



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

GESTIONE E TUTELA DELLE COSTE

PRIMO INCONTRO TERRITORIALE

Pula 15 febbraio 2019

Metodologie di indagine per la valutazione delle dinamiche evolutive e del rischio per le coste alte

Gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche

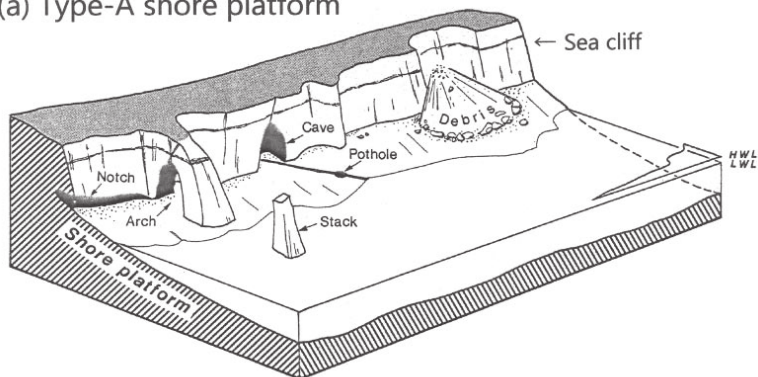


Università degli Studi di Cagliari

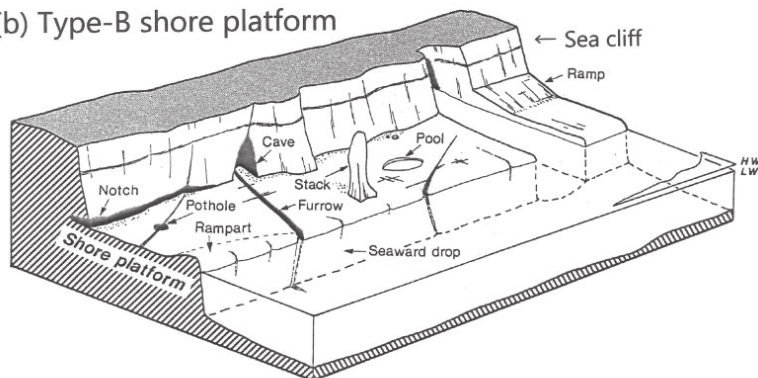
*Giacomo Deiana, Stefania Da Pelo, Antonio Funedda, Giorgio Ghiglieri, Maria
Teresa Melis, Mattia Alessio Meloni, Luca Naitza, Paolo Orrù, Andrea Sulis*

La cooperazione al cuore del Mediterraneo

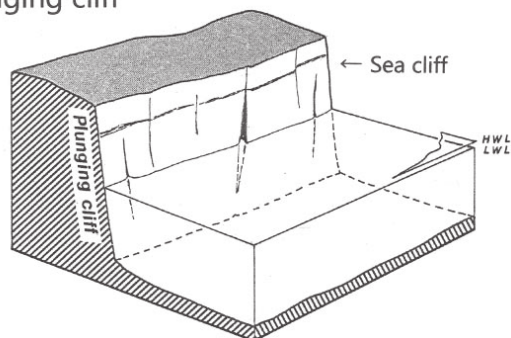
(a) Type-A shore platform



(b) Type-B shore platform



(c) Plunging cliff



Sunamura, 2015

Cos'è una costa alta rocciosa?

Caratteristica fondamentale: è un tratto di costa dove i processi erosivi non sono reversibili.

Lo studio dei processi che modellano le coste alte, e l'acquisizione dei dati, è particolarmente complicato.

- (1) bassa velocità dei cambiamenti;
- (2) difficoltà nel misurare l'effetto del moto ondoso, l'energia trasmessa alla costa emersa e sommersa quando si innescano i fenomeni improvvisi di arretramento;
- (3) la difficoltà e spesso pericolosità nell'accesso alla zona da studiare per l'esplorazione;
- (4) investimenti nella ricerca insufficienti;
- (5) complessità geologica del sistema costiero dove si sovrappongono processi attuali che agiscono su strutture e forme acquisite in un passato non recente (da Griggs and Trenhaile, 1994, modificato).

Obiettivi dello studio delle coste alte rocciose nell'ambito del progetto MAREGOT

Perché studiarle

Rilevanza dei processi che agiscono sulle coste alte.



Santa Catalina cliff (Puerto de Santa María-Portogallo) DelRio & Gracia, 2009.



Happisburg GB, British Geological Service

Come studiarle

Elaborazione di una metodologia per il rilevamento e la caratterizzazione delle coste alte rocciose soggette a erosione e instabilità per individuare le diverse suscettività al dissesto.

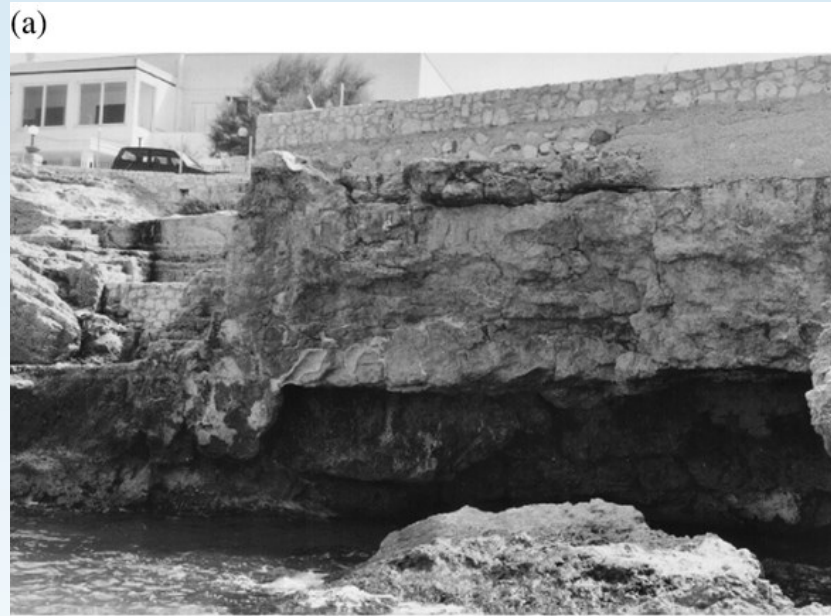
Integrazione tra diversi metodi di indagine: Rilevamento multidisciplinare e *multi-scaling* (geologico-strutturale, geomorfologico, idrogeologico, geomeccanico) e tecnologie avanzate.

Sviluppo di un database che consenta la confrontabilità dei dati.

Obiettivi dello studio delle coste alte rocciose nell'ambito del progetto MAREGOT

Perché studiarle

Rilevanza dei processi che agiscono sulle coste alte.



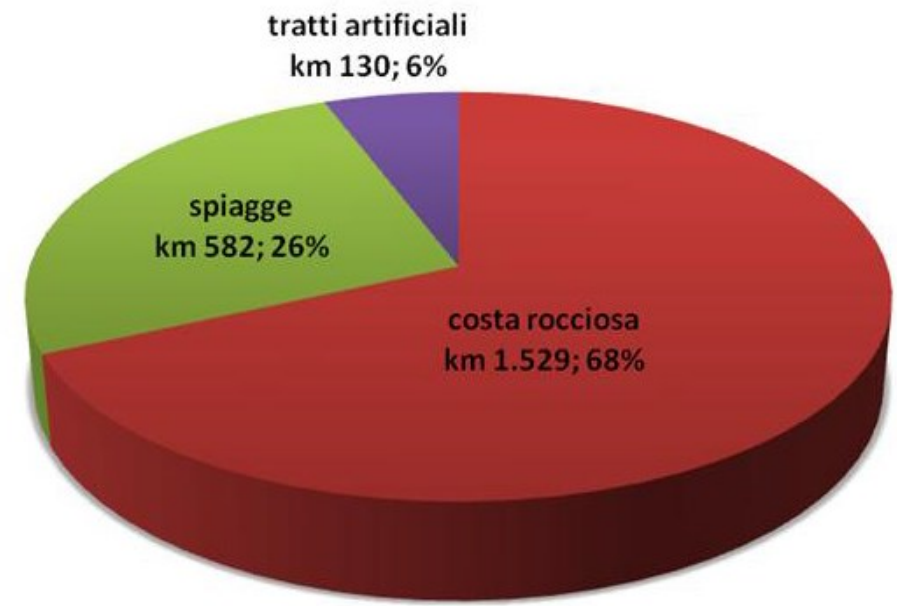
Example of rock fall before (a) and after (b) the development of the failure plane in response to a large sea storm (January 1999). The rock mass movement involved two free falling blocks with two different detachment surfaces on the cliff (1 and 2).

Andriani & Walsh, 2007



Santa Caterina di Pittinuri

Obbiettivi dello studio delle coste alte rocciose nell'ambito del progetto MAREGOT



Costa della Sardegna **2.241 km**
 costa rocciosa **1.529 km (68%)**
 di cui **127 km** in falesia,
 costa sabbiosa si attesta a **582 km (26%)**
 costa artificiale a **130 km (6%)**, con 33 km di opere portuali e 99 km di opere di difesa.
(Dati P.A.C., Regione Sardegna)

Mappa regionale dei tratti in costa rocciosa ad alta criticità

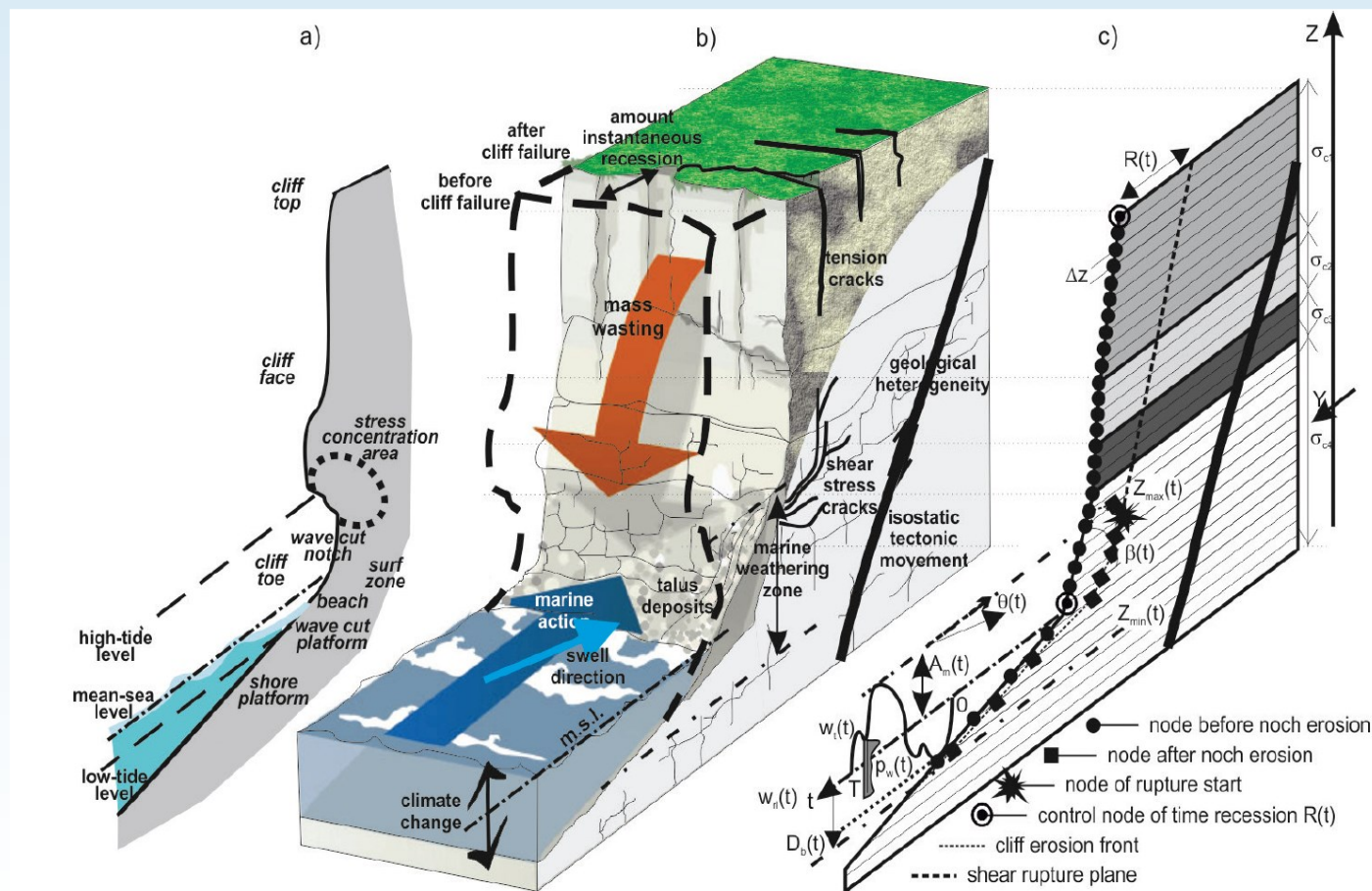
Elementi che condizionano l'evoluzione delle coste

Evoluzione attuale:

Interazione tra fenomeni "terrestri" e fenomeni "marini"

L'instabilità delle pareti rocciose costiere è legata ai seguenti fenomeni di modifica della struttura mineralogica, petrografica e strutturale delle rocce:

- processi di alterazione e *weathering* dovuti alla presenza dell'acqua anche ricca di componenti saline provenienti dall'aerosol marino;
- processi di erosione, ossia asportazione di materiale disgregato sia ad opera dell'acqua che del vento;
- processi gravitativi, in particolare frane;
- processi di arretramento delle falesie per modifica del solco di battente e della piattaforma di abrasione emersa e sommersa;
- effetto delle acque sotterranee sull'indebolimento della resistenza meccanica delle rocce.

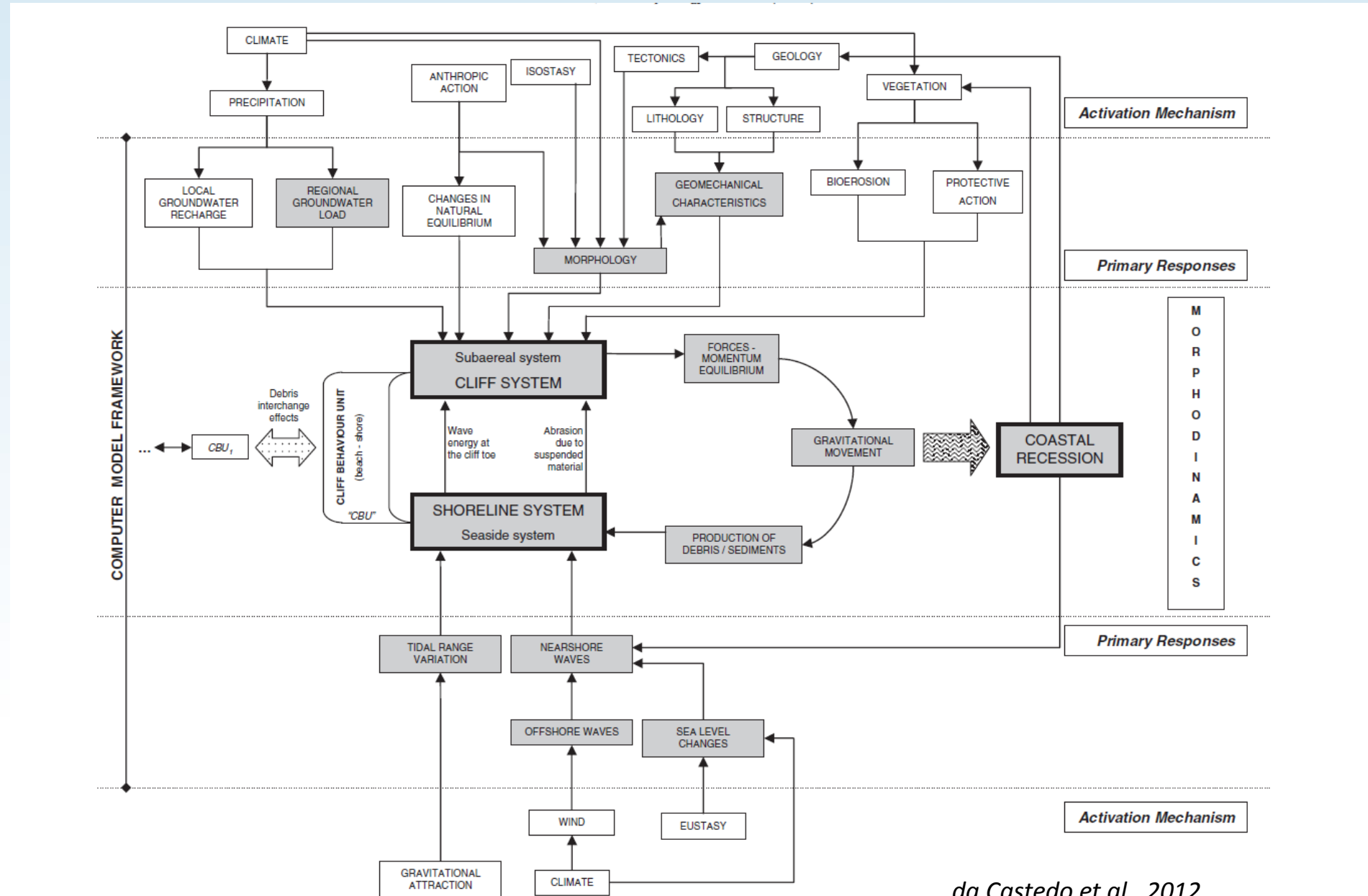


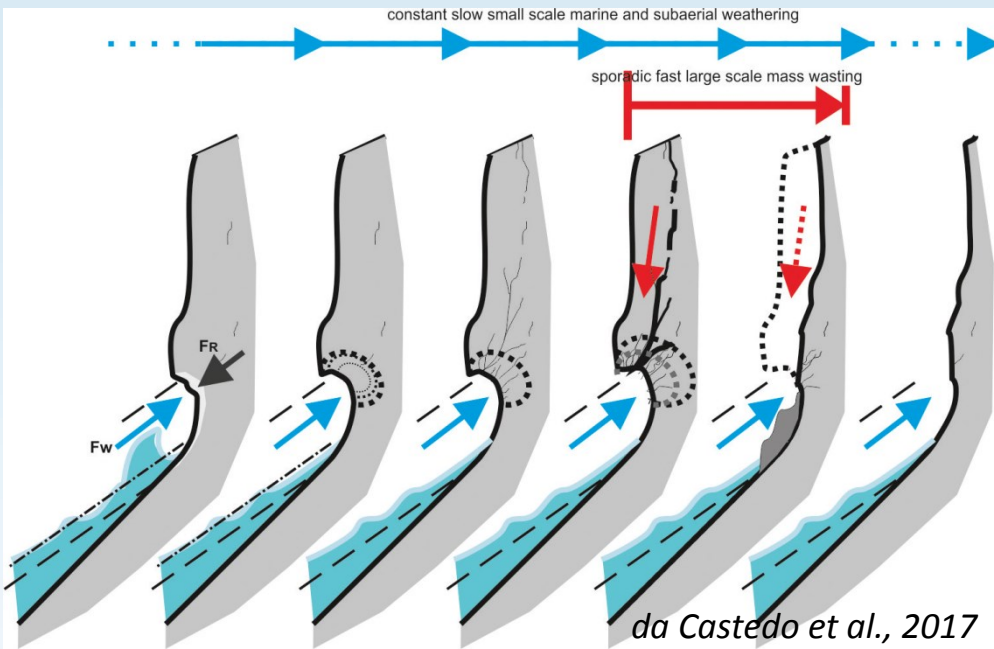
Blocco diagramma di una falesia: (a) aspetti morfologici di una falesia; (b) unità costiera omogenea (CBU), che presenta condizioni geologiche ed oceanografiche omogenee; (c) discretizzazione di una sezione litorale su falesia con gli elementi principali coinvolti, da (Castedo et al., 2017).

Elementi che condizionano l'evoluzione delle coste

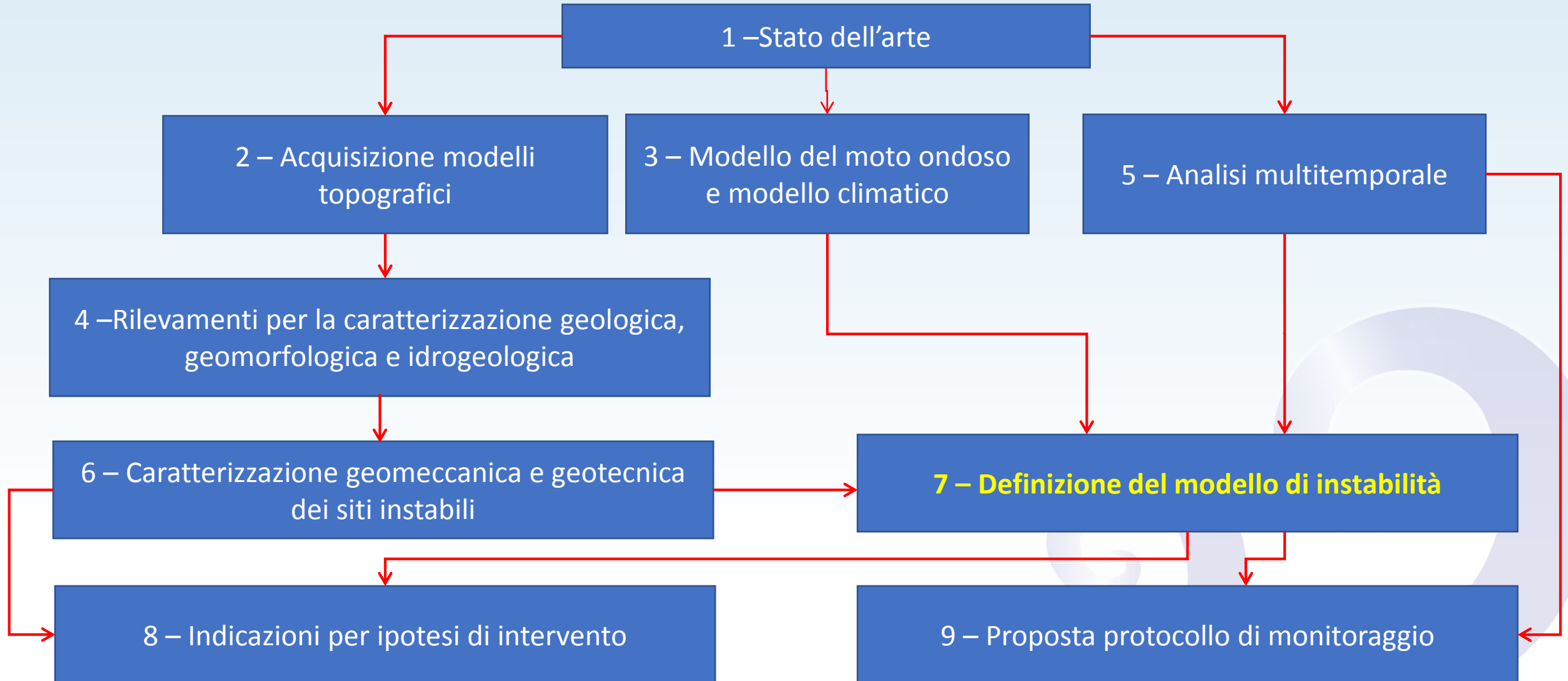
Evoluzione attuale:

Interazione tra fenomeni "terrestri" e fenomeni "marini"





PROTOCOLLO D'INDAGINE DELLE COSTE ROCCIOSE

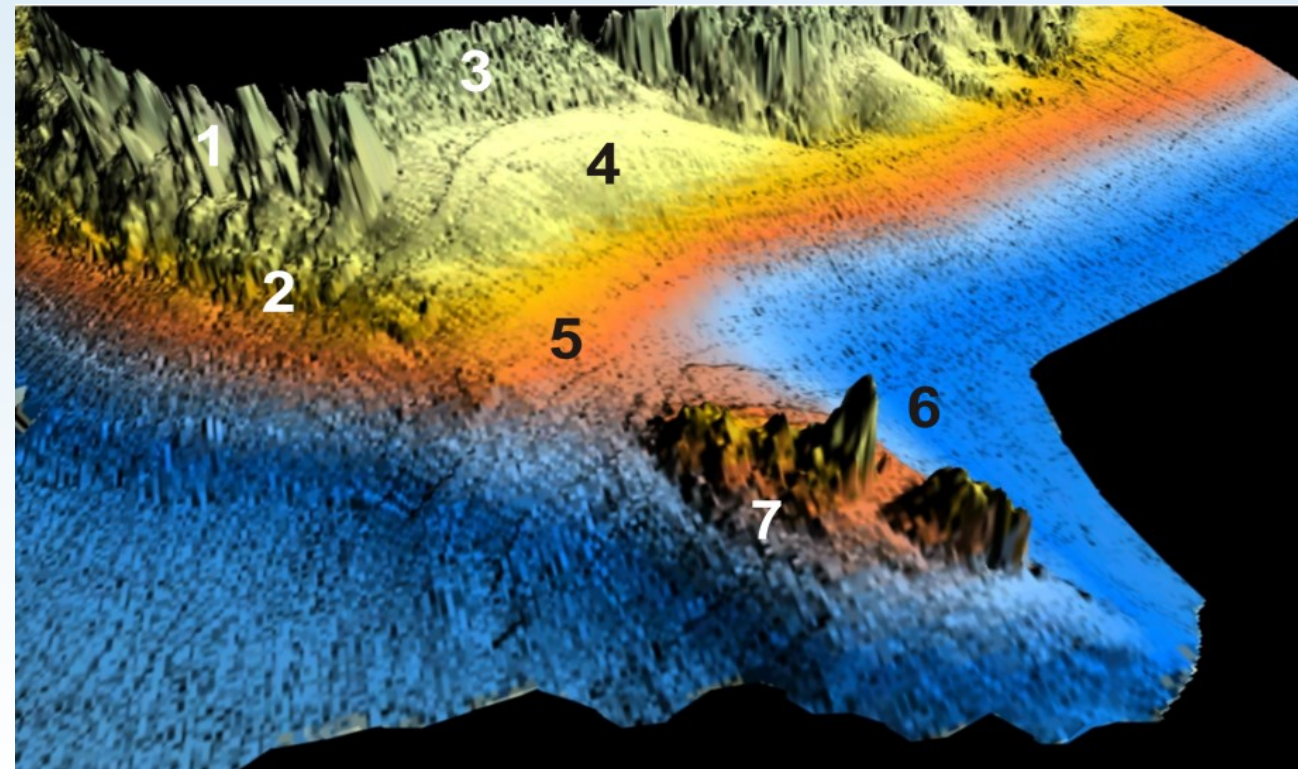
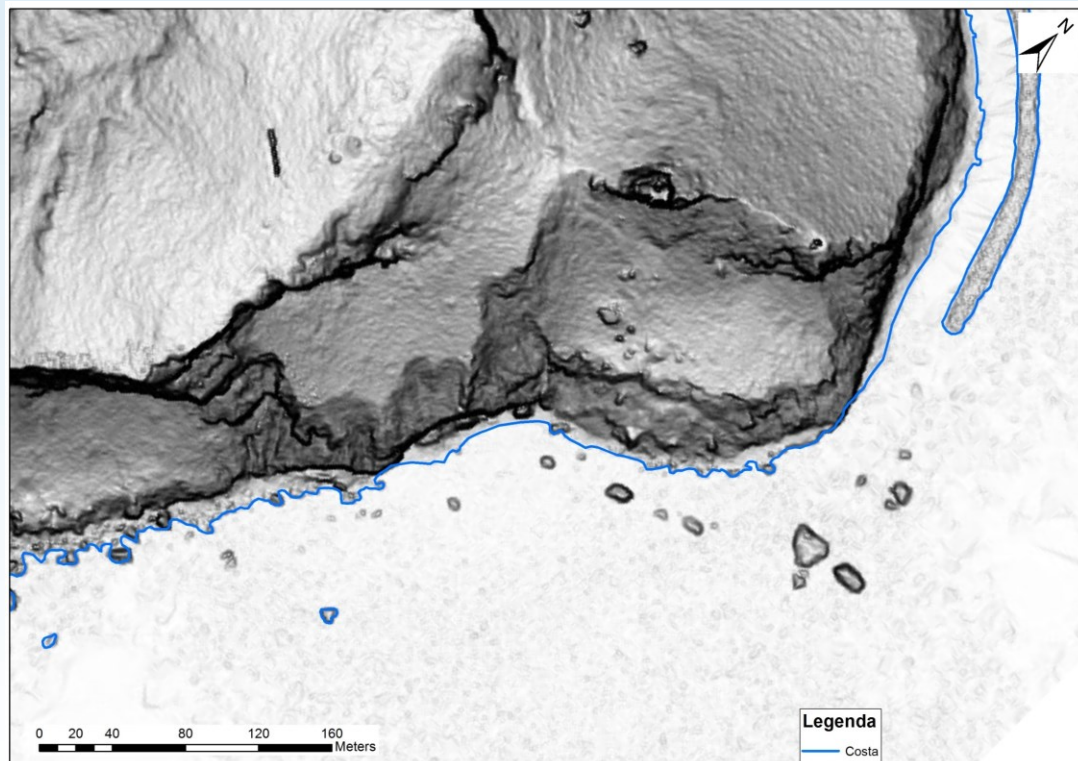


PROTOCOLLO D'INDAGINE DELLE COSTE ROCCIOSE

Caratteristiche	Tipologia d'indagine	Prodotto atteso
Dati Esistenti	Analisi ed integrazione dei dati esistenti	Geodatabase e modelli cartografici
Morfologiche	Remote Sensing, Rilievi Batimetrici,	DTM parte emersa e morfologia parte sommersa.
Analisi mutitemporale	Analisi delle foto aeree	Modello della variazione storica della linea di costa
Geologico-Strutturali	Rilievi di campo, Remote Sensing, Fotoanalisi	Modello Geologico Strutturale
Geomorfologiche	Rilievi di campo, Remote Sensing, Fotoanalisi, Rilievi in immersione	Modello Geomorfologico Inventario locale dei fenomeni franosi
Geomeccaniche	Rilievi sul campo, Remote Sensing, Fotoanalisi, Analisi in situ e di laboratorio	Caratterizzazione Geomeccanica, Ricostruzione 3D dell'ammasso roccioso (Modello Geomeccanico)
Geotecniche	Analisi in situ e di laboratorio,	Modello Geotecnico
Idrogeologiche	Rilievi di campo, Remote Sensing,	Modello Idrogeologico
Climatiche	Analisi pluviometriche delle serie storiche	Soglie Pluviometriche
Moto Ondoso	Misure dirette e indirette	Caratterizzazione energetica del moto ondoso

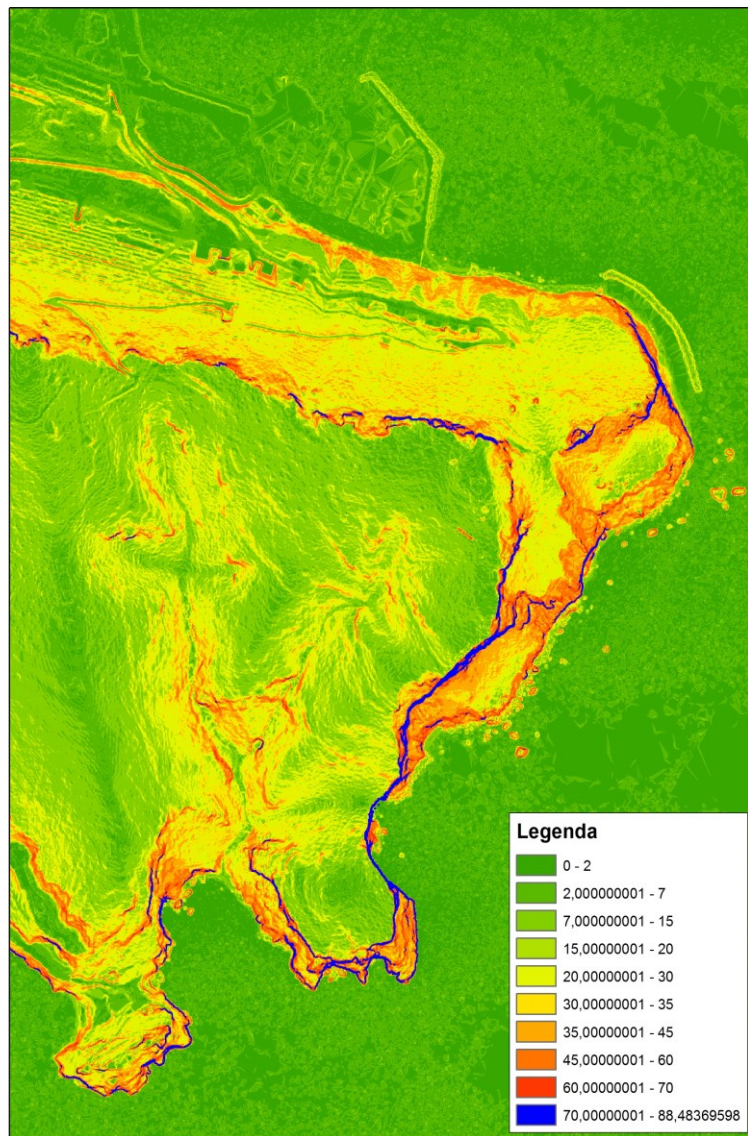
*Sintesi delle indagini e dei prodotti tecnici da realizzare per l'indagine alla scala locale dei tratti di costa che presentano una **propensione allo sviluppo di fenomeni franosi***

2 – Acquisizione modelli topografici

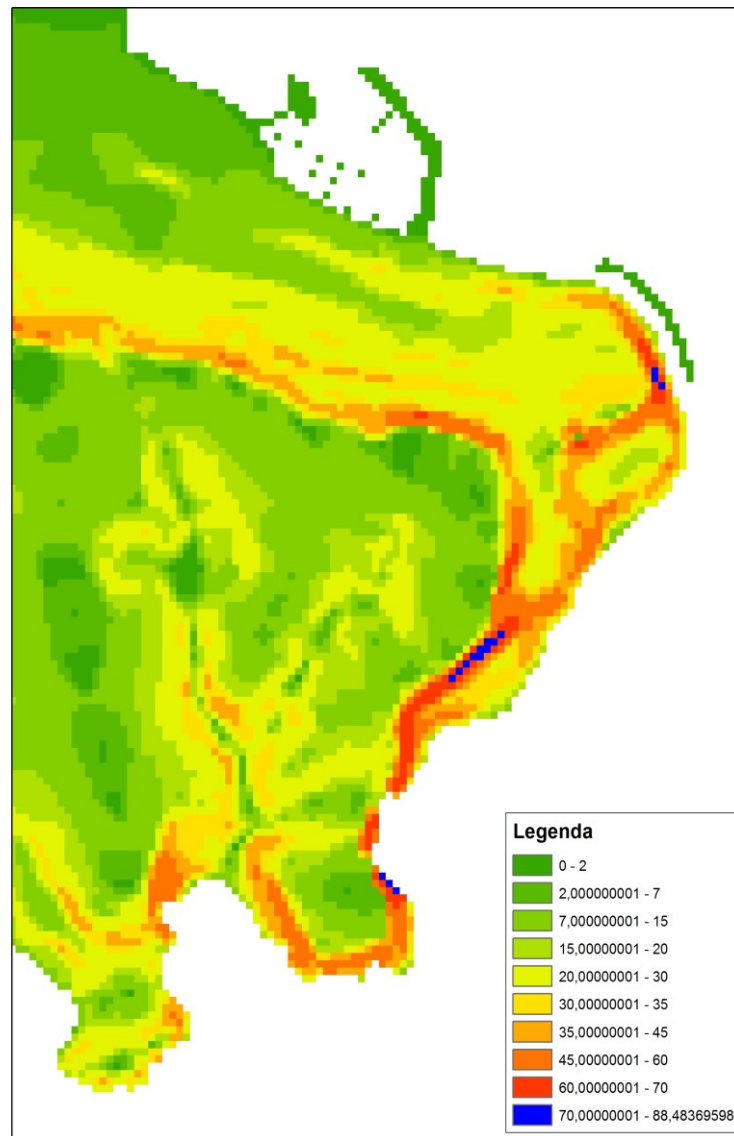


2 – Acquisizione modelli topografici

1 m



10 m



Accuratezza del modello

Dato il reale assetto topografico della maggior parte dei versanti dell'isola, il gruppo di lavoro ha potuto verificare che l'utilizzo del **DTM a 10 m** porta con sé una significativa approssimazione nella determinazione della pendenza percentuale delle aree a pendenza più elevata, con una approssimazione in certi casi importante.

Di seguito è riportato il confronto tra le carte elaborate da DTM a 1 m e 10 m per l'area della Sella del Diavolo di Cagliari, dove sono presenti delle pareti rocciose verticali o sub-verticali.

3 – Modello del moto ondoso e modello climatico

Un modello semplificato di valutazione dell'effetto delle onde sulla instabilità delle coste alte è quello proposto da Sunamura (1992) e Budetta et al. (2000).

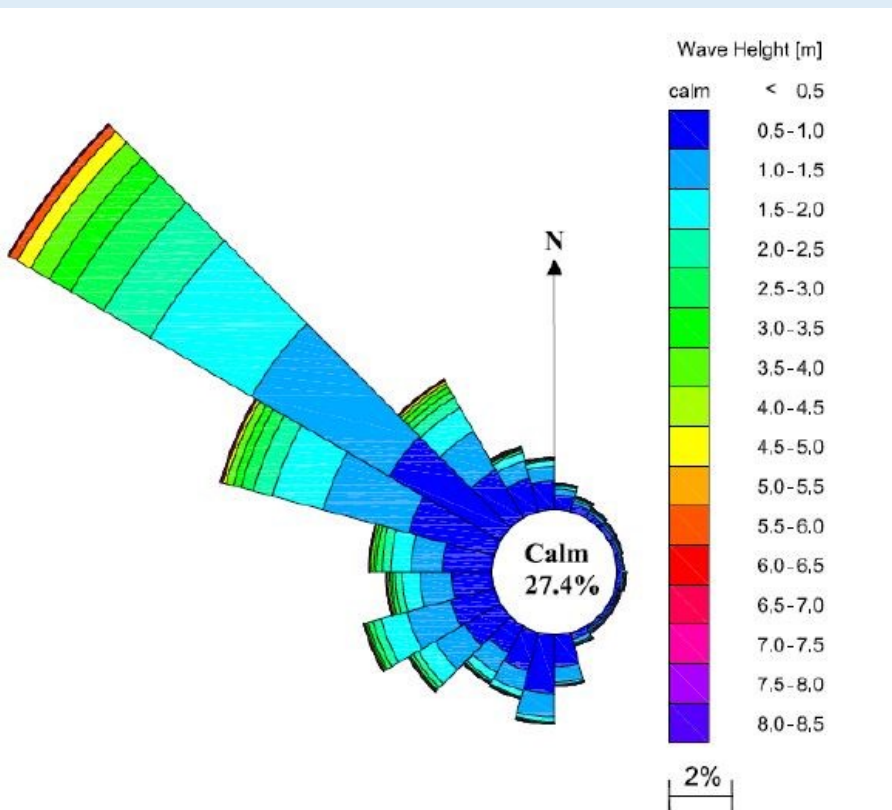


Diagramma a rosa del clima ondometrico RON a largo di Alghero (Sulis & Annis, 2014)

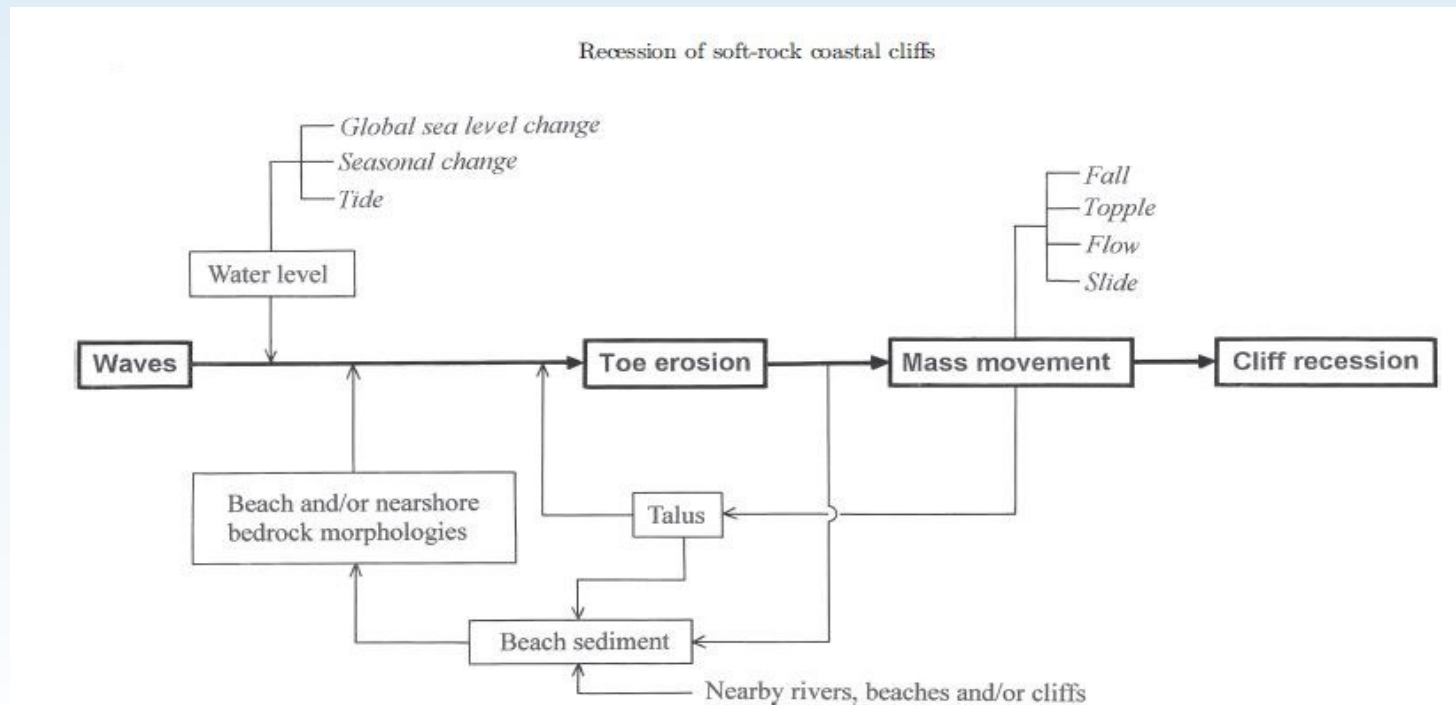


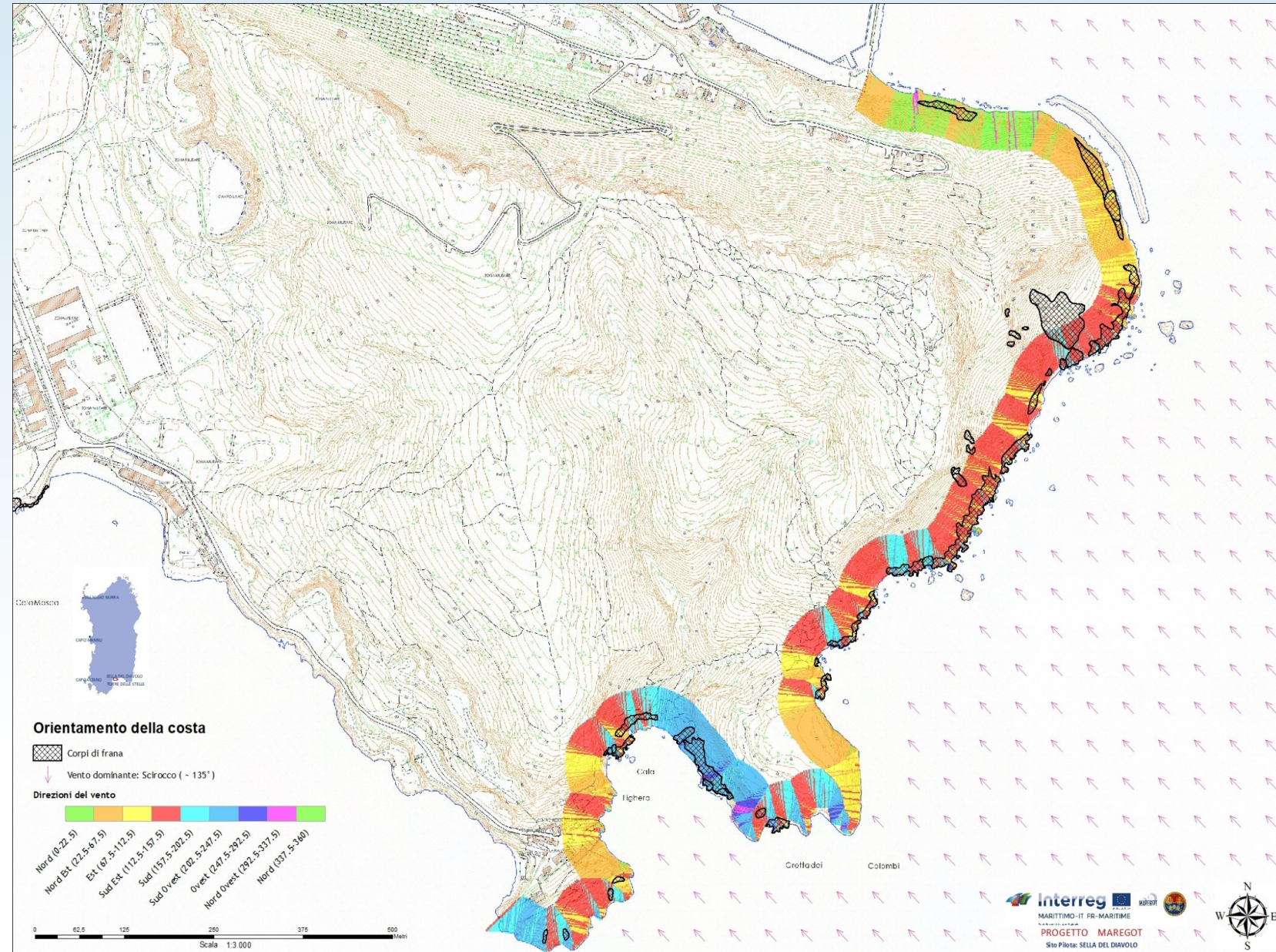
Fig. 2. The interaction of controlling factors for the toe erosion of sea cliffs. Modified from Sunamura.¹⁾

Vulnerability Index (VI) as a function of offshore (real) waves

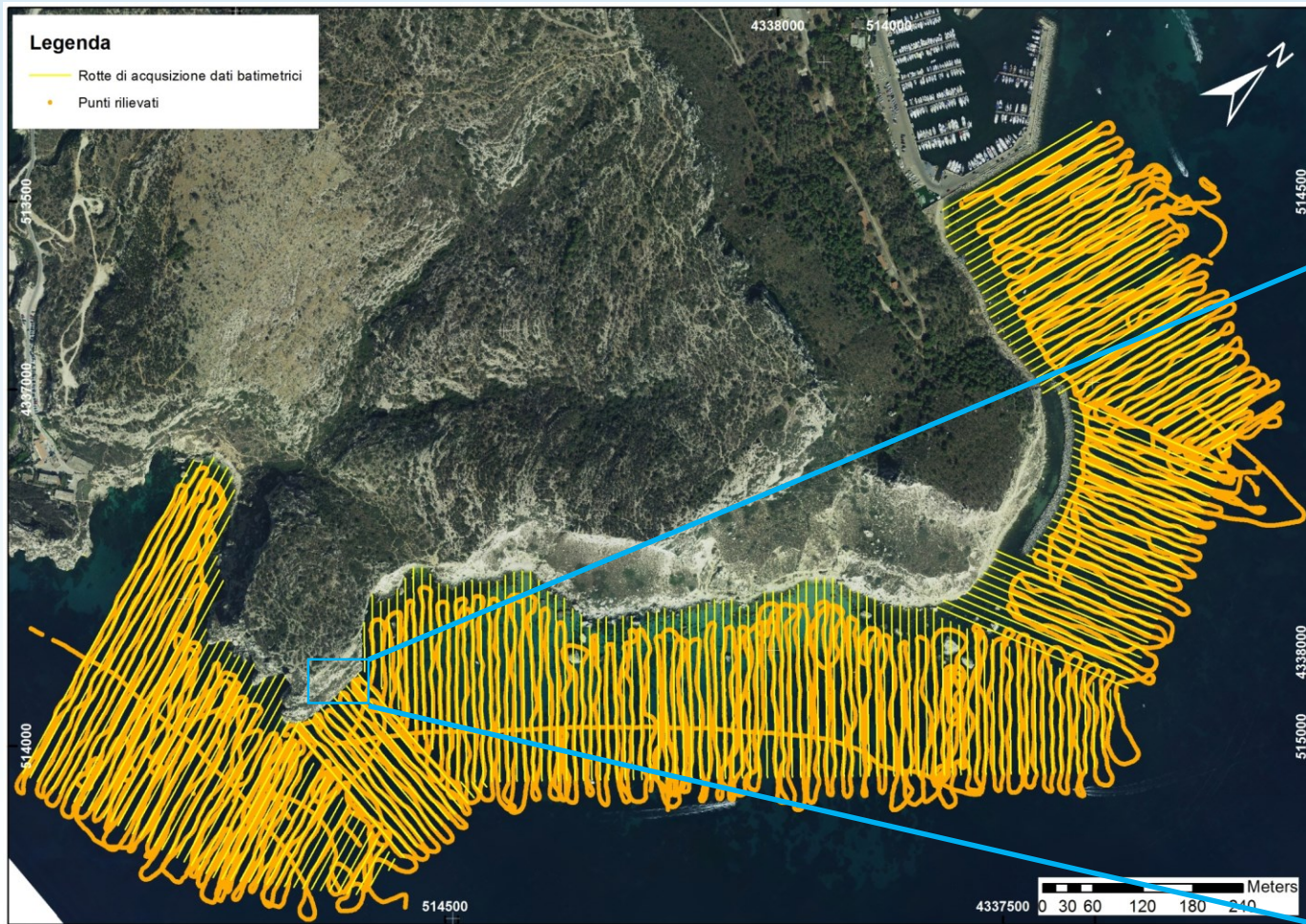
$$VI = \frac{F_W}{F_R} = \frac{A \rho g H_{bs}}{B \sigma_c}$$

3 – Modello del moto ondoso e modello climatico

Obiettivo: verificare le relazioni tra versanti costieri in frana ed esposizione al moto ondoso / quantificazione dell'energia trasmessa

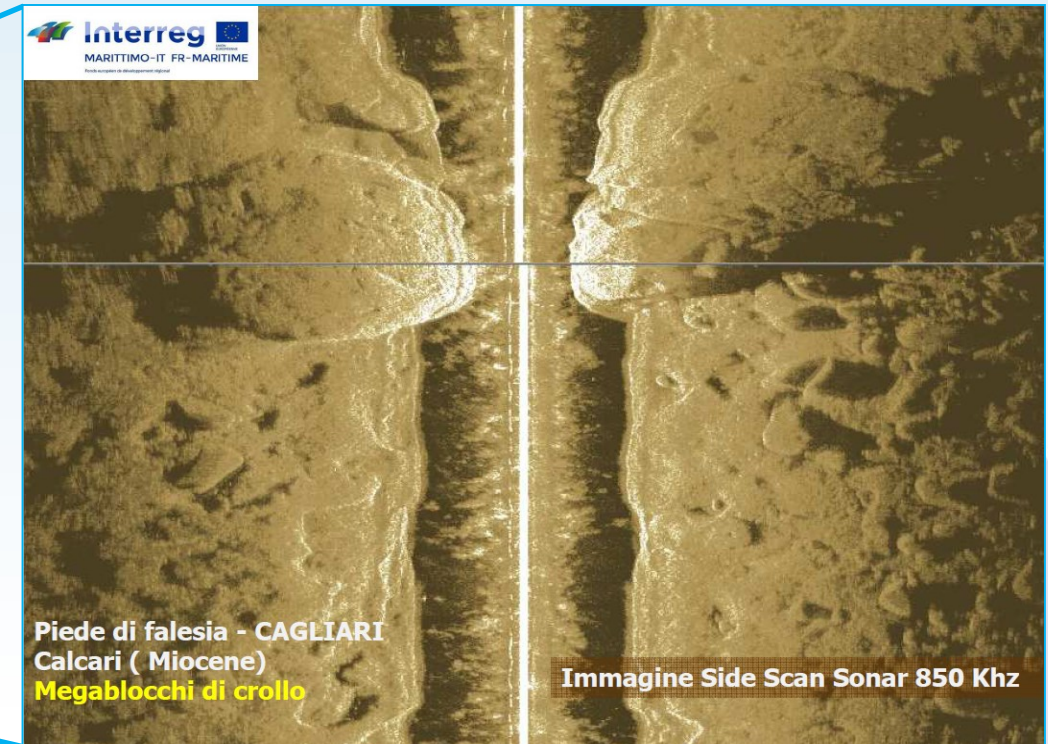


4 –Rilevamenti per la caratterizzazione geologica dei settori emersi e sommersi



Sella Del Diavolo

RILIEVO SIDE SCAN SONAR DEL SETTORE SOMMERSO

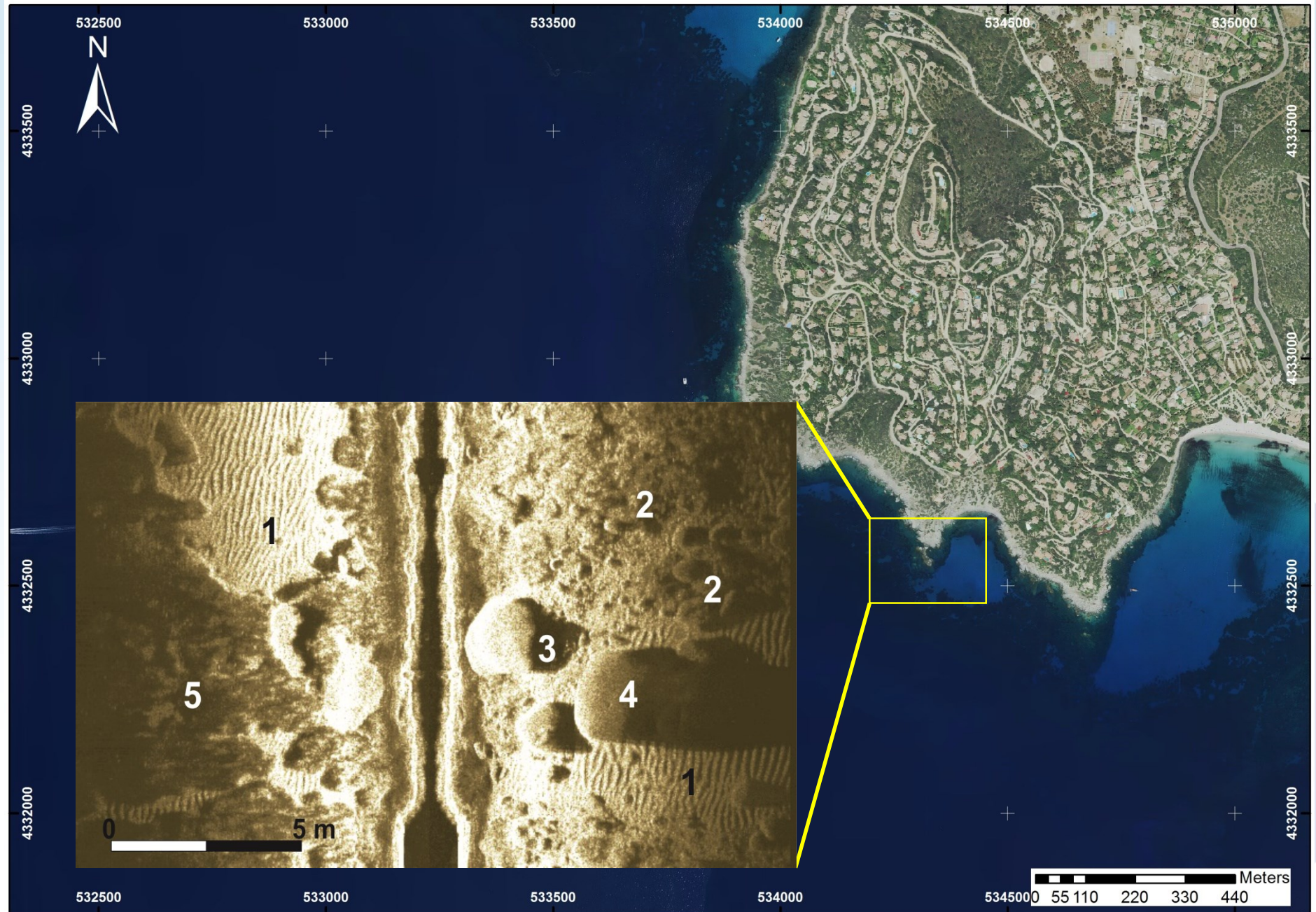


Rotte ortogonali alla costa, equidistanti 20 metri e fino a 250 metri a largo

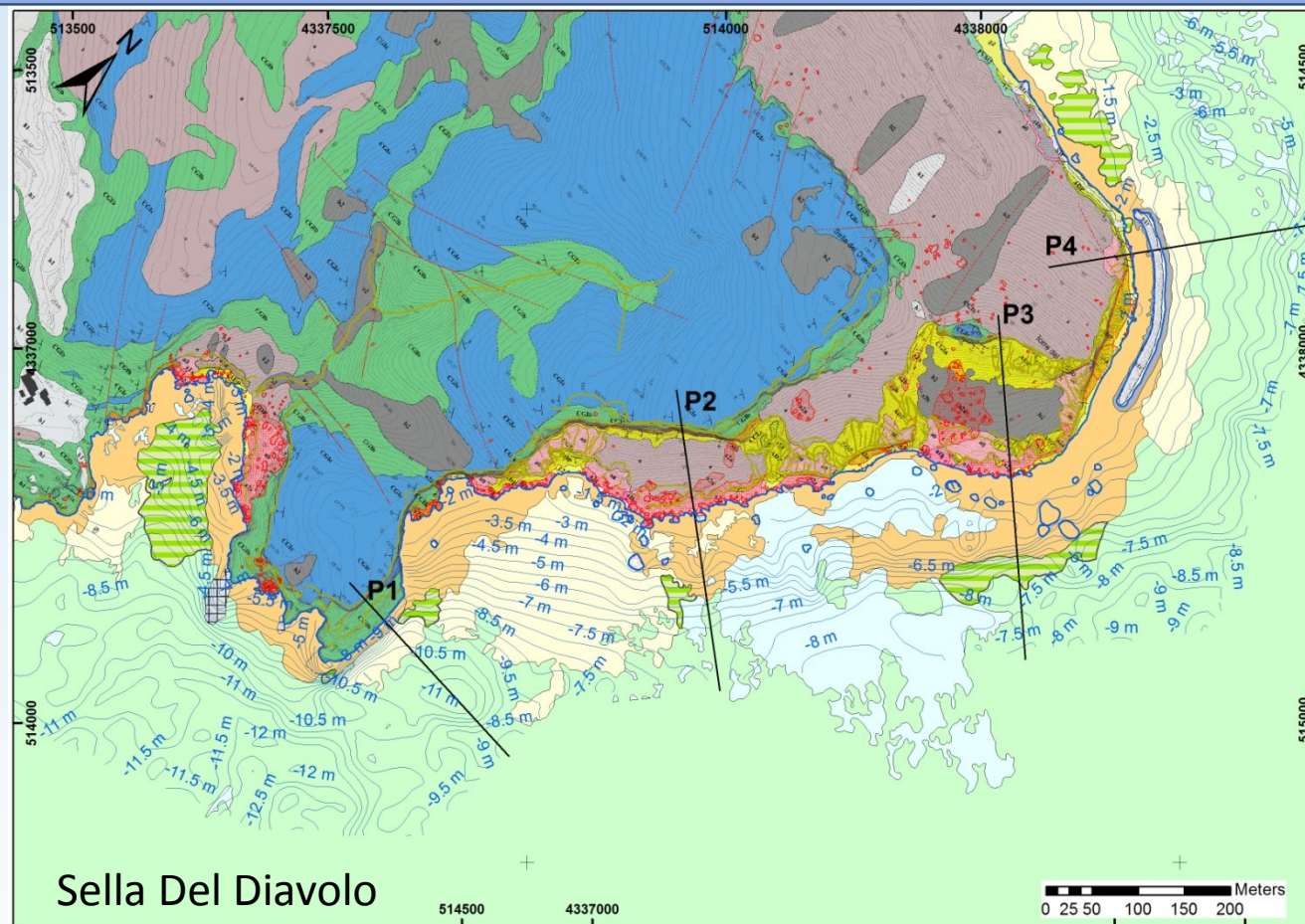
4 – Rilevamenti per la caratterizzazione geologica dei settori emersi e sommersi

Torre delle Stelle

- 1) Strutture sedimentarie a megaripples ($\lambda = 0,5 \div 1$ m);
- 2) Deposito di frana elaborato dalla dinamica marina;
- 3) Blocchi di frana ($d=4$ m, $h=3$ m);
- 4) Blocchi di frana ($d=6$ m, $h=5$ m);
- 5) Posidonia oceanica su piattaforma di abrasione marina.



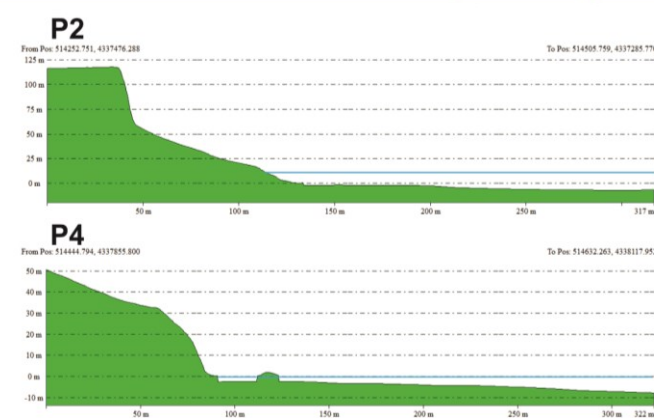
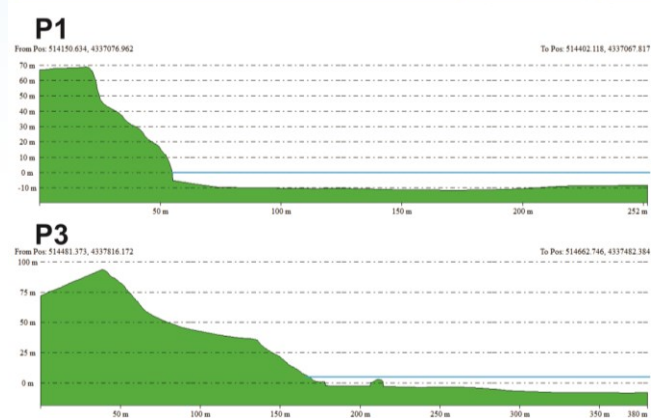
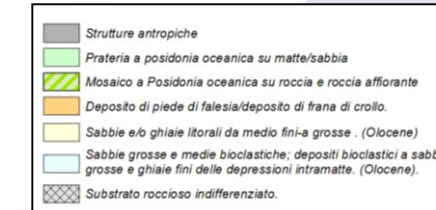
4 –Rilevamenti per la caratterizzazione geologica dei settori emersi e sommersi



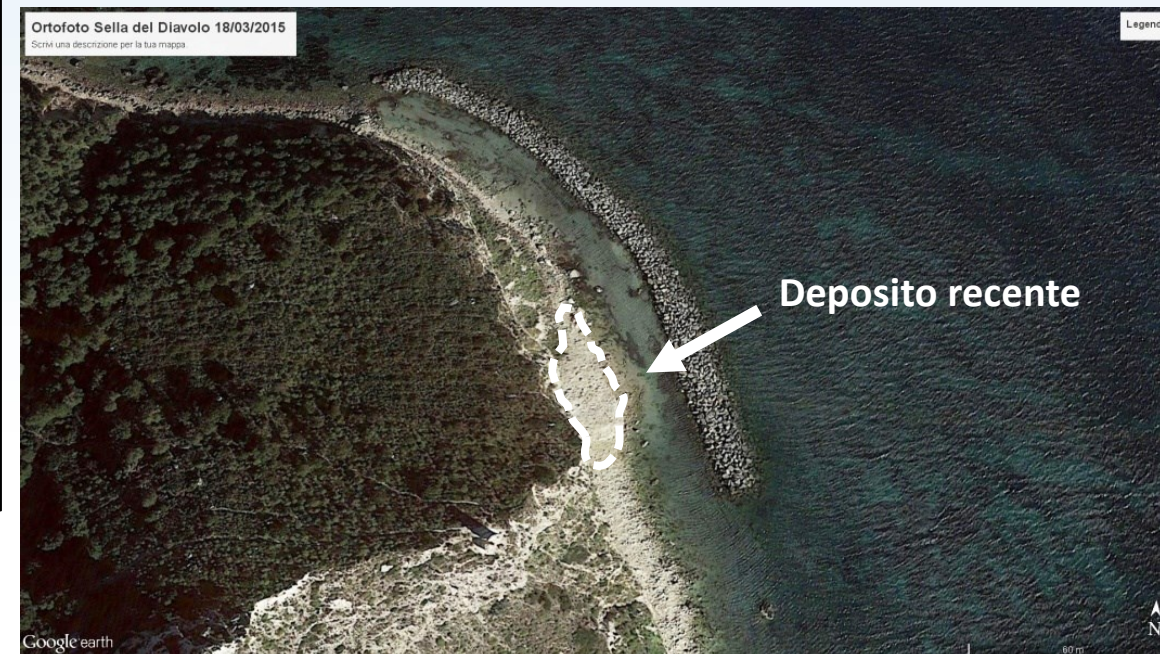
SETTORE EMERSO



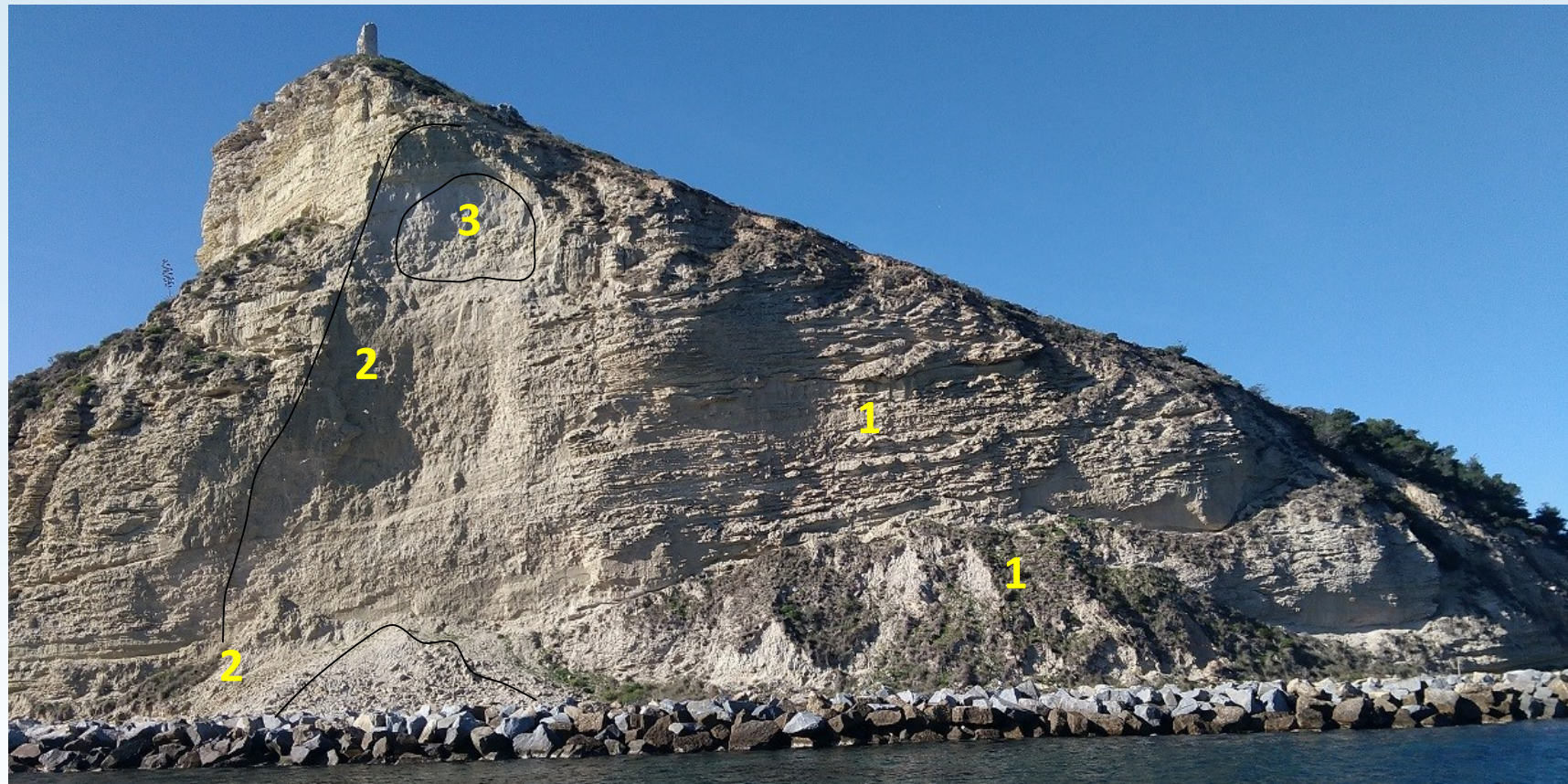
SETTORE SOMMERSO



5 – Analisi multitemporale



5 – Analisi multitemporale



Depositi di frana di crollo località Marina Piccola: 1) nicchie di distacco alterate e deposito colonizzato dalla vegetazione evolutasi tra 1940 e 1950; 2) nicchia di distacco e deposito al piede della frana del 2/07/1987; 3) nicchia di distacco e deposito del 21/02/2017. In primo piano la barriera di massi protettiva messa in opera successivamente all'evento del 1987.

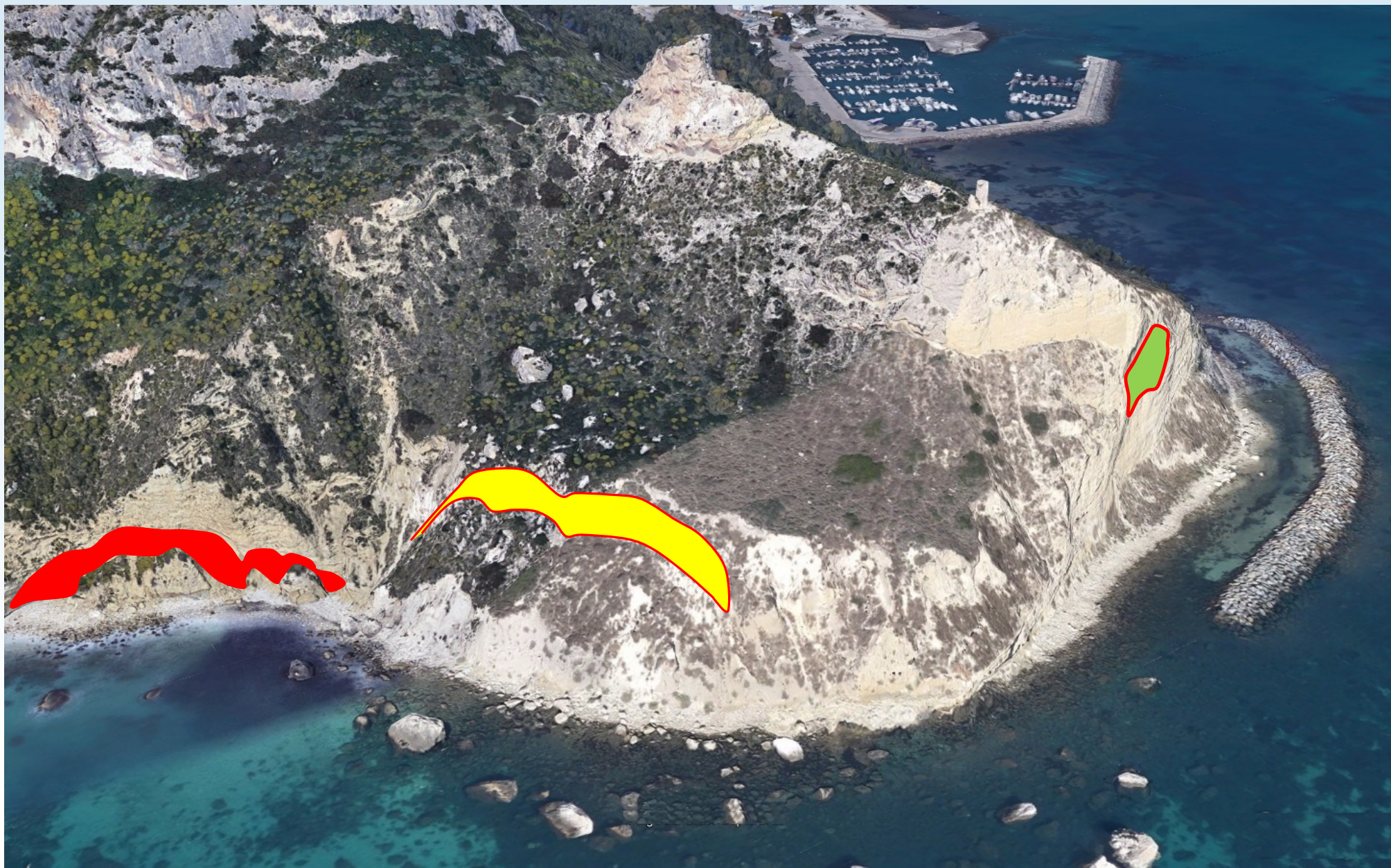
5 – Analisi multitemporale

La caratterizzazione accurata dell'assetto geologico permette di verificare la tendenza evolutiva e quindi meglio definire le aree potenzialmente maggiormente instabili.





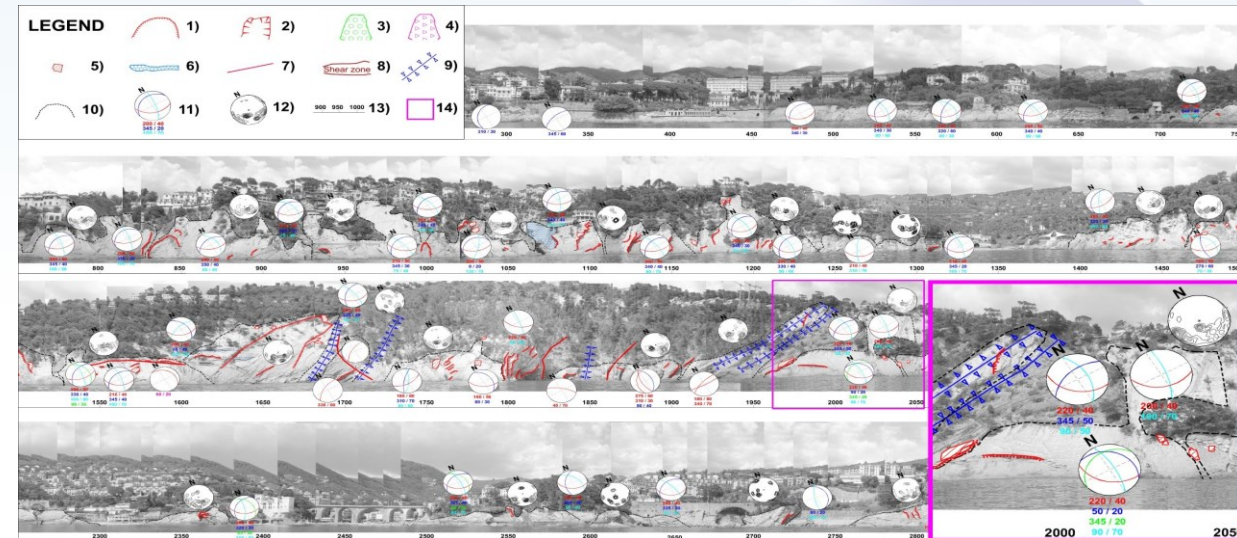
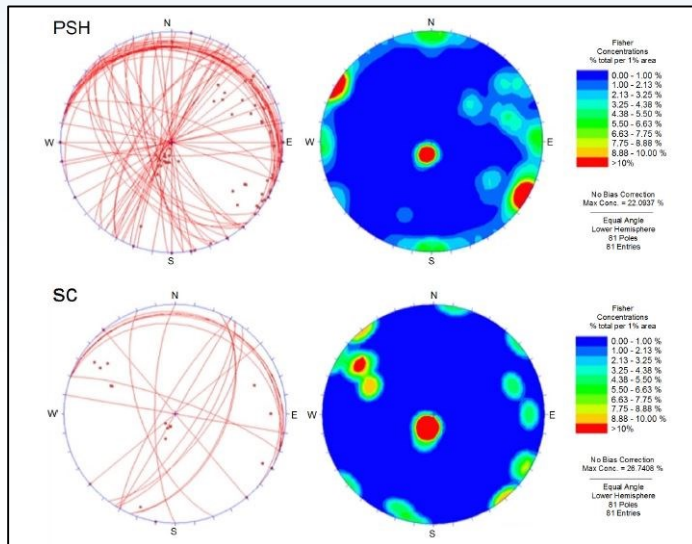
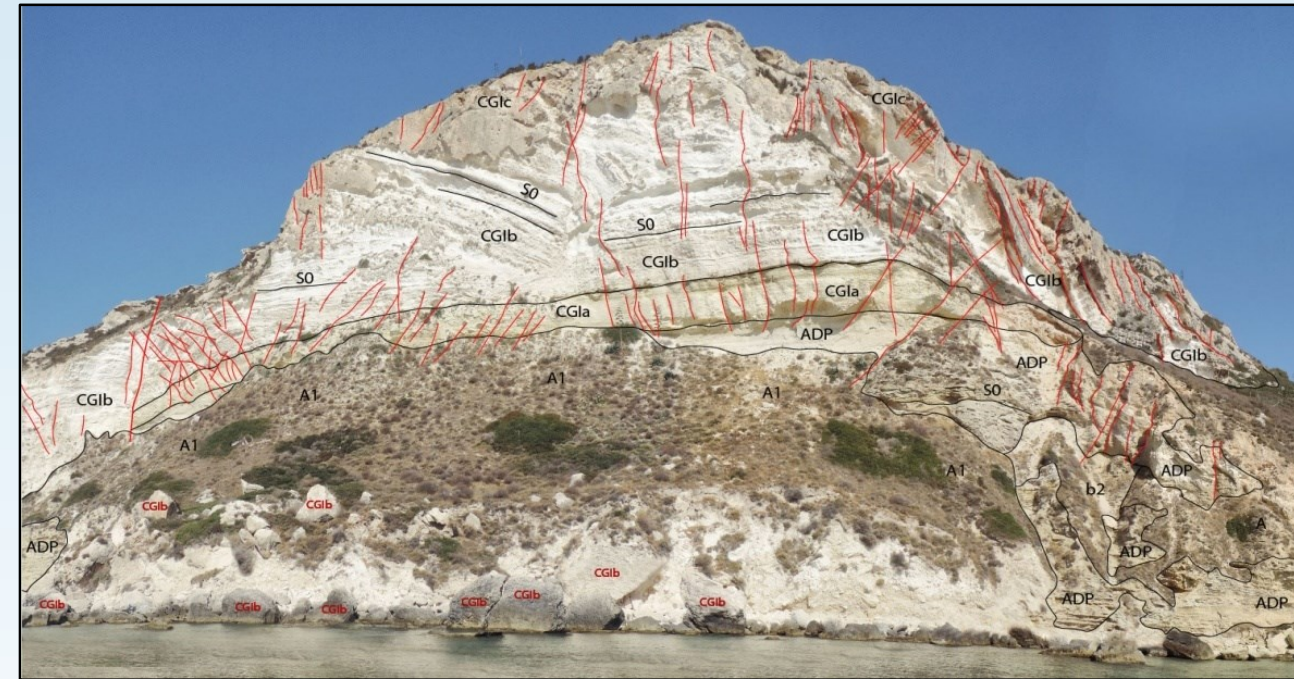




6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

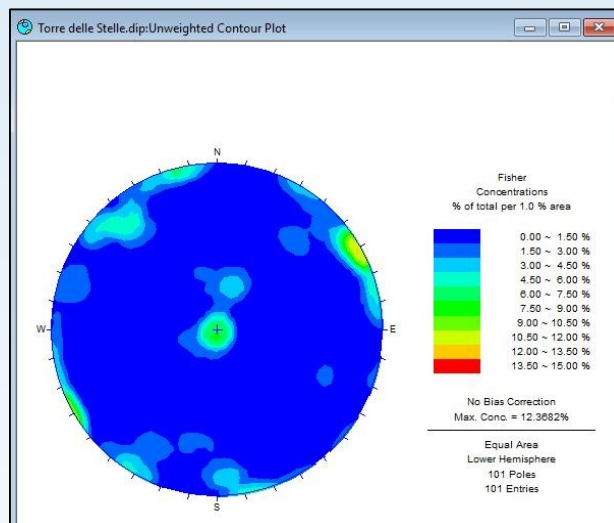
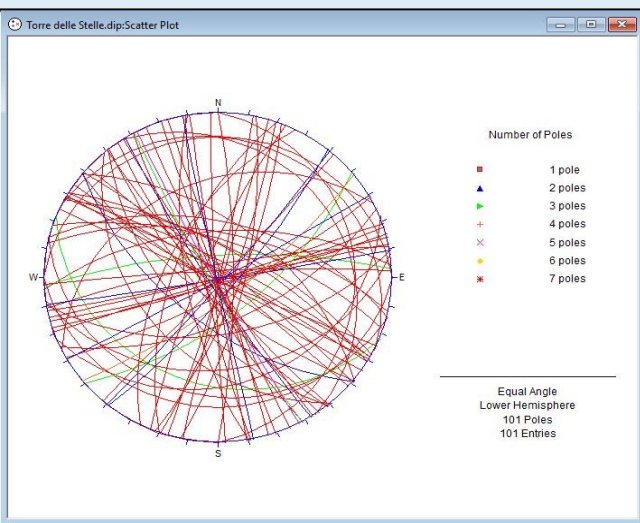
CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE
(Discontinuità, angolo di attrito, coesione, volume di roccia unitario)

Intersezione	Giacitura		Semitraccia		Terminazione		JRC	Curvat.	Tipo	Apertura	Riempim.	
	D.i.	Incl.	Sotto/sin	Sopra/dx	Frattura	Finestra						
N	m	°	°	m	m	I.A.O.	T.I.C.**	1-20	mm	***	mm	****
1	0,10	N40	85	0,10	2,50	O	T	15	40	3	2	NO+Ca
2	0,20	N30	80	0,10	4,00	O	T	12	40	3	10	I
3	0,60	N42	85	0,10	0,50	I	C	13	20	3	1	NO+Ca
4	0,80	N50	85	0,20	0,45	I	C	12	20	3	1	NO+Ca
5	1,30	N52	83	0,16	0,10	I	C	10	10	3	1	NO+Ca
6	1,60	N28	82	0,50	4,00	O	T	12	30	3	5	Ca
7	2,00	N40	82	1,00	3,50	O	T	10	20	3	4	Ca
8	2,20	N50	82	0	2,00	I	C	14	30	3	3	Ca+I
9	2,40	N30	80	0	2,00	O	T	12	20	3	4	NO
10	2,70	N40	85	1,50	0,35	I	C	17	50	3	10	NO+Ca
11	3,25	N36	88	0,50	2,20	O	T	18	50	3	10	Ca+NO
12	3,60	N32	84	0,60	2,00	O	T	16	30	3	5	Ca+NO
13	4,00	N52	85	0	1,50	O	T	14	30	3	20	Ca+NO
14	4,90	N32	82	0,50	2,00	O	T	16	30	3	10	Ca+NO



6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

RILIEVI GEOMECCANICI

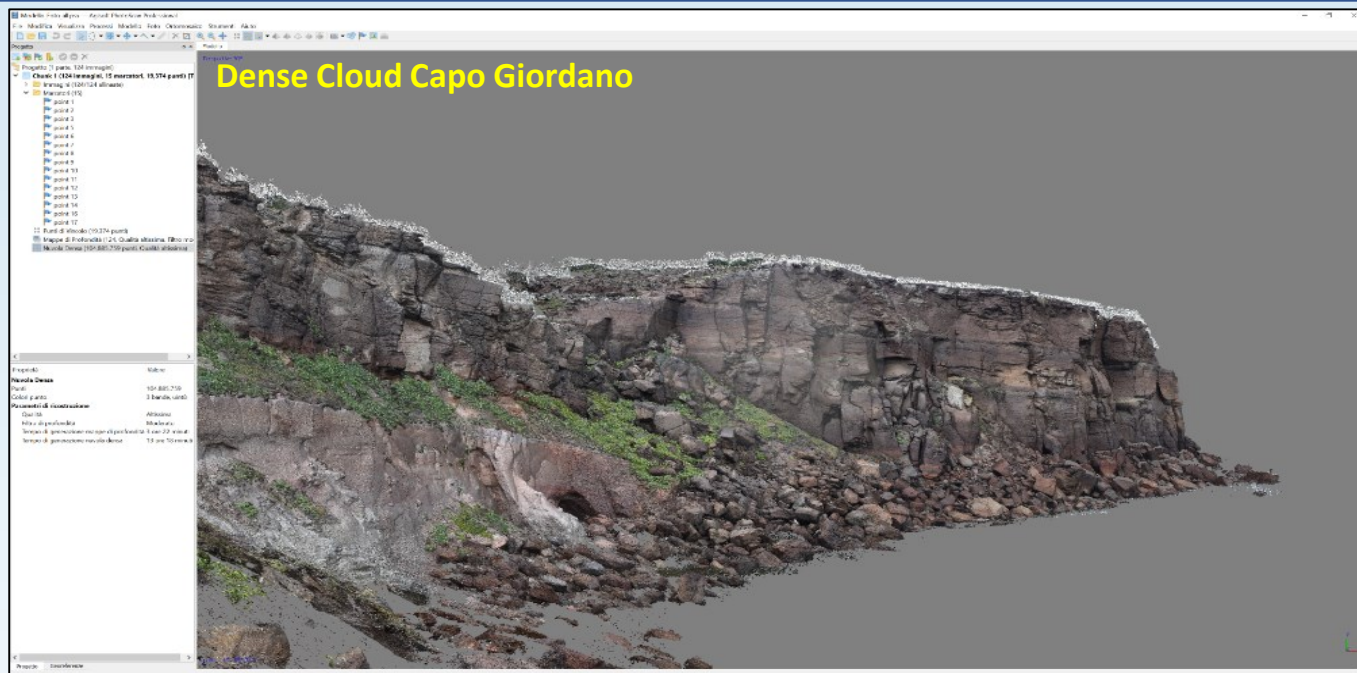


Scan-Line Cala Delfino (Torre delle Stelle)

6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO

Rilievo Laser Scanner Torre delle Stelle

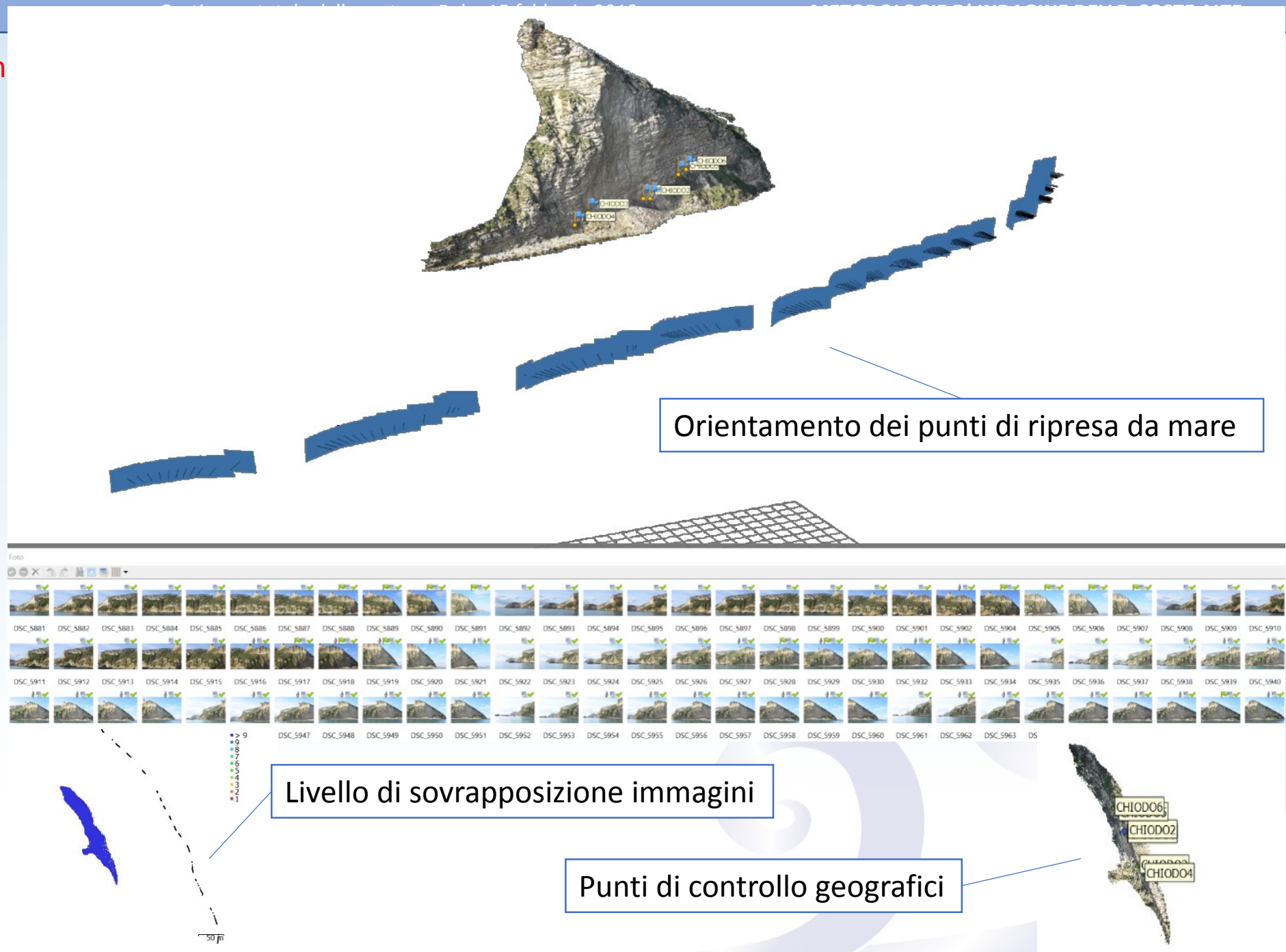


Rilievo Laser Scanner Capo Giordano



6 - Caratterizzazione geomeccanica

RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO



Orientamento dei punti di ripresa da mare

Immagini riprese con NIKON D7200

Lunghezza focale 40

Apertura F/10

ISO 500

Otturatore 1:1250

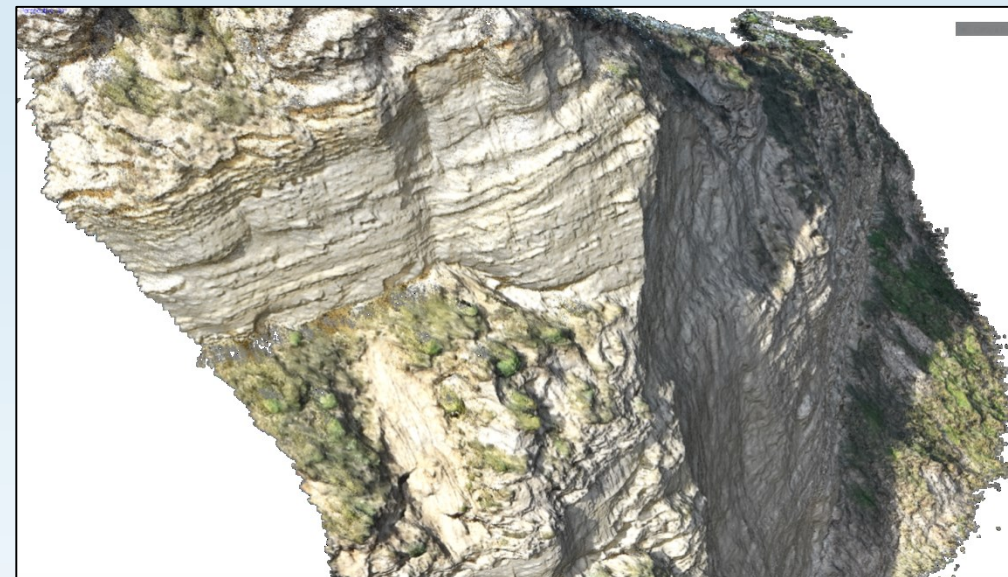
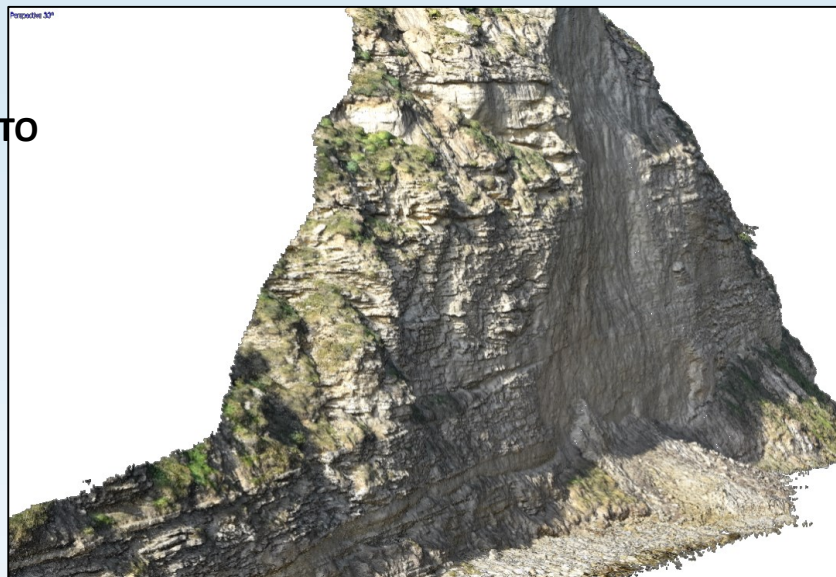
Focale 35mm 60

Livello di sovrapposizione immagini

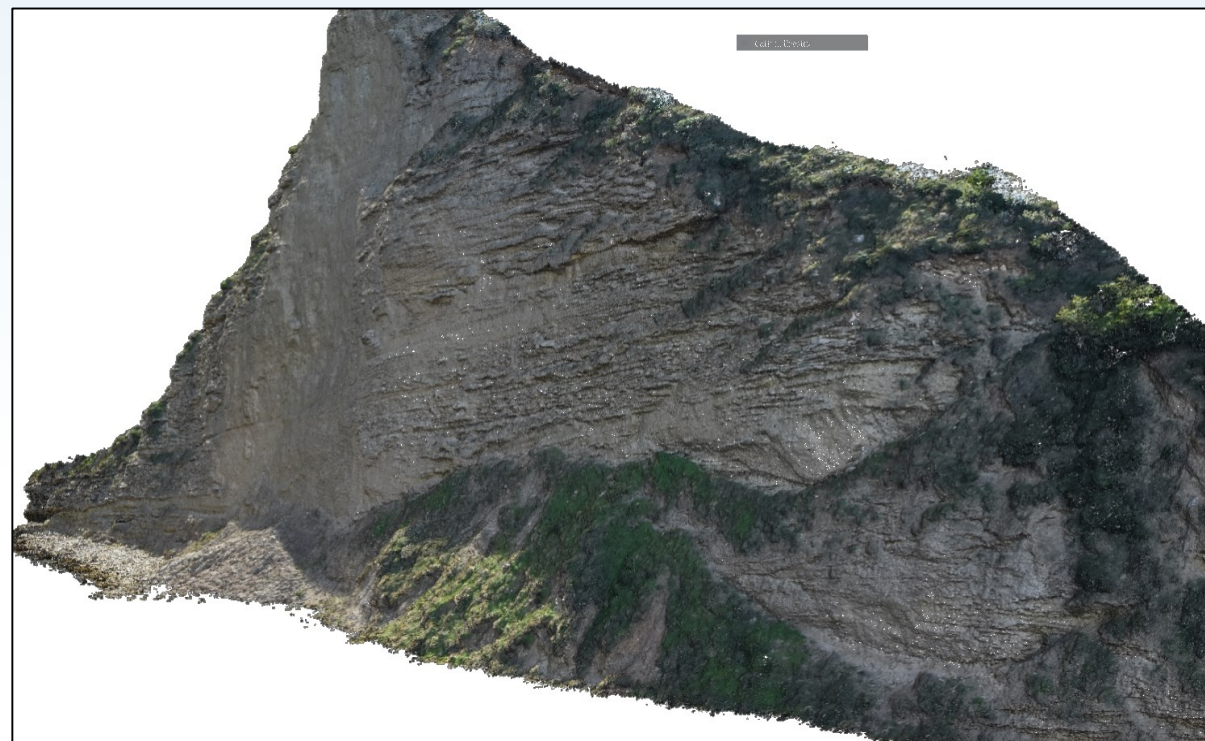
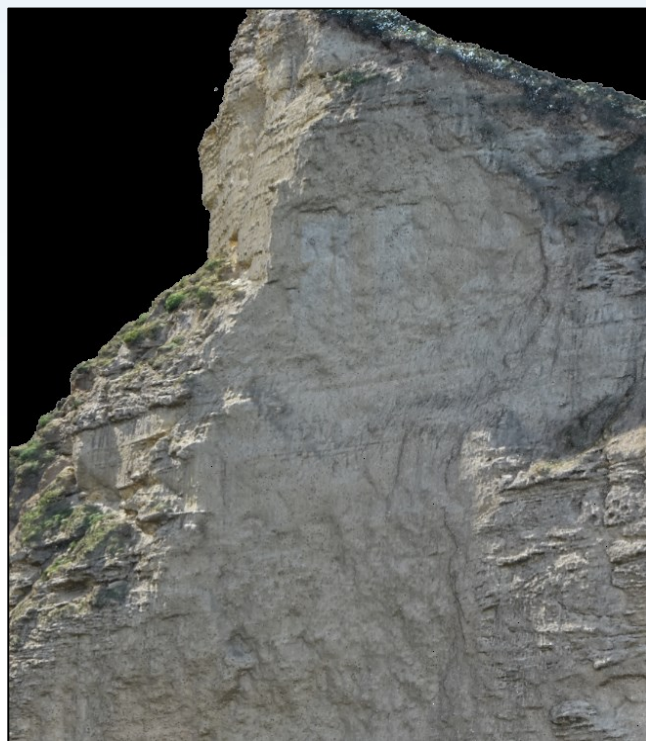
Punti di controllo geografici

6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO



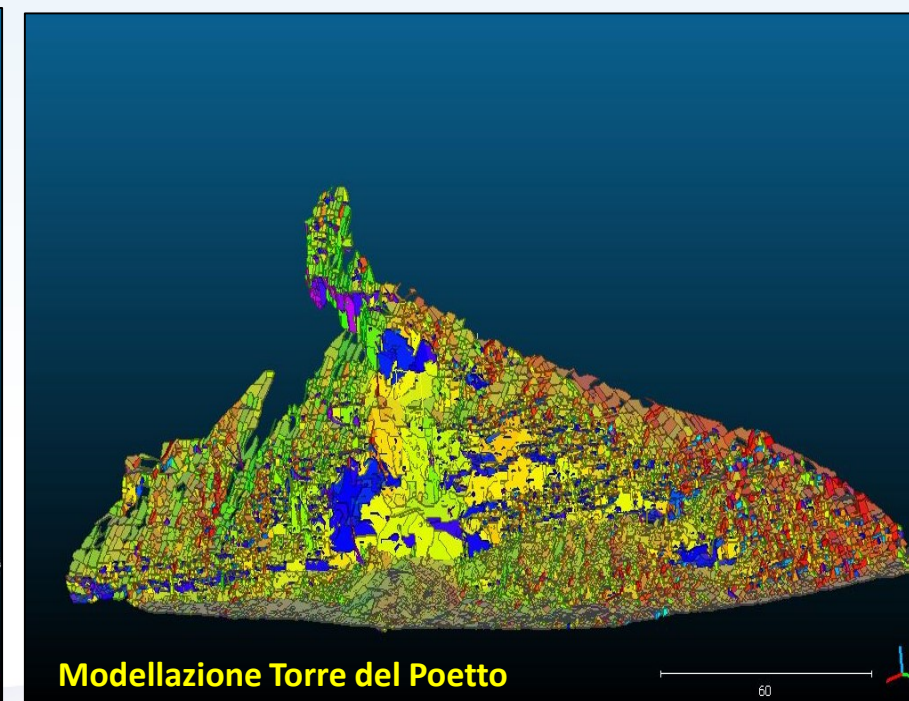
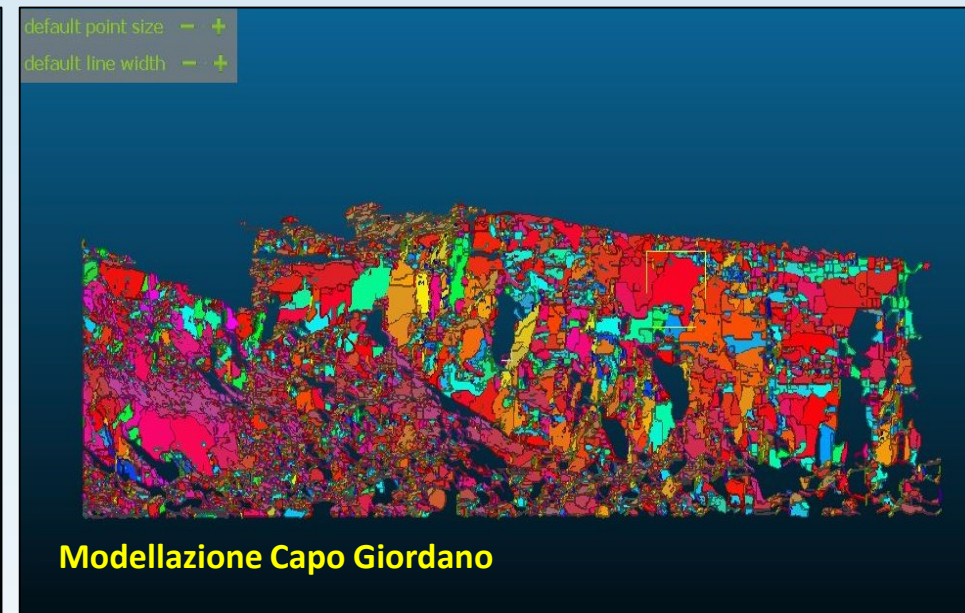
Visione in 3D della punti di vista
ortogonali (Sella del Diavolo)



6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

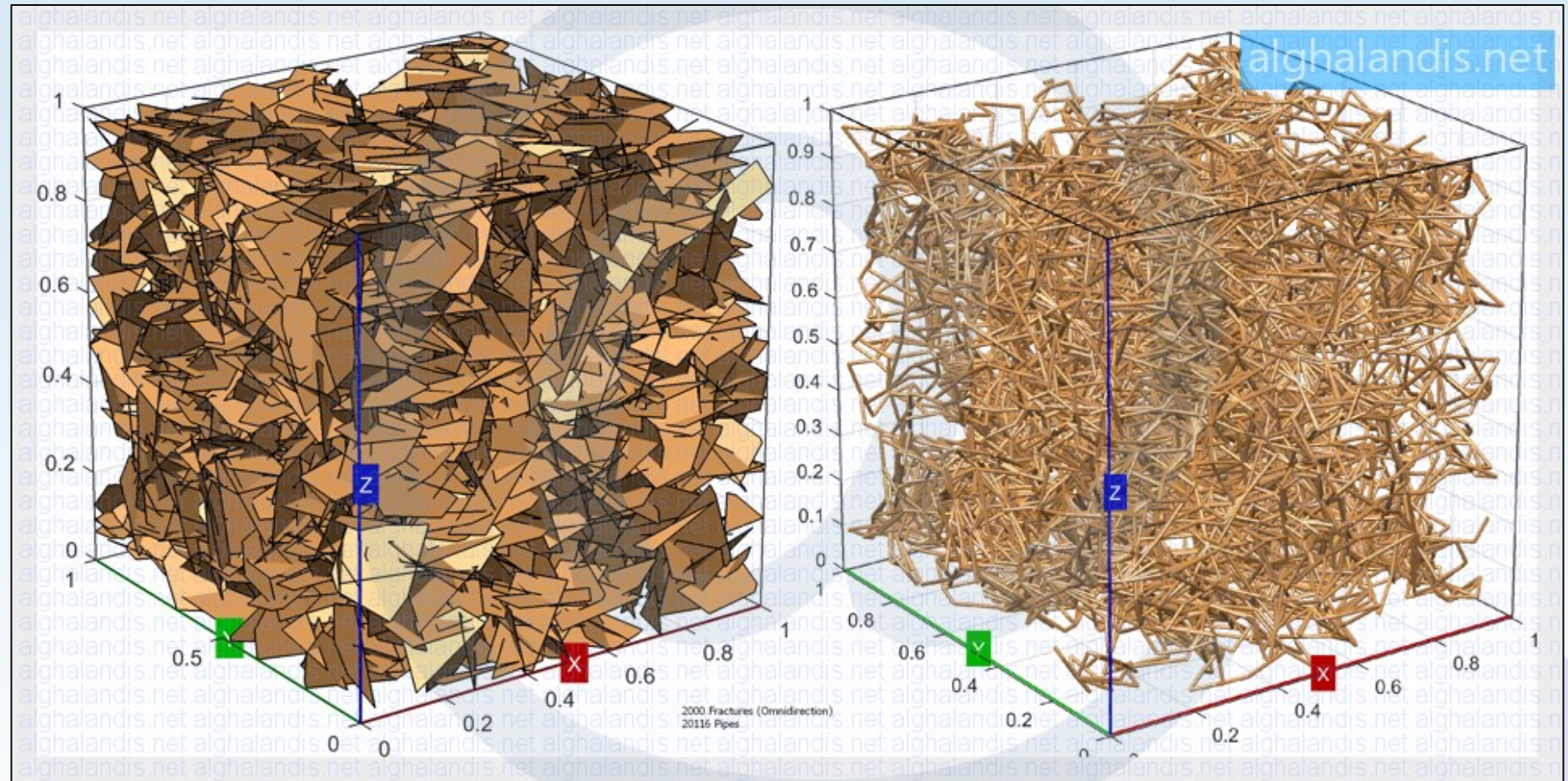
RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO

NUVOLA DI PUNTI E
MODELLAZIONE DELLE
SUPERFICI



6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

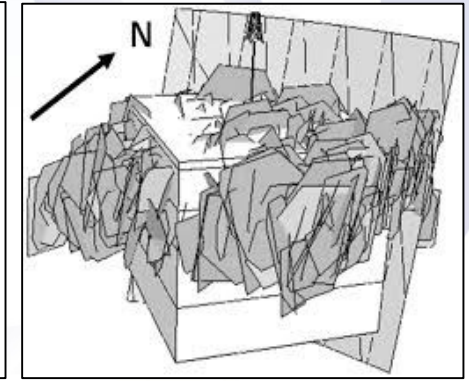
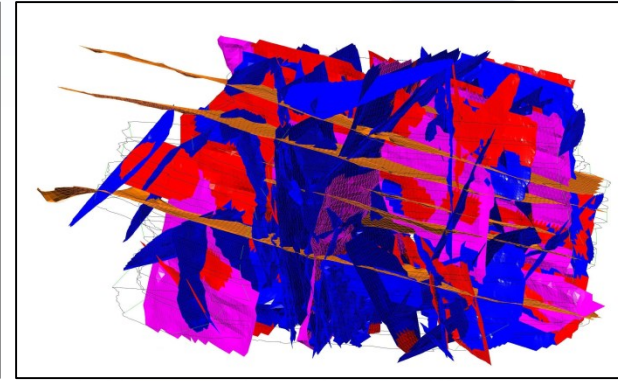
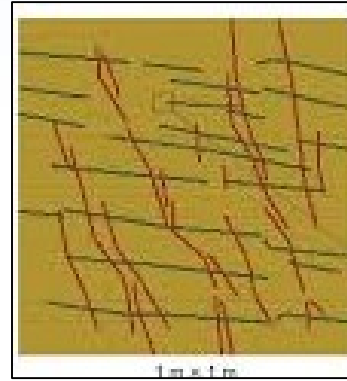
Modellazione Geomeccanica DFN (Discrete Fracture Network)



Dershowitz and Herda, 1992

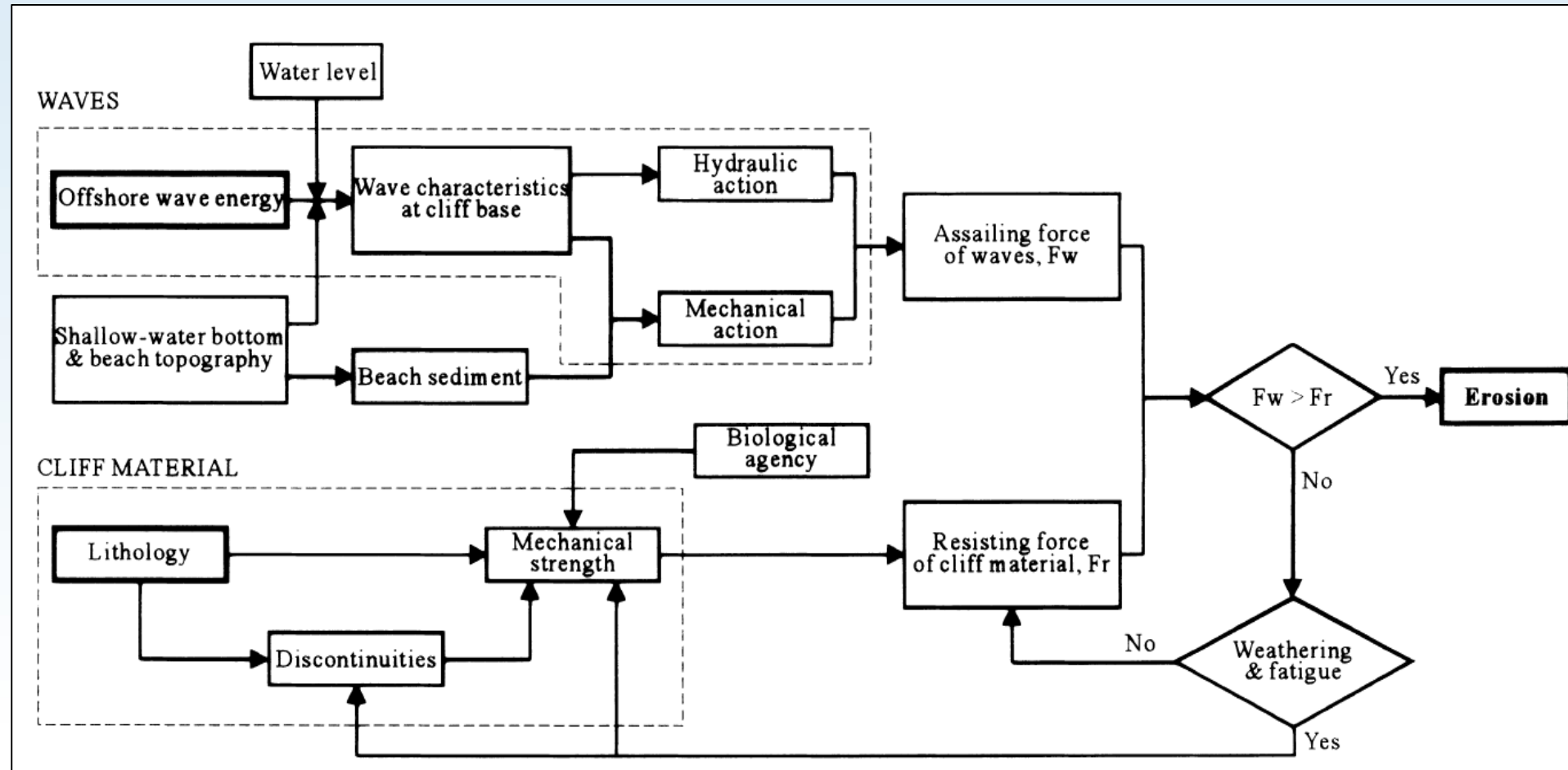
	0	1	2	3	
Dimension of Sampling Region	0	P₀₀ Length⁰ Number of Fracture Samples per Point Length of Rock Mass			POINT MEASURES
	1	P₁₀ Length¹ Number of Fractures per Unit Length of Sample (Fracture Density or Fracture Intensity)	P₁₁ Length¹ Length of Fracture Intensity per Unit Length of Sample (Fracture Porosity)		LINEAR MEASURES
	2	P₂₀ Length² Number of Fracture Centers per Unit Sampling Area (Fracture Density or Fracture Intensity)	P₂₁ Length² Length of Fractures Intensity per Unit Sampling Area (Fracture Porosity)	P₂₂ Length² Area of Fractures per Unit Sampling Area (Fracture Porosity)	AREAL MEASURES
	3	P₃₀ Length³ Number of Fracture Centers per Unit Rock Volume (Fracture Density)	P₃₁ Length³ Length of Fractures Intensity per Unit Volume of Rock (Fracture Intensity)	P₃₂ Length³ Volume of Fractures Intensity per Unit Volume of Rock (Fracture Porosity)	VOLUMETRIC MEASURES

DENSITY INTENSITY POROSITY



Elaborazione dei dati

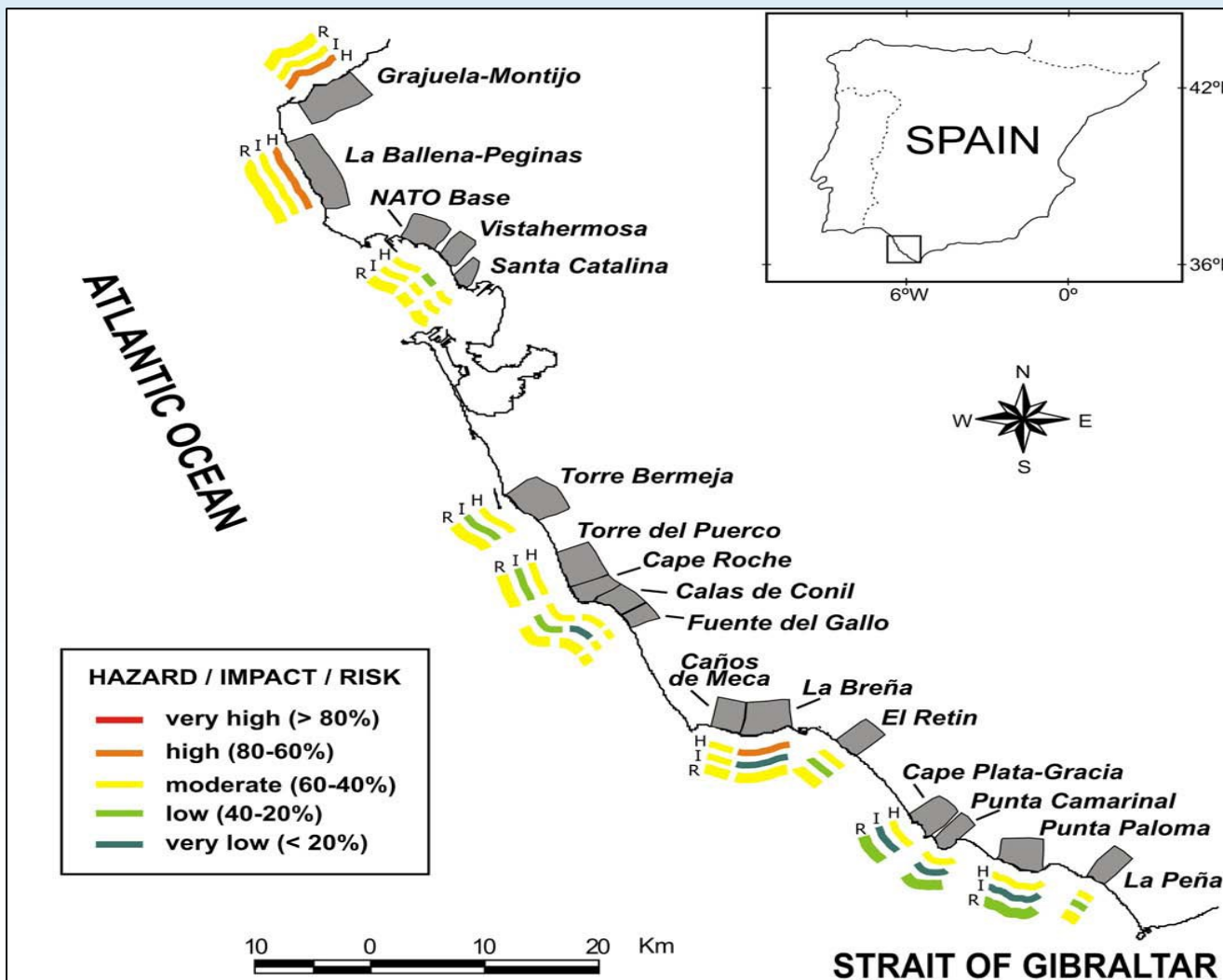
Modelli erosionali + Analisi di stabilità integrate (equilibrio limite, FEM, DFN, ecc.)



Fattori che determinano l'erosione alla base della falesia per effetto del moto ondoso, secondo l'elaborazione del modello di Sunamura (1992) proposto da (Budetta et al., 2000).

Elaborazione dei dati

Metodi semi-quantitativi



Applicazione di un metodo semi-quantitativo per definire suscettività, pericolosità, impatto e rischio di un tratto di costa nella Spagna meridionale. Da Del Rio & Gracia, 2009.

Fattori naturali considerati: litologia, struttura, pendenza, presenza e caratteristiche di spiagge a protezione della falesia o di piattaforme rocciose, variazione della marea, esposizione alle onde, variazione del moto ondoso in caso di tempesta, variazione del livello del mare, precipitazioni

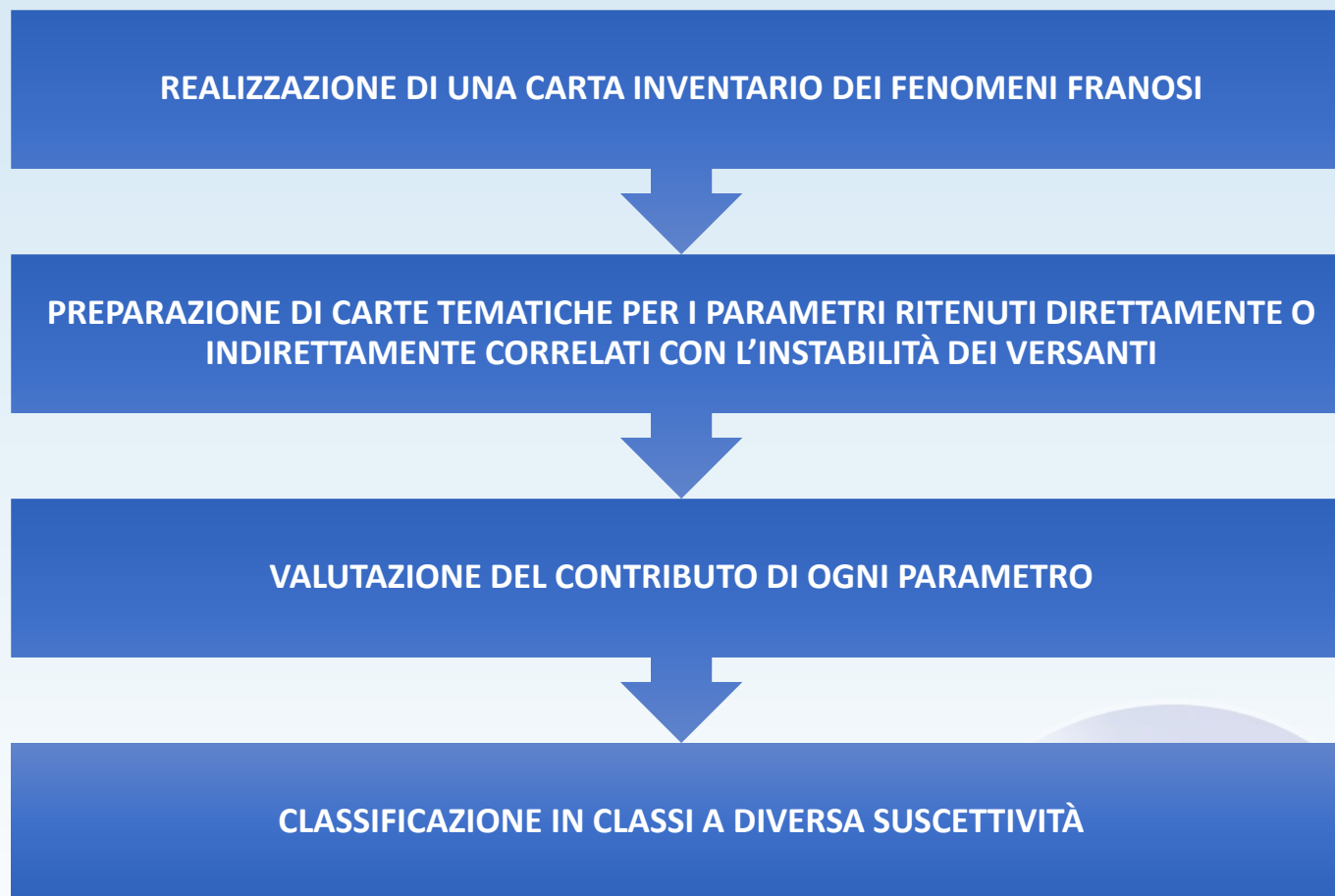
Semi quantitativo in quanto, sebbene presupponga una misurazione di alcuni parametri fisici a cui attribuire un diverso peso, nel lavoro presentato questo viene fatto in maniera arbitraria, con considerazioni derivate dall'esperienza degli autori, come tipico dei metodi euristici e qualitativi.

Elaborazione dei dati

Metodi probabilistici

Metodo del Certainty Factor (CF)- Fattore di Certezza:
metodo diretto statistico di tipo probabilistico

- Limita alcuni eccessi dell'approccio euristico tipici della geologia, ma conservandone la filosofia;
- Quantifica il peso dei diversi fattori geologici.



L'assunto di partenza sta nel fatto che la combinazione dei diversi fattori responsabili del franamento nel passato, possa essere estesa a zone non interessate da frane ma aventi condizioni simili per individuare e localizzare le aree dove si possono verificare nel futuro nuovi movimenti di versante.

Il metodo scelto è un metodo diretto, statistico di tipo probabilistico che per la valutazione del contributo dei diversi parametri correlati all'instabilità, utilizza l'approccio del *Certainty Factor* (CF) ovvero “Fattore di Certezza”.

Elaborazione dei dati

Metodo del Certainty Factor

Il valore di CF esprime la variazione in termini di probabilità al verificarsi di una certa ipotesi (area suscettibile al franamento) relativamente alla presenza o assenza di evidenze note in un intervallo di variazione che varia tra -1 e +1. Valori positivi del CF indicano una maggiore certezza dell'ipotesi fatta, mentre valori negativi determinano una diminuzione delle certezza di eventualità di attivazione di una frana. Un valore del CF prossimo allo zero indica invece che non è possibile fornire un'indicazione circa la probabilità che si verifichi l'ipotesi fatta.

I valori di pp_a e pp_s sono i valori di probabilità che vengono utilizzati per il calcolo del CF. Il valore pp_a viene calcolato come il rapporto tra l'area in frana appartenente ad una determinata classe e l'area totale di quella classe (es.: frane di basalto/area basalto). Il valore pp_s è il rapporto tra la superficie delle aree in frana e la superficie dell'intera area di studio.

Pertanto i valori di probabilità vengono calcolati utilizzando i parametri:

1. Area in studio
2. Area totale in frana nell'area in studio (deriva dai poligoni delle frane censite)
3. Area totale di ogni determinata classe per ogni tematismo (es.: classe basalti nel tema litologia)
4. Area interessata da frana di ogni classe per singolo tematismo (es.: frana composta di basalto)

I valori numerici utilizzati sono misurati come numero di *pixel*.

$$CF = \begin{cases} \frac{pp_a - pp_s}{pp_a (1 - pp_s)} & \text{se } pp_a \geq pp_s \\ \frac{pp_a - pp_s}{pp_s (1 - pp_a)} & \text{se } pp_a < pp_s \end{cases}$$

Alcune considerazioni finali

- L'implementazione tecnologica permette di ovviare alle difficoltà di studio delle coste alte rocciose.
- E' in fase di studio la relazione diretta tra moto ondoso e instabilità dei versanti costieri in roccia.
- La verifica delle relazioni tra i diversi parametri, opportunamente spazializzati, permette di verificare la diversa propensione al dissesto dei vari tratti di costa.
- L'approccio geologico accompagnato da un'analisi statistica può essere il sistema di valutazione della propensione a scala regionale.
- La caratterizzazione geologica dettagliata fornisce un'importante chiave d'interpretazione della tendenza evolutiva di un tratto di costa, nel senso della pericolosità.
- La pianificazione degli interventi non può però prescindere dallo studio dettagliato a scala del singolo versante da parte del geologo.

