioramenti di blocchi di vulcaniti).

stiche emerse da una prima analisi superficiale, attraverso l'uso di programmi in ambito GIS appositamente elaborati, è stata successivamente calcolata la densità di queste forme relitte secondo una griglia regolare di celle di 100 m di lato. Ad ogni cella cioè è stato associato il valore corrispondente al numero di blocchi presenti all'interno dell'area quadrata diviso per l'area della cella (10.000 m²). La sovrapposizione tra il tematismo relativo alla densità dei blocchi relitti e quello relativo alle quote, per semplice moltiplicazione, ha permesso di ottenere una carta della densità dei blocchi "pesata" sull'altitudine a cui essi si trovano. Da questa carta (Fig. 4) emerge chiaramente che le aree di maggior densità di blocchi relitti si allineano in gran parte lungo le dorsali che scendono dal neck di Radicofani secondo tre-quattro assi maggiori che potrebbero corrispondere ad altrettante colate laviche.

Dalla carta emerge inoltre la presenza di una zona anomala (poiché troppo lontana dal neck attuale) ad elevata concentrazione di questi blocchi relitti (Poggio Casano) apparentemente non in relazione con le supposte direttrici delle antiche colate laviche. Al fine di valutare quantitativamente la relazione fra la distribuzione dei blocchi relitti e la topografia (alti e bassi morfologici)

ci) si è proceduto ad un'ulteriore elaborazione GIS. Dal DTM di base è stato automaticamente calcolato, sempre per celle di 100 m di lato, il grado di curvatura delle curve di livello con intervalli di 25 m ottenute dall'elaborazione automatica del DTM stesso. Da questo parametro è possibile infatti riconoscere e distinguere quantitativamente convessità e concavità delle curve di livello ovvero alti morfologici (valori di curvatura compresi tra 0 e 1) e bassi morfologici (valori di curvatura compresi tra 0 e -1). Una volta ottenuto questo nuovo tematismo relativo al grado di curvatura per celle di 100 m di lato, si è proceduto al confronto automatico con il tematismo della densità dei blocchi relitti ottenuto sempre per celle di 100 m di lato. In questo modo è stato possibile quantificare la relazione esistente fra i due tematismi e, in particolare, conteggiare automaticamente il numero di elementi puntuali presenti in aree concave (e quindi bassi morfologici) e quelli invece associati ad aree convesse (alti morfologici).

I risultati indicano che gli alti morfologici contengono, escludendo ovviamente la zona stessa del neck (che ne farebbe aumentare enormemente il numero), 7200 elementi puntuali (cioè blocchi lavici relitti), mentre i bassi morfologici ne contengono solo 4600.

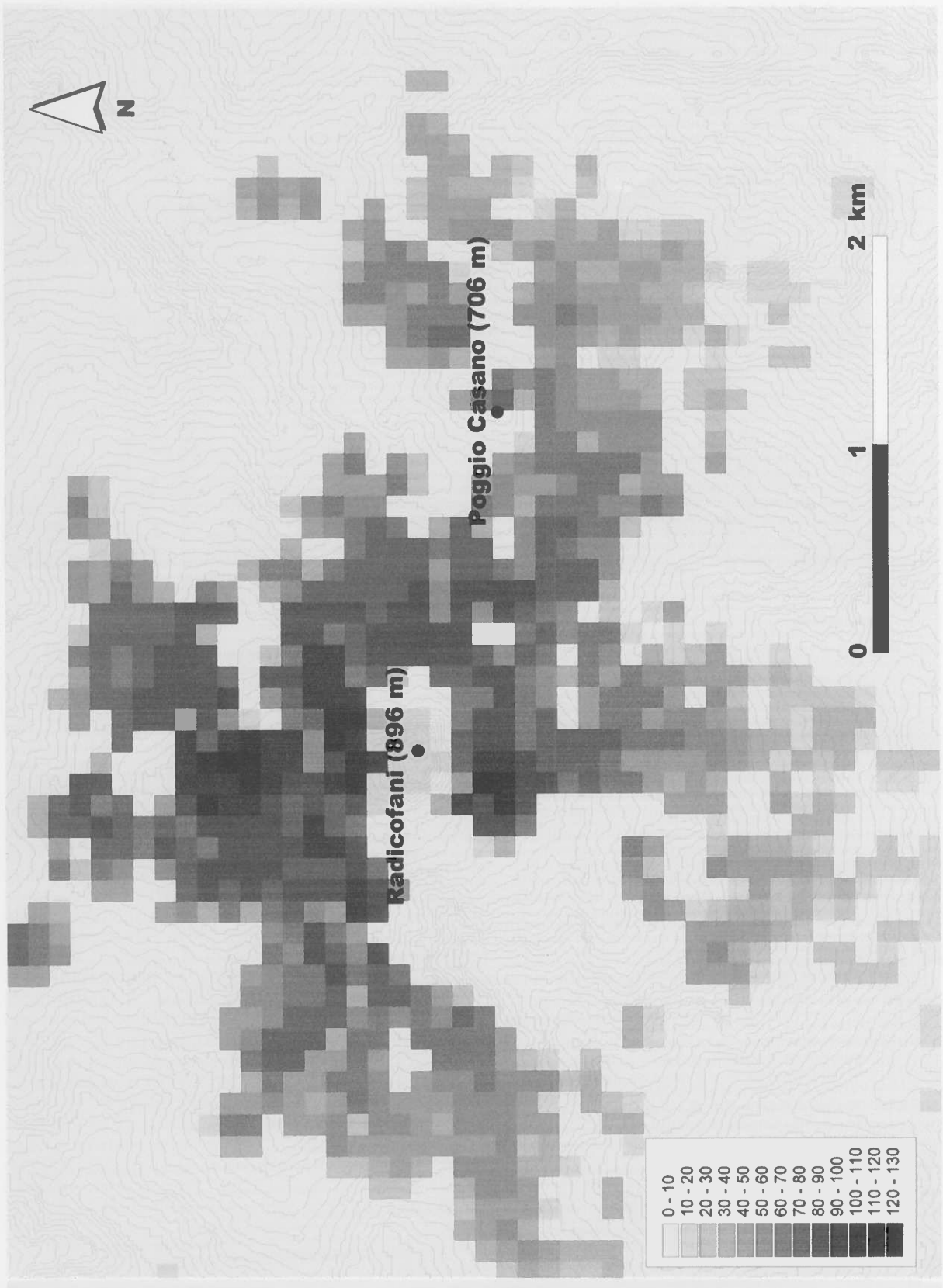


Fig. 4 - Carta della densità dei blocchi di vulcaniti calcolata per celle di 100 m e normalizzata rispetto alle quote.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'indagine geomorfologica di terreno, l'analisi di fotografie aeree ad alta risoluzione e la successiva elaborazione con metodologia GIS dell'apparato vulcanico di Radicofani e di un suo opportuno intorno ha consentito di precisare l'evoluzione morfologica pleistocenica dell'area.

I blocchi lavici che si rinvenivano nell'area devono essere interpretati come i residui di un processo di alterazione complessa (*weathering*) *in situ* di una lava fratturata. Una componente gravitativa nella dislocazione dei blocchi può essere chiamata in causa esclusivamente per gli accumuli presenti alla base del muro lavico. Viene inoltre confermata l'esistenza delle colate, già note, di Poggio Sasseta e quella di Poggio al Fibbia. L'analisi ha permesso altresì di evidenziare tre ulteriori accumuli di blocchi interpretabili come residui di colate. Nel Bacino del Torrente Paglia una probabile colata è quella che si sviluppa verso S e che presenta le culminazioni topografiche di Case Sarrocchi e Podere Maltaia attestandosi sul versante destro del Fosso di Quercia. Sempre all'interno di questo bacino, un'altra probabile colata è quella che si sviluppa verso OSO, parzialmente smembrata da un affluente sinistro del Torrente Pagliola, verso le località di Uova Sode e Poggio l'Apparitore. Nel Bacino del Fiume Orcia, a breve distanza dal neck, sembra essere presente il relitto della porzione sommitale di un'altra colata, con probabile sviluppo nord-orientale, verso località Podere Sterposi.

Un ulteriore importante elemento emerso da questo studio è la presenza di un settore anomalo nei pressi di Poggio Casano (706 m, Fig. 5), dove si osserva una disposizione di blocchi concentrica rispetto alla culminazione topografica difficilmente attribuibile, per il suo assetto geometrico, ad un'effusione centrale proveniente dal neck di Radicofani. In quest'ottica si avvalorano l'ipotesi di D'Orazio *et al.* (1994) secondo cui l'età di questi relitti lavici sarebbe superiore a quella degli altri blocchi vulcanici affioranti nell'area.

Complessivamente, la distribuzione di queste forme



Fig. 5 - Blocchi di lava presso Poggio Casano.

relitte differisce in modo evidente tra i due versanti del cono di Radicofani. Infatti, nel versante sud-occidentale le colate sembrano essere molto meno conservate a causa di una maggior attività erosiva. Se a questo si aggiungono le differenze morfologiche dei due versanti già rilevate (maturità dei calanchi, frequenza dei fenomeni di soliflusso e colamento), è possibile ipotizzare una diversa evoluzione di questi settori forse legata ad una differente attività tettonica.

Infine, la maggior concentrazione di relitti vulcanici lungo i crinali che si dipartono dal neck centrale, come quantificato attraverso l'analisi dell'occorrenza dei blocchi negli alti e nei bassi morfologici, ci permette di concludere che nell'area di studio si è verificata un'inversione del rilievo. In quest'ottica, le forme relitte rappresentanti colate laviche, in gran parte erose, devono essersi messe in posto nei bassi morfologici (valli o vallecole di probabile origine fluviale) che caratterizzavano la morfologia dell'area durante la fase di attività del vulcano.

RINGRAZIAMENTI

La gratitudine degli Autori va al Prof. P.R. Federici per le proficue discussioni in corso d'opera e per la revisione finale del lavoro. Al Dott. F. Mazzarini un vivo ringraziamento per la lettura critica del testo

Lavoro eseguito con fondi CNR, centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino.

BIBLIOGRAFIA

- Alexander D. & Formichi R., 1993. Tectonic causes of landslides. *Earth Surf. Proc. Land.* 18: 311-338.
- Boccaletti M. Coli M. & Napoleone G., 1977. Nuovi allineamenti strutturali da immagini Landsat e rapporti con l'attività sismica degli Appennini. *Boll. Soc. Geol. It.* 96: 679-694.
- Boccaletti M. & Coli M., 1979. Sistemi di fratture dell'Appennino settentrionale da immagini Landsat: loro significato e problematiche. *L'Universo* 59: 123-136.
- Bossio A., Costantini A., Lazzarotto A., Liotta D., Mazzanti R., Mazzei R., Salvadorini G. & Sandrelli F., 1993. Rassegna delle conoscenze sulla stratigrafia del neautoctono toscano. *Mem. Soc. Geol. It.* 49: 17-98.
- Ciccacci S., D'Alessandro L., Fredi P. & Lupia Palmieri E., 1988. Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa allo studio dei processi di denudazione nel bacino idrografico del torrente Paglia (Toscana meridionale Lazio settentrionale). *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, I: 171-188.
- Colica A., 2000. Analysis of the genesis and evolution of calanco morphology in an experimental area of Paiccia (Radicofani, Siena, Italy). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 23: 21-32.
- D'Orazio M., Laurenzi M.A. & Villa I.M., 1991. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of shoshonitic lava flow of the Radicofani volcanic center (Southern Tuscany). *Acta Vulcanol.* 1: 63-67.
- D'Orazio M., Innocenti F., Serri G. & Petrini R., 1994. Il vulcano di Radicofani nel quadro del magmatismo neogenico-quadernario dell'Appennino settentrionale. *Stud. Geol. Camer. vol spec:* 79-92.
- Fredi P., 1997. Comments on posters and oral papers presented. *Proceedings of the Fourth International Conference on Geomorphology, Bologna, session: Volcanic Geomorphology, Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat. III/3:* 133-135.
- Funciello R., Parrotto M., Salvini F., Locardi E., & Wise D.U., 1977. Correlazione tra lineamenti rilevati con il metodo "Shadow" e assetto tettonico nell'area vulcanica del Lazio. *Boll. Geod. e Sc. Aff.*, 36, 451-470.

- Gelmini R., 1974. Carta geologica schematica del bacino senese. *Boll. Soc. Geol. It.*, 93: 839-859.
- Giardini M.P., 1997. Il paesaggio storico del territorio di Radicofani (Siena) e la politica urbanistica attuata dal dopoguerra ad oggi. *Riv. Geogr. Ital.* 104: 507-529.
- Guasparri G., 1978. Calanchi e biancane nel territorio senese: studio geomorfologico. *L'Universo*, 58, 97-139.
- Liotta D., 1992. Struttura del bacino di Radicofani lungo la sezione Piancastagnaio (M. Amiata) S. Casciano dei Bagni (M. Cetona). In: *L'Appennino Settentrionale. Riassunti. 76a Riunione Estiva. S.G.I. Firenze*, 182.
- Mazzanti R., & Rodolfi G., 1988. Evoluzione del rilievo nei sedimenti argillosi e sabbiosi dei cicli neogenici quaternari italiani. In: *Canuti P. & Pranzini E. (a cura di). La gestione delle aree franose*, Edizioni delle Autonomie, Firenze, 13-60.
- Ollier C., 1988. *Vulcani, attività, geografia, morfologia*. Zanichelli, Bologna.
- Rodolfi G., 1988. Forme di erosione nei sedimenti neogenici e quaternari. In: *Mazzanti R. (a cura di) La gestione delle aree franose*, Edizioni delle Autonomie, Firenze, 19-30
- Thouret J.C., 1997. Research Problems and potential contributions to related earth sciences: an overview. *Proceedings of the Fourth International Conference on Geomorphology, Bologna, session: Volcanic Geomorphology, Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., III/3: 115-133.*
- Vittorini S., 1977. Origine e ruolo dei calanchi e delle biancane. *Boll. Soc. Geogr. It.*, 6, 25-54.
- Vittorini S., 1997. Climatic change and badland processes in Tuscany (Italy). *Fourth International Conference on Geomorphology, Bologna, Abstracts, Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., III/1, 395.*