

LATERAL SPREAD EVOLVENTI DA DEFORMAZIONI GRAVITATIVE PROFONDE DI VERSANTE AL FRONTE DELLA CATENA APPENNINICO-MAGHREBIDE (SICILIA MERIDIONALE)

LATERAL SPREAD EVOLVING FROM A DEEP-SEATED GRAVITATIONAL SLOPE DEFORMATIONS TO THE FRONT OF THE APENNINIC-MAGHREBIAN CHAIN (SOUTHERN SICILY)

VINCENZO FERRARA(*), GIOVANNA PAPPALARDO(*) & FRANCESCO RAPISARDA(**)

(*) University of Catania – Department of Geological Sciences – Catania, Italy – pappalar@unict.it

(**) ENEA – National Agency for new Technologies Energy and Environment – Rotondella, Italy

RIASSUNTO

Nel presente lavoro si analizzano i movimenti di “lateral spread” rilevati lungo la costa meridionale siciliana. Il quadro geologico-strutturale nel quale si inserisce l’area è quello della Falda di Gela, che rappresenta il fronte più avanzato di deformazione della Catena Appenninico-Maghrebide, strutturatasi nel Plio-Pleistocene.

Il rapido sollevamento dell’area, che ha prodotto un’elevata energia di rilievo, unitamente alle condizioni litostrutturali dei terreni carbonatici poggianti su terreni argillosi, hanno prodotto evidenti fenomeni di lateral spread, ricollegabili a Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGSD).

Mediante dettagliate analisi geologico-morfologiche sono stati riconosciuti vari aspetti delle DGSD ed è stato descritto il meccanismo dei fenomeni presenti nell’area esaminata.

I lenti ma continui movimenti connessi a tali deformazioni producono fenomeni di dissesto, che assumono particolare evidenza nelle aree intensamente antropizzate, generando lesioni nelle strutture varie ed in numerosi edifici.

PAROLE CHIAVE: *lateral spread, DGSD, Appenninico-Maghrebide, Sicilia meridionale*

INTRODUZIONE

Fenomeni di deformazione gravitativa profonda dei versanti (DGSD) sono stati segnalati per la prima volta da TERZAGHI (1962), JAHN (1964) e ZISHINSKY (1966), DAL PIAZ (1936), AMPFERER (1939), nei Carpazi e nelle Alpi austriache. Successivamente molti autori (TERSTEPANIAN, 1966; ZARUBA & MENCL, 1969; NEMCOK *et alii*, 1972; NEMCOK, 1977; PASEK & PULINOMA, 1976; MALGOT, 1977) hanno segnalato in varie parti del mondo fenomeni gravitativi riferibili a DGSD.

VARNES (1978), nel riproporre la classificazione delle frane, include alcuni esempi di movimenti gravitativi profondi ascrivibili tipologicamente a “rock block slide”, “rock flow”, “lateral spread” e fenomeni complessi. Il lateral spreading si sviluppa attraverso un movimento di espansione laterale e traslazione di blocchi; litologicamente è caratterizzato da rocce a comportamento rigido sovrastanti materiale a comportamento plastico. Questo fenomeno è caratteriz-

ABSTRACT

The work examines the evolution of a lateral spread located in the southern coast of Sicily. The geological-structural framework of the area is represented by the Plio-Pleistocene Gela Nappe, the most advanced deformational front of the Apenninic-Maghrebian Chain in southern Sicily.

The recent uplift of the area has increased the relief energy and the lithostructural conditions of the slopes where rigid rock overlies material with plastic behaviour, causing the activation of lateral spreading evolving from a Deep Seated Gravitational Slope Deformation (DGSD).

Geological and morphological analyses allowed the detailed reconstruction of the movement mechanism of the phenomena in the study area.

DGSD induces slow landsliding movements whose effects are particularly evident in man-made structures such as roads and buildings.

KEY WORDS: *lateral spread, DGSD, Apenninic-Maghrebian Chain, Southern Sicily*

INTRODUCTION

Deep-seated gravitational slope deformation (DGSD) was first noted by TERZAGHI (1962), JAHN (1964) and ZISHINSKY (1966), DAL PIAZ (1936), AMPFERER (1939), in the Carpathians and in the Austrian Alps. Subsequently, gravitational phenomena attributed to DGSD have been described all over the world by many authors (TERSTEPANIAN, 1969; ZARUBA & MENCL, 1969; NEMCOK *et alii*, 1972; NEMCOK, 1977; PASEK & PULINOMA, 1976; MALGOT, 1977).

The landslide classification of VARNES (1978) includes various examples of deep-seated gravitational movements that can be typologically ascribed to *rock block slides*, *rock flows*, *lateral spread* and complex phenomena. Lateral spreading develops through lateral extensional movements of separated blocks downhill; lithologically it is characterized by a fractured mass of rigid rock overlying material with plastic behaviour. This spreading is commonly characterized by approximately horizontal linear or curving trenches which occur

zato dalla presenza di trench a sviluppo lineare o curvilineo lungo i versanti in prossimità delle creste. I trench generalmente sono orientati parallelamente alle creste dei versanti e sono limitati inferiormente da contropendenze (SAVAGE & VARNES, 1987).

Numerosi casi di fenomeni del genere, i cui meccanismi sono tipici di DGSD, sono stati segnalati anche in Italia in varie parti dell'Appennino (soprattutto quello meridionale) (GUERRICCHIO & MELIDORO, 1973; AGNESI *et alii*, 1978; SORRISO-VALVO, 1979; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979; DRAMIS & SORRISO-VALVO, 1983; FORCELLA, 1983; DRAMIS *et alii*, 1985; GENEVOIS *et alii*, 1987; FORCELLA & ROSSI, 1987; DRAMIS *et alii*, 1987, BISCI *et alii*, 1996; DRAMIS & SORRISO-VALVO, 1994).

Data l'incidenza di questi fenomeni sull'evoluzione dell'ambiente fisico e quindi la loro importanza ai fini dell'uso del territorio, nel 1980 è stato istituito un gruppo nazionale di studio delle DGSD sponsorizzato dal C.N.R.. In Sicilia, i casi segnalati da ricercatori afferenti alla Linea 2 del G.N.D.C.I. ricadono nelle aree occidentali, in particolare nelle province di Palermo e di Trapani (AGNESI *et alii*, 1984; AGNESI, 1994; AGNESI *et alii*, 1995; 1997; 2000).

Le DGSD descritte nella presente nota rappresentano la prima segnalazione nel settore meridionale della Sicilia. Il contesto litostrutturale in cui essi si collocano è rappresentato da rocce a comportamento fragile (rocce carbonatiche ed evaporitiche) diffusamente fratturate, poggianti su rocce a comportamento duttile (argille e marne della Formazione Licata). La tettonica recente ha provocato il rapido sollevamento dell'area, generando sistemi di faglie e creando condizioni particolarmente favorevoli per lo sviluppo di DGSD.

LINEAMENTI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI

La geologia dell'area studiata è caratterizzata dalla presenza del fronte di compressione più avanzato dell'orogene Appenninico-Maghrebide. Questa parte del cuneo accrezionale è conosciuta come Falda di Gela (Ogniben, 1969) (Fig. 1) e rappresenta l'elemento strutturale dell'avanfossa Gela-Catania, originatasi dal collasso del margine settentrionale dell'Avampae Ibleo in seguito alla messa in posto della stessa. Affiora estesamente nella Sicilia sud-orientale e si estende in mare al largo tra Gela e Agrigento (Fig. 2), configurandosi come una struttura arcuata, con convessità rivolta verso il bacino di avanfossa plio-pleistocenico (Bacino di Caltanissetta) (GRASSO *et alii*, 1990; GRASSO & MANNA, 1990; BUTLER *et alii*, 1992). Questo bacino, orientato NE-SW, rappresenta un graben riempito da colate gravitative di terreni prevalentemente plastici, di età compresa tra il Miocene medio ed il Quaternario, e spessore massimo di 7500 m tra Agrigento e Licata (DECIMA & WEZEL, 1971). L'assetto strutturale è determinato dallo scollamento di vari orizzonti della successione neogenico-quaternaria (LICKORISH *et alii*, 1999).

La principale struttura plicativa è la sinclinale di Licata, orientata E-W, il cui fianco meridionale, oggetto del presente lavoro, è costituito da formazioni fortemente disarticolate da strutture di interferenza a scala minore con assi orientati N-S (BUTLER & GRASSO, 1993;

on slopes usually near ridge crests. The trenches generally strike parallel to ridge crests and are bounded on the lower side by uphill-facing scarps (SAVAGE & VARNES, 1987).

Numerous cases of this kind, whose dimensions and mechanisms indicate DGSD, have been described in Italy, particularly in southern Apennines (GUERRICCHIO & MELIDORO, 1973; AGNESI *et alii*, 1978; SORRISO-VALVO, 1979; GENEVOIS & PRESTININZI, 1979; DRAMIS & SORRISO-VALVO, 1983; FORCELLA, 1983; DRAMIS *et alii*, 1985; GENEVOIS *et alii*, 1987; FORCELLA & ROSSI, 1987; DRAMIS *et alii*, 1987, BISCI *et alii*, 1996; DRAMIS AND SORISO-VALVO, 1994;).

Due to the impact of such phenomena on the physical environment and thus their importance for the use of the territory, a national group for the study of DGSD sponsored by the National Research Council was established in 1980. The cases illustrated in Sicily by the scientists belonging to the "Line 2" research units of the G.N.D.C.I. of CNR (National Group for the Defense against Hydrogeological Disasters - Nat. Res. Council) lie in the western areas of the island, particularly in the areas around Palermo and Trapani (AGNESI *et alii*, 1984; AGNESI, 1994; AGNESI *et alii*, 1995; 1997; 2000).

The DGSD-related processes described in the present work are the first noted in this part of Sicily. They are facilitated by the lithologic arrangement of brittle rocks (evaporitic carbonate rocks) on top of ductile rocks (clays and marls of the Licata Formation) and by recent tectonic uplift which have created the DGSD development favourable conditions.

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL SETTING

The geological setting of the study area is characterized by the top surface of a southward propagating compressional wedge at the front of the Appenninic-Maghrebic orogen. This part of the wedge, known as the Gela Nappe (OGNIBEN, 1969) (Fig. 1), representing the structural element of the Gela-Catania foredeep originated from the collapse of the northern margin of the Iblei foreland after its emplacement. It outcrops in a wide area in southeastern Sicily and extends into the Gela-Agrigento offshore (Fig. 2), defining an arcuate structure whose convex side faces the Plio-Pleistocene foredeep known as the Caltanissetta Basin (GRASSO *et alii*, 1990; GRASSO & LA MANNA, 1990; BUTLER *et alii*, 1992).

This foredeep basin is elongated in a NE-SW direction and is filled with gravity flow deposits represented by plastic units ranging in age from Miocene to Quaternary, with a maximum thickness of 7500 m between Agrigento and Licata (Decima & Wezel, 1971). The structural setting is related to the repeated presence of detachment horizons in the Neogene-Quaternary successions (LICKORISH *et alii*, 1999).

The principal fold structure is the E-W oriented Licata syncline, whose southern flank is the subject of this study, is constituted by strongly disarticulated formations of small-scale interference struc-

GHISSETTI & GRASSO, 1998; GRASSO *et alii* 1998). Le strutture dominanti nell'area studiata sono rappresentate da sistemi di pieghe con direttrici assiali orientate N-S, NE-SW ed E-W e da piani di sovrascorrimento vergenti verso sud, orientati E-W, che presentano strutture plicative con vergenza opposta.

Il sensibile contrasto reologico tra le successioni argilloso-marrose della Formazione Licata e plio-pleistoceniche ed i termini evaporitici (Calcare di Base e Gessi) del Messiniano, determina una notevole differenziazione nello stile deformativi, che induce il collasso delle creste delle pieghe attraverso fenomeni di DGDS (Fig. 3) (GRASSO *et alii* 1998).

Il termine più antico affiorante nell'area considerata è rappresen-

tures, whose axes are oriented N-S (BUTLER & GRASSO, 1993; GHISSETTI & GRASSO, 1998; GRASSO *et alii*, 1998). The main structures of the study area are represented by fold systems with N-S, NE-SW and E-W axial orientations, and by south-verging thrust planes E-W oriented, locally showing disarticulate plicative structures with backthrust.

The strong rheological contrast between the clay and marl dominated successions of the Licata Formation and the Plio-Pleistocene succession from the Calcare di Base and Gypsum succession of the Messinian section results in a dramatically differing style of deformation, thereby causing the gravitational collapse of fold limbs with DGSD phenomena (Fig. 3) (GRASSO *et alii*, 1998).

The oldest unit exposed in the area under consideration is repre-

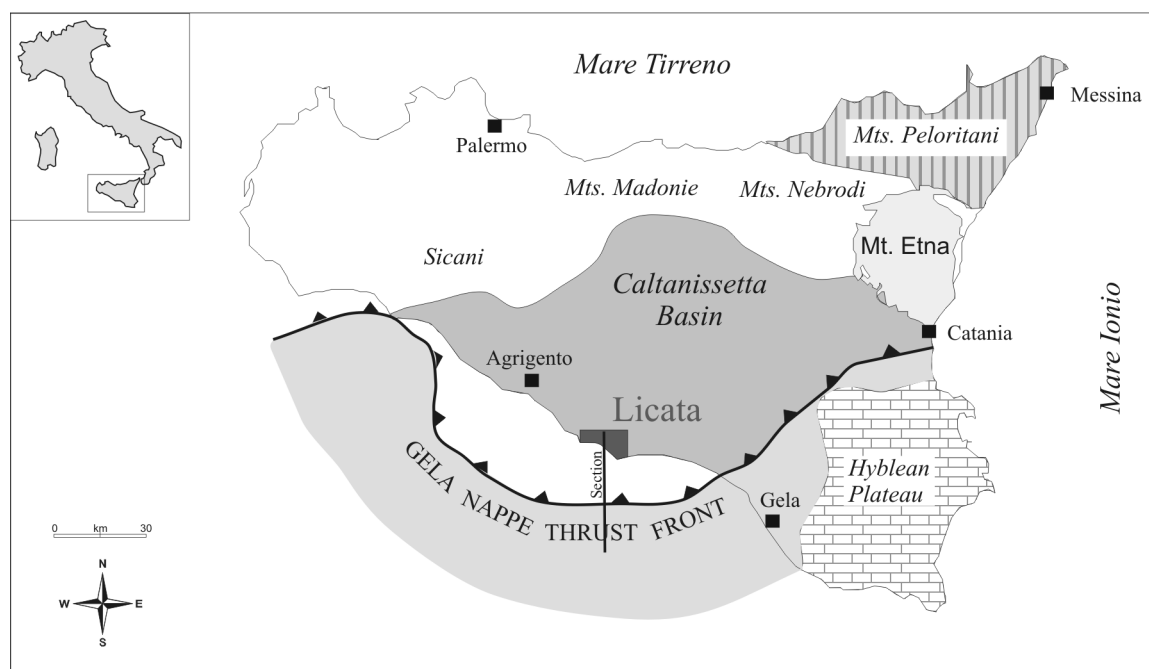


Fig. 1 - Inquadramento strutturale della Sicilia (modified from GRASSO *et alii*, 1998)
- Main structural features (modified from GRASSO *et alii*, 1998)

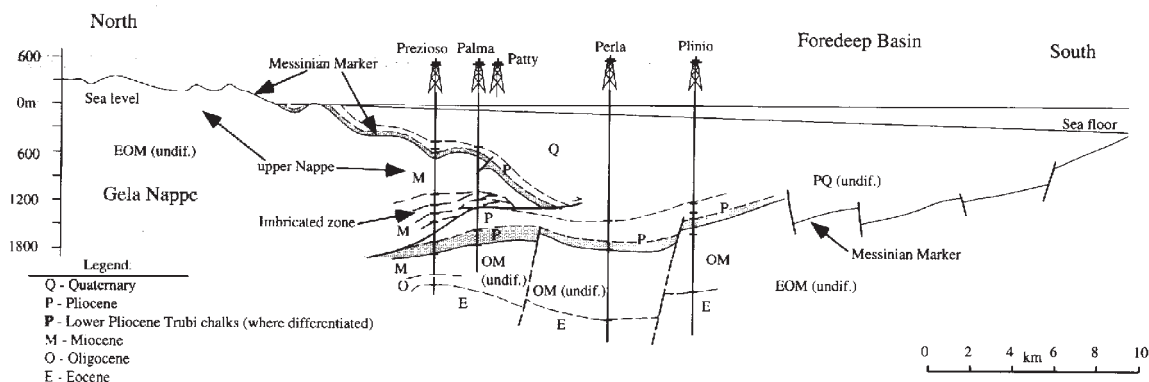


Fig. 2 - Sezione del cuneo frontale della Falda di Gela. Traccia della sezione in figura 1 (modified from GRASSO *et alii*, 1998)
- Cross section of the frontal part of the Gela Nappe. Line of section is shown in figure 1 (modified from GRASSO *et alii*, 1998)

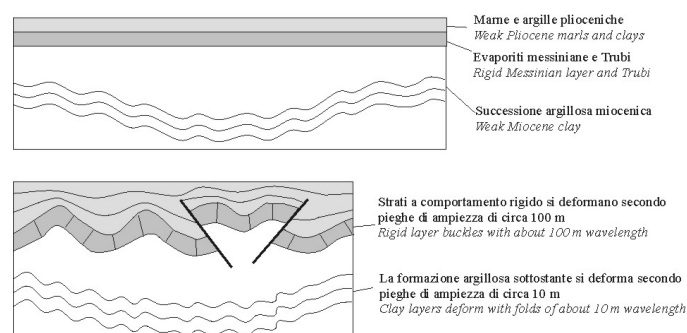


Fig. 3 - Evoluzione strutturale dell'area studiata (modificata da GRASSO *et alii*, 1998)
- Structural evolution of the study area (modified from GRASSO *et alii*, 1998)

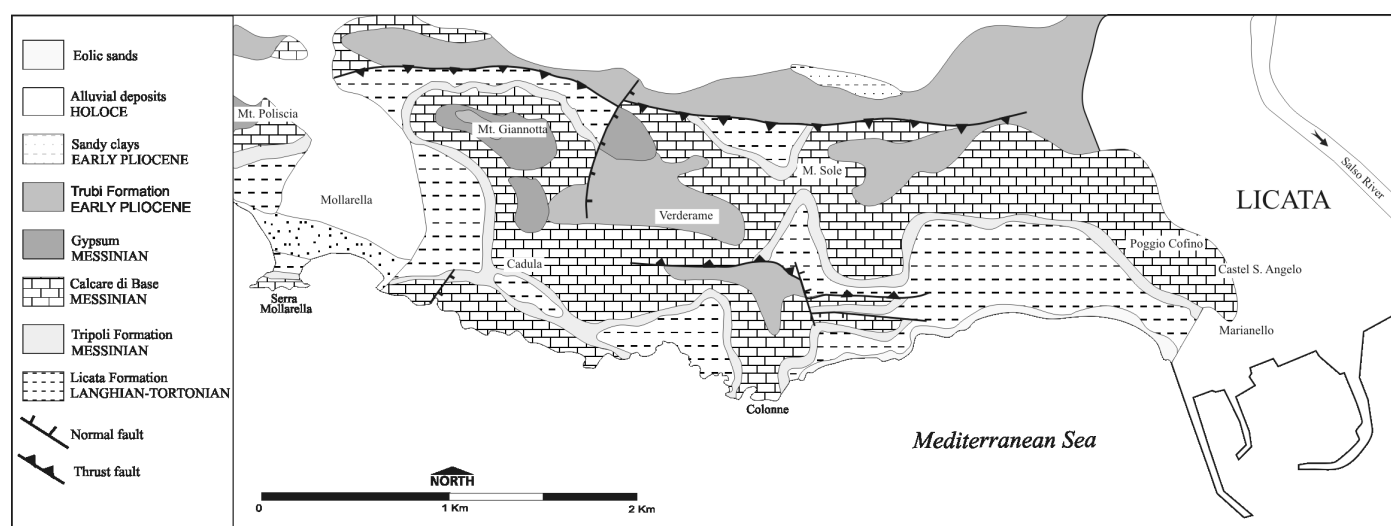


Fig. 4 - Schema geologico dell'area studiata (modificata da PAPPALARDO, 1999)
- Schematic geological map of the study area (modified from PAPPALARDO, 1999)

tato dalle argille e marne della Formazione Licata, di spessore sull'ordine di 400 m, tipiche di una sedimentazione di bacino profondo in area di avanfossa di età langhiano-tortoniana (Fig. 4) (GRASSO *et alii*, 1998).

Condizioni di bacino a circolazione ristretta hanno dato origine nel Messiniano alla deposizione di diatomiti bianche laminate con resti di pesci (Tripoli), affioranti con spessore massimo di 40 m.

Alla deposizione del Tripoli è seguita la successione delle evaporiti, costituite da Calcare di Base e Gessi. Il primo affiora estesamente in tutta l'area ed è presente con due facies principali, ossia un'alternanza di grossi banchi calcarei separati da sottili livelli pelitici, passanti lateralmente a calcari massicci e calcare brecciato e vacuolare con residui bituminosi. I Gessi sono costituiti da una successione di livelli laminati o da banchi con grossi cristalli selenitici, affioranti in località M. Giannotta e M. Poliscia, con spessore massimo di 60 m, indicativo di deposizione in zone depresse in cui si raccoglievano le salamoie a maggiore concentrazione (PAPPALARDO, 1999).

I depositi messiniani sono troncati dalla Formazione dei Trubi (Pliocene), rappresentati da calcari marnosi e marne calcaree che testimoniano condizioni di mare aperto. Nel Pliocene superiore i Trubi

sented by the clays and marls of the Licata Formation, a typical fore-deep succession of Langhian-Tortonian age, about 400 m thick (Fig. 4) (GRASSO *et alii*, 1998).

During the Messinian, basin conditions of restricted circulation led to the deposition of white laminated diatomites with fish remains (Tripoli Formation), outcropping with a maximum thickness of 40 m.

The deposition of the Tripoli Formation was followed by the evaporite succession, constituted by the "Calcare di Base" and gypsum deposits. The former is widely exposed in the whole area and is present in the form of an alternation of thick limestone beds, separated by thin pelitic layers; limestone beds laterally pass into massive limestones and brecciated-vacuolar limestone with residual bitumen. The gypsum consists of laminated levels and selenitic crystal banks (GRASSO *et alii*, 1998). The gypsum deposits are exposed at Mt. Giannotta and Mt. Poliscia, with a maximum thickness of 60 m, marking depressed areas where highly-concentrated brines precipitated (PAPPALARDO, 1999).

The Messinian deposits are truncated by the Trubi Formation (Pliocene), a sequence of deep marine calcareous marls and marly limestones. In the Pliocene the Trubi pass into grey-blue marls and

passano ad argille e marne grigio-blu, affioranti a nord dell'area.

Posteriormente alla deposizione dei Trubi, nel Pliocene inferiore-medio si è avuta una energica fase tettonica che ha prodotto strutture plicative con assi orientati NE-SW. A seguito dell'apertura del Bacino Tirrenico avvenuta dal Pliocene inferiore al Pleistocene inferiore, le argille affioranti al nucleo della sinclinale di Licata, subiscono una deformazione. Il sollevamento regionale avvenuto nel Plio-Pleistocene, ha prodotto un approfondimento dei Gessi posti alla base dei Trubi, che evolvono in una sequenza di marne grigio bluastre (BUTLER *et alii*, 1995).

Lungo la costa meridionale siciliana, vi sono poche evidenze di attività tettonica come terrazzi o superfici piane che indicano l'esistenza di variazioni del livello del mare, principalmente a causa della scarsa resistenza meccanica delle rocce che ha favorito l'erosione delle tracce di sollevamento (ANTONIOLI *et alii*, 2006). Ma, nell'area studiata sono presenti lungo il margine costiero terrazzi marini e superfici terrazzate, a testimonianza del sollevamento plio-pleistocenico (Fig. 5); questi sono stati distribuiti in sei ordini a quote comprese tra 2,5 e 120 m s.l.m. (Fig. 6). Attraverso l'interpolazione del DEM, utilizzando il modulo "terrain slope" di Surfer 8.0, è stata realizzata una carta delle pendenze in cui le superfici con pendenza compresa tra 0° e 6° poste a quote variabili sono state confrontate con la topografia dell'area in esame per riconoscere la corrispondenza esistente con lo schema semplificato dei terrazzi (Fig. 8). Queste superfici piane rappresentano le evidenze geomorfologiche di terrazzi e superfici di erosione che denotano condizioni di stabilità del livello di base. I terrazzi più estesi si rinvengono alla sommità delle colline più elevate nelle località Verderame e Corvaia; per la loro posizione possono essere attribuite al GTS (Grande Terrazzo Superiore), definito da RUGGERI & UNTI (1974). La correlazione morfologica con aree siciliane simili, (DI MAGGIO *et alii*, 1999; BONOMO *et alii*, 1996 COSENTINO & GLIOZZI, 1988) ha consentito di attribuire la formazione dei diversi ordini di terrazzi ad un intervallo tra il Pleistocene (primo ordine) ed al Tirreniano (sesto ordine) (VAN COVERING, 1997). In alcuni casi il margine interno dei terrazzi coincide con il piede di paleofalesie costituite da calcari con evidenti solchi di battente (località Castel S. Angelo, Colonne e Serra Mollarella). Localmente si rinvengono anche depositi di ghiaie e conglomerati in matrice sabbiosa, che raggiungono complessivamente uno spessore massimo di 2 m in località Colonne (Fig. 7) (PAPPALARDO, 1999).

I fenomeni DGSD osservati interessano l'intero versante con evidenze morfologiche quali, doppie creste, trench, rigonfiamenti e contropendenze. Tra queste, i trench, il cui sviluppo è parallelo o trasversale all'asse delle strutture (Fig. 9), hanno dimensioni variabili e spesso presentano materiale detritico al fondo (Fig. 10). Questi elementi morfologici costituiscono gli effetti superficiali delle fasi di "creeping" e/o "creep rupture", che si esplicano con continuità nel tempo ed il cui stadio evolutivo finale è rappresentato da fenomeni di collasso che avvengono secondo i meccanismi dei movimenti franosi. Frane di vario tipo, quali crolli, scorrimenti rotazionali e colate

clays, outcropping in the north of the study area. In the Lower-Middle Pliocene, a new tectonic phase produced folds with NE-SW oriented axes.

In the lower Pliocene and the Lower Pleistocene, as a consequence of the Tyrrhenian basin opening, the early Pleistocene clays exposed in the core of the Licata syncline were involved in a deformation. Regional uplift during the Plio-Pleistocene produced a general shallowing up-ward succession from the basal chalks of the Trubi Formation through a sequence of blue-grey marls (BUTLER *et alii*, 1995).

In Southern Sicily, mainly due to the poor resistance of the rock led to the uplifted mass erosion (ANTONIOLI *et alii*, 2006), there is scarce evidence of tectonic activity such as terraces or planar surfaces marking variation of the sea level. However, marine terraces and terraced surfaces have been recognized in the studied coastal zone, testifying the occurred uplift from Plio-Pleistocene to present (Fig. 5) (PAPPALARDO, 1999). These have been informally distinguished into six orders distributed at elevations varying between 2.5 to 120 a.s.l. (Fig. 6). In some cases the internal margin coincides with the foot of paleocliffs constituted by limestones with evident wave-cut platforms (localities Castel S. Angelo, Colonne, Serra Mollarella) (Fig. 8). Locally there are also deposits of gravels and conglomerates in a sandy matrix with a maximum thickness of 2 meters (Fig. 7) (Colonne area). Planar surfaces with a slope varying from 0° to 6° located at different elevations, obtained by means of the *terrain slope* module of Surfer 8.0, have been matched with the topography of the area to identify the correspondence with the proposed simplified scheme of the terrace (Fig. 8). These planar surfaces are geomorphic features of the terraces and paleosurfaces marking the sea level stability. The widest terraces outcrop at the top of the hill at the highest elevations (120m) in the Verderame and Corvaia areas, that according to their position, can be ascribed to the GST (Great Superior Terrace, Ruggeri G. and Unti M., 1974). A geomorphological correlation for similar sicilian areas (DI MAGGIO *et alii*, 1999; BONOMO *et alii*, 1996 COSENTINO & GLIOZZI, 1988) permit to ascribe the different orders of terrace generation to a time interval extending from the Pleistocene (first order terrace) to the Tyrrhenian (VI order terrace) (VAN COVERING, 1997).

The DGSD affects the whole slope from the crest to the base, with morphological evidence such as double crests, trenches, bulging of valley floors, uphill-facing scarps and rotated limestone blocks. Among these features, graben shaped trenches are particularly evident, being developed parallel or transversal to the axes of the tectonic structures (Fig. 9). They are of variable dimensions and are often covered by detritic material (Fig. 10). These morphological elements constitute the superficial effects of creeping and/or creep rupture, they evolve through a continuous activity in time, and their final evolutionary stage is represented by collapse phenomena that occur according to the landslide mechanisms. Various types of shallow landslides, such as falls, slumps and flows (Fig. 5) are associated

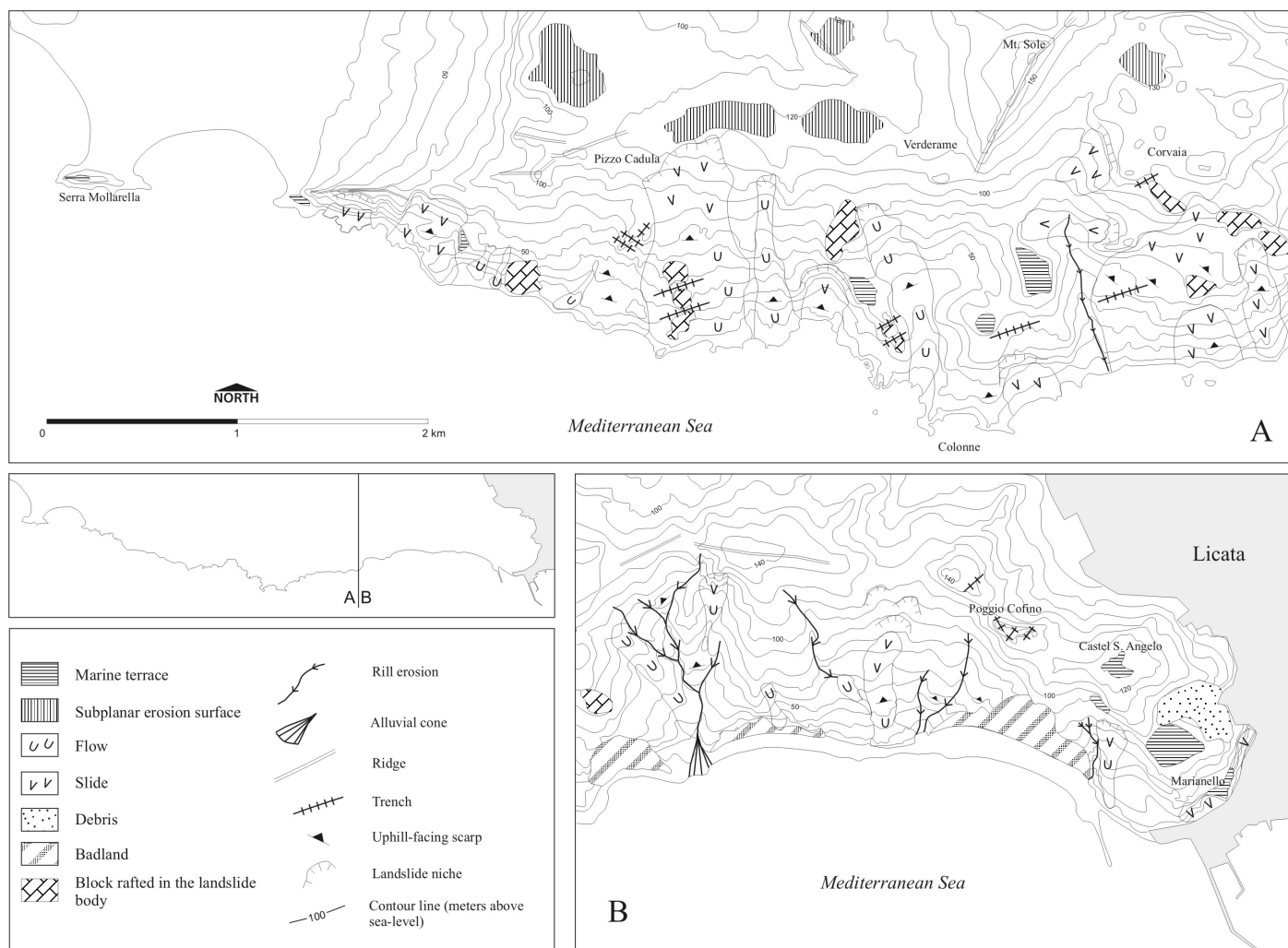


Fig. 5 - Schema geomorfologico dell'area studiata
- Geomorphological map of the study area

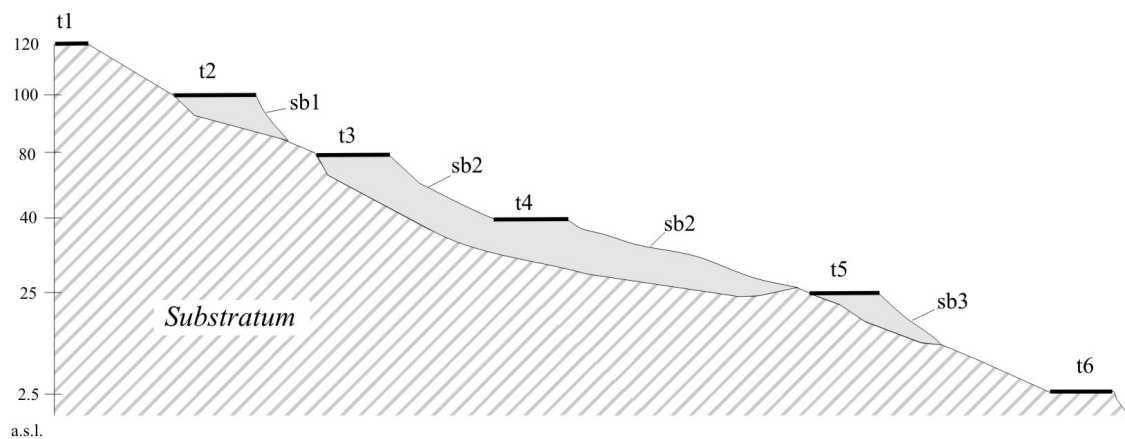


Fig. 6 - Successione dei terrazzi rilevati nell'area (t, terrazzo; sb, corpo sedimentario)
- Succession of coastal terraces (t, terrace; sb, sedimentary body)

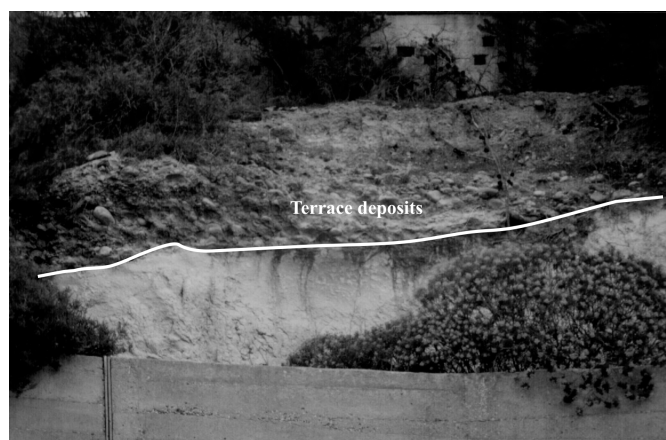


Fig. 7 - Deposito di un terrazzo in località Colonne: ghiaie e conglomerati in matrice sabbiosa
- Terrace deposit at Colonne: gravels and conglomerates in a sandy matrix

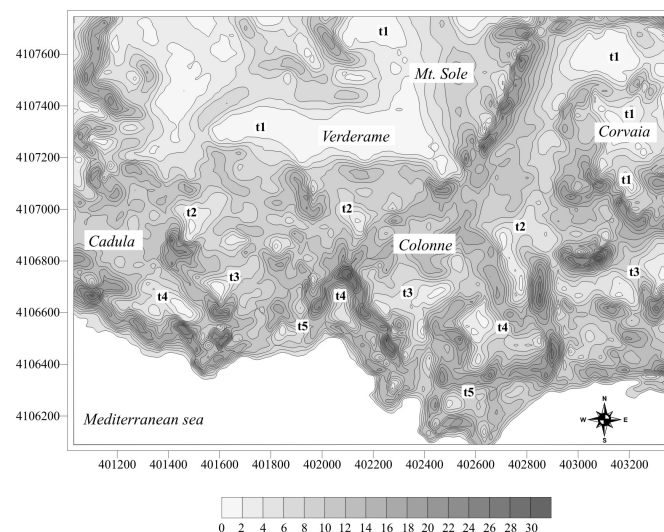


Fig. 8 - Carta delle pendenze del settore centrale dell'area studiata (t1 – t5 ordini dei terrazzi di figura 6)
- Terrain slope map of the central part of the study area (t1 – t5 indicate terrace order in figure 6)

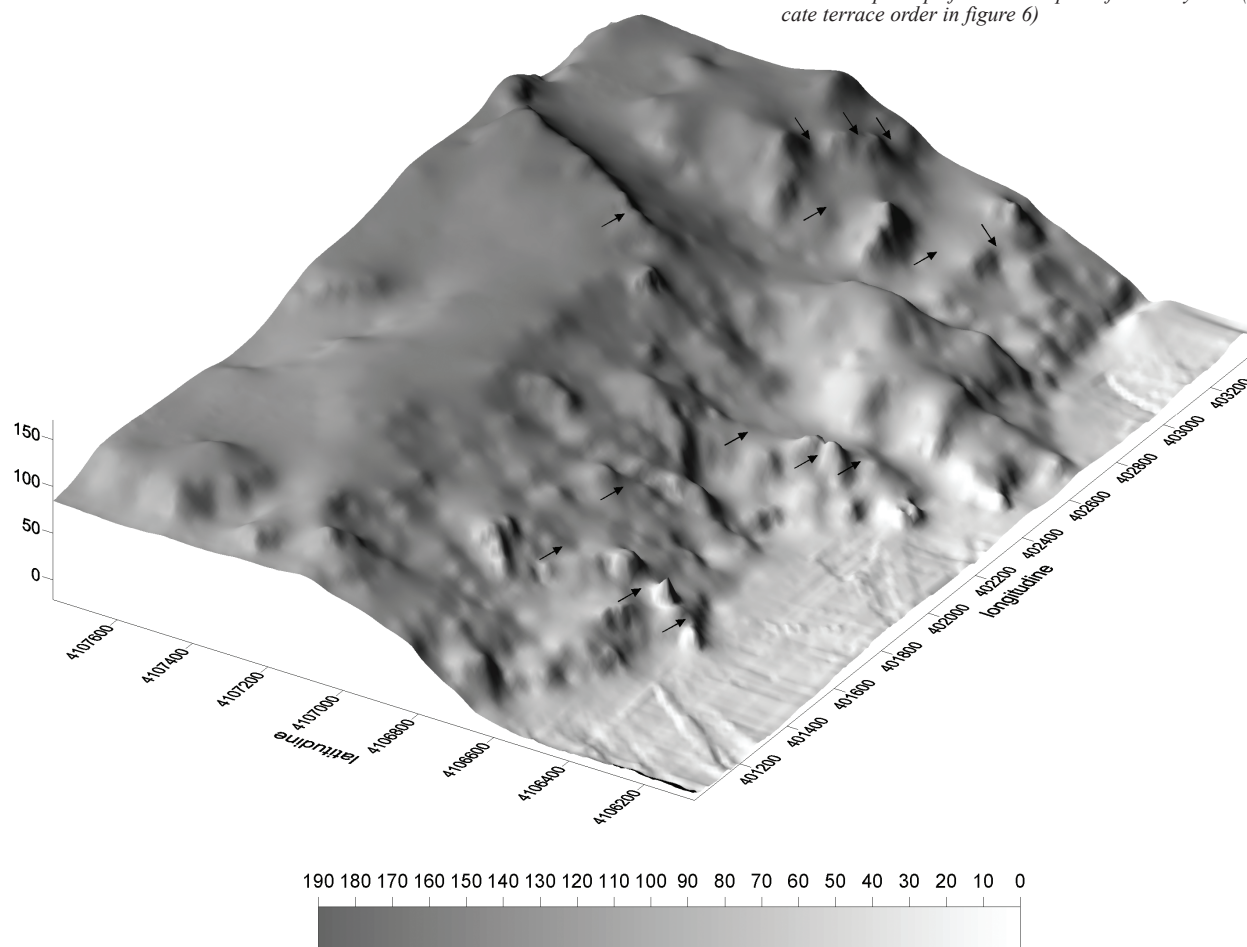


Fig. 9 - Digital Elevation Model (DEM) del settore centrale dell'area studiata; le frecce indicano i trench (H/L 3:1)
- Digital Elevation Model (DEM) of the central part of the study area; arrows indicate trenches (H/L 3:1)



Fig. 10 - Trench in località Corvaia
- Trench at locality Corvaia

(Fig. 5), si associano infatti allo spreading, con chiare relazioni di causa/effetto con i movimenti profondi.

FENOMENI DI LATERAL SPREADS

L'insacco dei fenomeni di "lateral spread" può ritenersi successivo all'ultimo sollevamento dell'area, risalente al tardo Pleistocene, come dimostra la disarticolazione dei termini carbonatici in cui sono incisi solchi di battigia. Il fenomeno ha avuto riattivazioni anche in tempi recenti, come dimostrano tagli freschi lungo le pareti dei trench prossimi alla costa e lesioni sulle strade a monte. Evidenze di questi fenomeni sono anche costituite dalla presenza di numerosi blocchi calcarei, anche di volume considerevole, disseminati lungo l'intero versante. Alcuni di questi, traslati fino in mare, emergono dall'acqua determinando un paesaggio suggestivo ed una morfologia del fondale antistante la costa fino all'isobata -10.

Nella dorsale di Verderame si ha l'esempio più evidente di DGSD dell'intera area studiata. Il fenomeno si sviluppa a partire dal crinale (120 m) fino in mare. Si osservano trench paralleli ai principali assi delle pieghe con andamento E-W e controtendenze con blocchi calcarei di notevoli dimensioni variamente dislocati e ruotati. Gli effetti del movimento dei blocchi trascinati dal corpo di frana, sono chiaramente visibili lungo le strutture viarie e sugli edifici.

Un altro esempio di DGSD si individua lungo la dorsale M. Sole-Colonne (Fig. 5), lungo una fascia estesa da 170 m e -10 m. I termini litologici interessati sono principalmente il Calcare di Base ed in minima parte Tripoli e Trubi.

Strutturalmente l'area è compresa tra due thrust a vergenza opposta, che hanno creato un dislivello topografico di circa 50 m.

Trench variamente orientati rispetto al versante si riconoscono lungo una fascia estesa circa 20 m, con maggiore frequenza nella zona mediana e terminale e con dimensioni maggiori sia in lunghezza sia in larghezza.

I fenomeni di lateral spread presenti nella parte sommitale sembrano meno attivi di quelli della porzione meridionale, dove la presenza di scarpate secondarie, di contropendenze e di una serie di

with the spreading phenomena, their distribution clearly depending on the cause-effect relationship with the deep movements.

LATERAL SPREAD DESCRIPTION

The gravitational processes affecting the slope consist of *lateral spreads* with associated falls and rotational slides that develop into flows (Fig. 5). Calcareous blocks are scattered on the slope; they originated higher up slope from where they detached and rotated. Some large blocks that descended as far as the sea emerge from the water creating a suggestive scenery; the sea floor morphology down to a depth of 10 m is conditioned by blocks that have been transported from up hill. Trenches of various dimensions and of up to three orders can be distinguished; they are oriented both parallel and perpendicular to the movement direction, and are filled with detritic material. The rotated and dislocated blocks sink partially into the clays causing their squeezing out. These processes were probably initiated after the most recent (late Pleistocene) uplift of the area, as is demonstrated by the disarticulation of the original wave-cut platform that is present in the limestone, and are still active as demonstrated by fresh cuts in the walls of the trench located close to the coast and by cracks in roads.

Verderame ridge shows the most evident example of DGSD in the entire study area. The phenomenon extends from its crest (120 m) down to a bathymetric elevation of -10 m (Fig. 6). The slope is marked by trenches parallel to the main E-W oriented fold axes, and by uphill-facing scarps produced by dislocation and rotation of large limestone blocks. The movement effects, which took place in the form of blocks rafted with the landslide body, are clearly visible in the damage to infrastructures and buildings.

Another example of DGSD occurs along the ridge between Mt. Sole and Colonne (Fig. 5). The deformation affects an area located between 170 and -10 m, where the Calcare di Base, Tripoli and Trubi crop out.

Structurally, the area lies between a thrust and backthrust that created a difference in altitude of about 50 m.

Trenches of varying orientation with respect to the slope and with

trench è più evidente.

In località Cadula nella parte occidentale dell'area, il fenomeno di spreading è particolarmente evidente per il caratteristico rigonfiamento delle argille e l'inarcamento del soprastante Calcare di Base (Fig. 11 e 12).



Fig. 11 - Panorama del lateral spread di località Cadula
- Panoramic view of the Cadula lateral-spread

Lo scivolamento delle unità fragili poggianti sul substrato plastico è facilitato da deformazioni localizzate alla sommità ed al piede del versante dove la pressione confinante è minima. Si osservano trench che interessano anche i terrazzi marini presenti a quota 40, postdatando il movimento, presumibilmente al Pleistocene medio. Secondo alcuni autori (RADBRUCH-HALL *et alii*, 1976) è possibile che le rocce si deformino per progressiva dilatazione gravitativa con conseguente incremento del volume di roccia e rigonfiamento del piede del versante. Questi affermano che, il fenomeno è la conseguenza di un rapido sollevamento dell'area e di erosione al piede del versante, che nel caso specifico è prodotto dalla combinazione dell'innalzamento tettonico con la variazione del livello eustatico.

DISCUSSIONE

L'area studiata presenta condizioni favorevoli per il verificarsi di deformazioni gravitative profonde, determinate sia dal recente sollevamento, a partire dal Pliocene superiore, che ha creato un forte stress topografico, sia dalla sovrapposizione di terreni a comportamento rigido su terreni a comportamento plastico. Tali deformazioni sono riferibili a lateral spread orientati trasversalmente alla direzione di sovrascorrimento delle unità litologiche, mentre le frequenti trincee parallele all'asse della piega principale sono interpretabili come effetto di deformazioni gravitative profonde favorite dalle discontinuità tettoniche.

Le frane osservate sono strettamente legate alle DGSD, come testimonia la presenza di movimenti di massa recenti e antichi in settori ancora attivi. Questi movimenti iniziano come scorrimenti, crolli in corrispondenza degli affioramenti calcarei, evolvendo successivamente in colate a causa della plasticizzazione dei terreni argilloso-mar-

maximum lengths of about 20 m can be recognized in the medial and terminal portions of the slope.

Lateral spreads appear less active in the highest part of the slope than in its lower portion, where the secondary scarps, uphill-facing scarp and the intersection of trenches is more evident.



Fig. 12 - Particolare del rigonfiamento al piede del lateral spread di località Cadula
- Bulging of Calcare di Base at the foot of the lateral spread at Cadula

Spreading in the Cadula area affects the western part of the site, and is visible in the bulging of the clays and the bending of the overlying Calcare di Base (Fig. 11 e 12).

The sliding of the stiff units on top of the plastic substratum is facilitated by deformations at the summit and in the basal areas of the slope where the confining pressure is minimal. The marine terraces (40 m a.s.l.) are dissected by trenches that presumably formed in the Middle Pleistocene. According to some authors (RADBRUCH-HALL *et alii*, 1976) it is possible that the rock deforms in a dilating manner, gravity induced, producing a volume increase of the rock accompanied by bulging on the lower slope. These authors state that this is a consequence of the rapid uplift of the area and of erosion at the base of the slope, which in this case can be related to the combination of tectonic uplift with eustatic sea-level changes.

DISCUSSION

The study area is characterized by conditions that favour the occurrence of deep-seated gravitational deformations. The principal causes are the recent uplift of the area initiated in the Late Pliocene which generated a high topographic stress, the overlapping of units with brittle behaviour over units with viscous behaviour, and the local eustatic variations. Such deformations are due to lateral spreads that develop transversally to the direction of overthrusting. The frequent trench that are parallel to the axis of the main fold can be interpreted as effects of deep-seated gravitational deformations favoured by tectonic discontinuities.

The observed superficial landslides are closely related to the DGSD, as testified by the presence of recent and ancient landslides, whose predominant kinematics are expressed in slides or falls in the limestones evolving into flows as a result of the fluidization of the clays and marls of the substratum. The rock overload transfers com-

nosi del substrato. A ciò concorre il sovraccarico dei terreni lapidei, che determinano compressione sui sottostanti terreni argillosi, con forte aumento delle pressioni neutre e conseguente rottura per taglio.

Sulla base degli elementi geologici e delle evidenze morfologiche si è riscontrato che nella fase di sollevamento dell'area, iniziata nel Pliocene superiore e protrattasi per tutto il Pleistocene, le formazioni presenti hanno subito un forte stress che ha prodotto fratturazione e disarticolazione dei termini carbonatici rigidi e piegamenti accentuati nelle formazioni plastiche. Il precario equilibrio raggiunto lungo i versanti a seguito di movimenti franosi è destabilizzato dalla azione del mare che produce lo scalzamento al piede, la riattivazione delle frane e la formazione di nuovi trench e contropendenze. La persistenza di tali condizioni, a cui si aggiungono fattori antropici, lasciano prevedere il progressivo arretramento del crinale del versante con conseguente riattivazione dei precedenti corpi di frana. Le superfici di rottura presenti alla sommità del versante sono in accordo con il modello proposto da SAVAGE & VARNES (1987) per le soluzioni plastiche di flusso in regioni soggette a sollevamento veloce (Fig. 13).

pressiono onto the underlying clays, leading to a significant increase of pore pressure with consequent rupture. Geological and morphological studies have showed that since the upper Pliocene to the Pleistocene widespread uplift occurred in connection with the external thrust front of the Apenninic-Maghrebian Chain formation. This activity leads to the high relief energy, the fracturing and disarticulation of the carbonatic rocks and intense folding in plastic rock. The poor equilibrium along the slopes affected by landsliding, is continuously destabilized by marine erosion. As trenches, uphill-facing scarps and the consequent development of slides and flows demonstrate, wave erosion acts at the foot of the slope, causing instability conditions that propagate towards the rest of the slope. These conditions persistence, in addition to tectonic settlement and anthropic activity, suggest the backthrust of the phenomena towards the ridge and the remobilization of previous landslide bodies. The rupture surfaces outcropping in the highest part of the slope agree with the features of plastic flow solution for failed regions affected by gravity loading as proposed by SAVAGE & VARNES (1987) (Fig. 13).

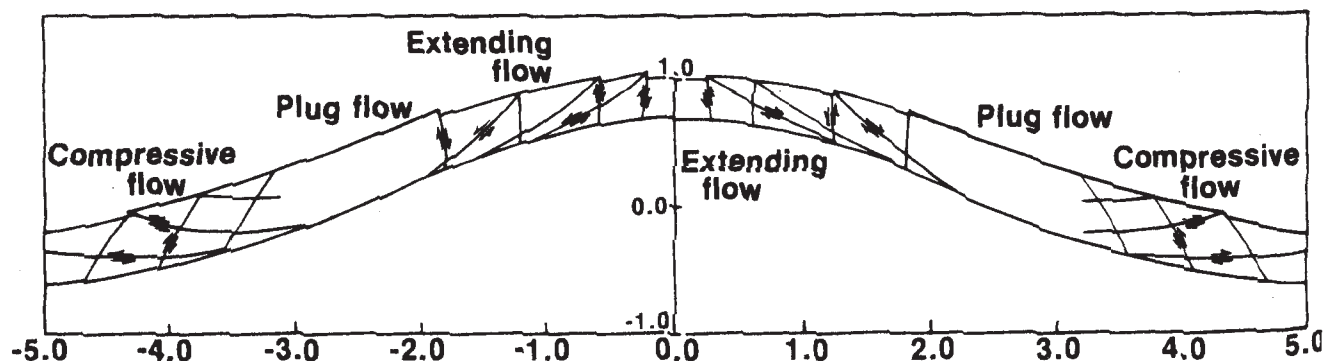


Fig. 13 - Superfici di rottura proposte dal modello per soluzioni plastiche di flusso (da SAVAGE & VARNES, 1987)
- Rupture surfaces proposed in the plastic flow solution (from SAVAGE & VARNES, 1987)

CONCLUSIONE

Lo sviluppo di DGSD nell'area studiata va inquadrato nel contesto geologico del settore esterno della catena Appenninico-Maghrebide, caratterizzato da un particolare assetto litostrutturale con sovrapposizione di unità litotecniche a comportamento fragile su unità a comportamento duttile.

Dallo studio morfostrutturale è emerso che il sollevamento di questo settore è stato continuo e rapido a partire dal Pliocene superiore, con un'accelerazione nel Pleistocene medio-superiore, periodo in cui si ha il collocamento attuale del fronte più avanzato della Falda di Gela. Ciò risulta dalla presenza di terrazzi e superfici di erosione di vario ordine distribuite lungo il versante, dal crinale fino a pochi metri sul livello del mare, e da paleofrane su cui si sono sviluppati terrazzi costieri.

Dall'analisi morfologica sono emersi importanti elementi per il riconoscimento di fenomeni collegati a DGSD, quali doppie creste, contropendenze e soprattutto trench. Questi ultimi sono numerosi e si sviluppano in tutto il versante con andamento parallelo alla linea di costa e agli assi delle principali strutture tettoniche. Le deformazioni

CONCLUSION

The occurrence of DGSD in the study area has to be seen in the geological framework of the external sector of the Apenninic-Maghrebian chain, which is characterized by particular lithostructural properties: the association of brittle with ductile units.

This morphostructural study highlights that the uplift of this sector has been continuous and rapid from the Upper Pliocene onward, with an acceleration in the Middle to Upper Pleistocene, during which the present position of the most advanced front of the Gela Nappe was reached. This can be inferred from the presence of various orders of terraces and erosional surfaces along the coastal slope from the crest to a few meters above the sea level, and from ancient landslides on which marine terraces have formed.

The deformational component of the DGSD is perpendicular to the direction of sliding; thus an important role has to be attributed to the elevated relief originating from the Plio-Pleistocene tectonic uplift that has favoured the morphological evolution. Deformational processes tend to evolve over long periods, for which it can be

DGSD osservate sono attribuibili a fenomeni di lateral spread, spesso associati a movimenti franosi, quali scorrimenti, colate e crolli; queste si sono verificate nel tempo, come dimostrano le paleofrane presenti nel settore orientale.

La componente deformativa delle DGSD è normale alla direzione di sovrascorrimento, pertanto un ruolo importante è da imputare all'elevata energia di rilievo originata dal sollevamento tettonico plio-pleistocenico, che ha condizionato l'evoluzione morfologica dell'area. I fenomeni di DGSD tendono ad evolvere, per cui è ipotizzabile che in un futuro anche prossimo si sviluppino frane di grandi dimensioni lungo il versante analizzato. Ciò è incentivato dall'impatto antropico connesso alla crescente urbanizzazione negli ultimi dieci anni dell'area con conseguente attività di scavo concentrata lungo i versanti e sviluppo dell'edilizia che modifica le condizioni di equilibrio naturale dei versanti.

Le considerazioni fin qui esposte impongono un approfondimento delle conoscenze sugli aspetti cinematici dei fenomeni osservati mediante dati di sottosuolo e monitoraggio, soprattutto nel settore orientale dell'area dove sono presenti numerosi edifici e importanti vie di comunicazione. L'incidenza dei fenomeni sull'edificato e sulle infrastrutture presenti è già evidente, poiché dopo pochi anni dalla loro realizzazione essi mostrano lesioni che spesso impongono il loro abbandono. Considerato che l'economia della zona, attualmente di tipo essenzialmente agricolo, tende allo sviluppo turistico, l'identificazione ed il controllo di tali fenomeni in ambito territoriale esteso risulta essenziale al fine di consentire un'adeguata pianificazione nel quadro di uno sviluppo sostenibile. I parametri geometrici e cinematici delle rocce sono fondamentali per la definizione degli scenari di vulnerabilità e la localizzazione delle aree a rischio. Il loro monitoraggio (delle aree a rischio) è possibile attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di immagini satellitari (SAR) e di DEM validati da campagne GPS.

RINGRANZIAMENTI

Lavoro eseguito con Fondi M.U.R.S.T. 60%, responsabile Prof. V. Ferrara. Un caloroso grazie all'Ufficio Tecnico del Comune di Licata, in particolare al Geom. Angelo Cambiano per la consultazione di documenti inediti.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AGNESI V., MACALUSO T., MONTELEONE S. & PIPITONE G. (1978) – *Espansioni laterali (lateral spread) nella Sicilia occidentale*. Geol. Appl. Idrogeol., **13**, 319-326.
- AGNESI V., MACALUSO T., MONTELEONE S. & PIPITONE G. (1984) – *Fenomeni di deformazione gravitativa profonda (deep-seated gravitational slope deformations) osservati nella Sicilia occidentale*. Bollettino Società Geologica Italiana, **103**: 671-679.
- AGNESI V. (1994) – *Deep-seated gravitational slope deformations in Sicily*. In: Deep-seated gravitational slope deformations and large-scale landslides in Italy Ed. Crescenti U., Dramis F., Prestininzi A., Sorriso-Valvo M., Special volume for the Int. Congr. IAEG, Lisboa, 66-69.
- AGNESI V., DI MAGGIO C. & MACALUSO T. (1995) – *Deformazioni gravitative profonde e superficiali nella penisola di Capo San Vito (Sicilia occidentale)*. Mem. Soc. Geol. It., **50**: 11-21.
- AGNESI V., DI MAGGIO C. & MACALUSO T. (1997) – *Morphostructural setting and geomorphological evolution in the Madonna Mountains (northern Sicily, Italy)*. Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **3**: 43-44.
- AGNESI V., DI MAGGIO C., MACALUSO T. & ROTIGLIANO E. (2000) – *Genesis and Evolution of Deep Seated Gravitational Slope Deformation Phenomena in Western and Central Sicily*. Memorie Società Geologica Italiana, **55**: 363-371.
- AMPFERER O. (1939) – *Über einige Formen der Bergzerreissung*. Akad. Wiss. Wien, **148**: 1-14.

assumed that in a not too distant future landslides could well occur again along the studied slope. This hazard is amplified by anthropic impact connected to the increased urbanization of the last ten years, the slope cutting and the buildings construction modified the slopes natural equilibrium conditions.

From these considerations it is clear that further in-depth studies are needed to improve the knowledge of the morphological factors and kinematics of the deformational processes by means of subsurface data, as well as by control and monitoring, especially in the eastern sector of the area where numerous buildings and communication networks are present. Such phenomena have already affected the existing infrastructure, which a few years after their construction show damage that often lead to their abandonment. Given the fact that the present-day economy of the area is mainly based on agriculture but aims at tourist development, identification and control of slope instability in a wide territorial environment is of paramount interest for adequate land planning in a framework of sustainable development. Geometrical and kinematic parameters of the rocks are crucial for definition of vulnerability scenarios and the localization of risk areas and their monitoring is possible through acquisition and processing of satellite images (SAR), and the use of DEMs validated from GPS surveys.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was granted by M.U.R.S.T. 60% project, responsible Prof. V. Ferrara. We thank warmly Angelo Cambiano from Ufficio Tecnico of Comune di Licata for kindly providing unpublished documents.

- ANTONIOLI F., KERSHAW S., RENDA P., RUST D., BELLUOMINI G., CERASOLI M., RADTKE U. & SILENZI S. (2006) – *Elevation of the last interglacial highstand in Sicily Italy: A benchmark of coastal tectonics*. Quaternary International **145-146**: 3-18.
- BISCI C., BURATTINI F., DRAMIS F., LEOPERDI S., PONTONI F. & PONTONI F. (1996) – *The Sant'Agata Feltria landslide (Marche Region, central Italy): a case of recurrent earthflow evolving from a deep-seated gravitational slope deformation*. Geomorphology, **15**: 351-361.
- BONOMO R., CALI' M., D'ANGELO U., RIBAUDO R. & VERNUCCIO S. (1996) – *I terrazzi del Plistocene medio e superiore della fascia costiera tra Trapani e Marsala*. Il Naturalista Siciliano, **20** (1-2): 3-20.
- BUTLER R., GRASSO M. & LA MANNA F. (1992) – *Origin and deformation of the Neogene Recent Maghrebian foredeep at the Gela Nappe, SE Sicily* - Jour. Soc. London **149**: 547-556.
- BUTLER R. & GRASSO M. (1993) - *Tectonic control on base level variations and depositional sequences within thrust-tap and foredeep basins: example from the Neogene thrust belt of central Sicily* - Basin Research **5**: 137-151
- BUTLER R., GRASSO M. & LICKORISH W.H. (1995) – *Plio-Quaternary megasequence geometry and its tectonic controls within the Maghrebian thrust belt of south-central Sicily*. Terra Nova, **7**: 171-178.
- COSENTINO, D. & GLIOZZI, E. (1988) – *Considerazioni sulle velocità di sollevamento di depositi eutirreniani dell'Italia Meridionale e della Sicilia*. Memorie Società Geologica **41**: 653-665.
- DAL PIAZ (1936) – *Su alcuni casi di scoscendimento ad uncino osservati in Valle Aurina ed in Val di Vizze*. St. Trident, di Sc. Nat., **17**: 3-18.
- DECIMA A. & WEZEL F.C. (1971) – *Osservazioni sulle evaporiti messiniane della Sicilia centro-meridionale*. Riv. Min. Sic., **130-132**: 172-187.
- DI MAGGIO, INCANDELA A., MASINI F., PETRUSO D., RENDA P., SIMONELLI C. & BOSCHIAN G. (1999) – *Oscillazioni eustatiche, biocronologia e depositi continentali quaternari e neotettonica nella Sicilia nord-occidentale (Penisola di S. Vito lo Capo - Trapani)*. Il Quaternario, **12**: 25-50
- DRAMIS F. & SORRISO-VALVO M. (1983) – *Two cases of earthquake-triggered gravitational spreading in Algeria and Italy*. Rendiconti Società Geologica Italiana, **6**: 7-10.
- DRAMIS F., GENTILI B. & PAMBIANCHI G. (1987) - *Deformazioni gravitative profonde nell'area di Monte Gorzano (Monti della Laga, Appennino Centrale)*. Boll. Soc. Geol. It., **106**: 265-271.
- DRAMIS F., MAIFREDI P. & SORRISO-VALVO M. (1985) – *Deformazioni gravitative profonde di versante. Aspetti geomorfologici e loro diffusione in Italia*. Geol. Appl. Idrogeol. Vol. **XX**, **II**: 377-390.
- DRAMIS F. & SORRISO-VALVO M. (1994) – *Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides, and tectonics*. Eng. Geol., **38** (3/4): 231-243.
- FORCELLA F. (1983) – *Un eccezionale esempio di tettonica gravitativa di versante: il Sackung sviluppato tra il M. Padrio ed il M. Varadega, Alpi Centrali, Italia*. Riv. Mus. Sc. Nat. Bergamo, **5**.
- FORCELLA F. & ROSSI P.M. (1987) - *Le deformazioni di versante presenti nel territorio di Fuipiano Imagna (Prealpi Bergamasche)*. Boll. Soc. Geol. It., **106**: 281-291.
- GENEVOIS R. & PRESTININZI A. (1979) – *Time-dependent behaviour of granitic rocks related to their alteration grade*. Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., Montreux, 153-159.
- GENEVOIS R., PRESTININZI A. & VALENTINI G. (1987) - *Sulla presenza di deformazioni gravitative profonde nella parte centrale del bacino Plio-Pleistocenico lucano*. - Boll. Soc. Geol. It., **106**: 225-230.
- GHISETTI F. & GRASSO M. (1998) – *Analisi delle strutture plicative ed evoluzione strutturale plio-pleistocenica del fronte della Falda di Gela in Sicilia centro-meridionale*. Atti 79° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana, Settembre 21-23, Palermo.
- GRASSO M., LENTINI F., TORELLI L., TORTORICI L. (1990) - *Principali domini strutturali originatisi dalla collisione Neogenico-Quaternaria nel Mediterraneo centrale* - Memorie Società Geologica Italiana, **45**: 453-462, 1f., 2 tavv.
- GRASSO M. & LA MANNA F. (1990) - *Lineamenti stratigrafici e strutturali del fronte della Falda di Gela affiorante a NW del Plateau Ibleo (Sicilia Sud-Orientale)* - Geol. Romana **29**: 55-72
- GRASSO M., LICKORISH W.H., MANISCALCO R., DILIBERTO E., GEREMIA F., MAUGERI S., RAPISARDA F., AND PAPPALARDO G. (1998) - *Geological Map of The Licata Fold Belt (South Central Sicily): Explanatory notes* - Annales Tectonicae **XII**, 51-58 pp.
- GUERRICCHIO A., MELIDORO G. (1973) - *Segni premonitori e collassi delle grandi frane nelle metamorfite della valle della Fiumara Buonamico (Aspromonte, Calabria)*. Geol. Appl. Idrogeol., **8**: 315-436.
- JAHN A. (1964) – *Slope morphological features resulting from gravitation*. Z. Geomorph., **5**: 59-72.
- LICKORISH W.H., GRASSO M., BUTLER R.W.H., ARGNANI A. & MANISCALCO R. (1999) – *Structural styles and regional tectonic setting of the "Gela Nappe" and frontal part of the Maghrebian thrust belt in Sicily*. Tectonics, **18** (4): 655-668.
- MALGOT J. (1977) – *Deep-seated gravitational slope deformations in neovolcanic mountain ranges of Slovakia*. IAEG Bull., **16**: 106-109.
- NEMCOK A., PASEK J. & RYBAR J. (1972) – *Classification of landslides and other mass movements*. Rock Mechanics, **4**: 71-78.
- OGNIBEN L. (1957) – *Petrografia della Serie Solfifera siciliana e considerazioni geologiche relative*. – Memoria Descrittiva Carta Geologica d'Italia, **33**: 100.
- OGNIBEN L. (1969) – *Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano*. Memorie Società Geologica Italiana, **8**: 453-763.
- PAPPALARDO G. (1999) – *Studio dei movimenti di versante nei settori interni ed esterni della catena Appenninico-Maghrebide*. PhD Theses, University of Catania, 114 pp.

**LATERAL SPREAD EVOLVING FROM A DEEP-SEATED GRAVITATIONAL SLOPE DEFORMATIONS TO THE FRONT OF THE APENNINIC-MAGHREBIAN CHAIN
(SOUTHERN SICILY)**

- PASEK & PULINOMA (1976) – *Block movements of the Cretaceous sandstone in the Stolowe Gory. Mts.*, Poland. IAEG Bull., **13**: 79-82.
- RUGGERI G. & UNTI M. (1974) – *Pliocene e Pleistocene nell'entroterra di Marsala*. Bollettino Società Geologica Italiana **93**: 723-733.
- SORRISO-VALVO M. (1979) – *Trench features on steep-sided ridges of Aspromonte, Calabria (Italy)*. Proceed. Pol.-Ital. Sem. on mass. Movem. In mount. Region, Szymbark.
- VAN CONVERING J.A. (1997) – *Preface the new Pleistocene. In: The Pleistocene Boundary an the Beginning of the Quaternary*. Van Convering Ed., Word and Regional Geology, **9**, Cambridge University Press, xi-xvii.
- VARNES D.J. (1978) – *Slope movement types and processes*. In; SCHUSTER R.L. & KRIZEK R.E. (eds), Landslide analysis and control. Transp. Research Board, Sp. Rep. **176**, Nat. Ac. Of Sciences, Washington D.C.
- TER-STEPANIAN G. (1969) – *Types of depth creep of slopes in rock masses*. Probl. Geomech., **3**, Yerevan.
- TERZAGHI K. (1962) – *Stability of steep slopes on hard unweathered rock*. Geotechnique, **12**: 251-270.
- ZARUBA Q., MENCL V. (1969) – *Landslide and their control*. Elsevier, New York and Czechoclovak Academy of Sciences, 205 pp, Prague.
- ZISCHINSKY U. (1966) – *On the deformation of high slopes*. Proceedings of the First Congress of the Int. Soc. of Rock Mechanics, Lisboa, **6/11**: 179-185.

Received March 2006 - Accepted January 2008

