
Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Scienze Ambientali: tutela e gestione delle risorse naturali

Ciclo XXVIII

Settore Concorsuale di afferenza: 04/A2

Settore Scientifico disciplinare: GEO/02

TITOLO TESI

**VALUTAZIONE INTEGRATA DEL SISTEMA SPIAGGIA-DUNA COSTIERA,
IN RELAZIONE ALLE DINAMICHE GEOMORFOLOGICHE,
VEGETAZIONALI E METEOMARINE (RAVENNA, ITALIA)**

Presentata da: Dott.ssa Flavia Sistilli

Coordinatore Dottorato

Prof. Enrico Dinelli

Relatore

Prof. Giovanni Gabbianelli

Co-Relatore

Prof. Nicola Merloni

Esame finale anno 2016

SOMMARIO

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1.

DUNE COSTIERE, CARATTERISTICHE GENERALI

1.1 DUNE COSTIERE, IMPORTANZA E MINACCE.....	10
1.2 FORMAZIONE E SVILUPPO DELLE DUNE	16
1.2.1. Fattori fisici	16
1.2.2. Fattori biologici	17
1.3 CLASSIFICAZIONE GEOMORFOLOGICA.....	19
1.4 INTERAZIONE SPIAGGIA-DUNE	22

CAPITOLO 2.

INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO	24
2.2 EVOLUZIONE RECENTE DELL'AREA COSTIERA	28
2.3 INQUADRAMENTO METEOMARINO	37
2.3.1. Settore di traversia, <i>fetch</i> geografico e <i>fetch</i> efficace	37
2.3.2. Regime eolico	39
2.3.3. Pluviometria	42
2.3.4. Livello marino e di "acqua alta" (<i>storm surge</i>)	43
2.3.5. Clima ondosio ed eventi di mareggiate	46
2.4 CARATTERIZZAZIONE MORFODINAMICA DELLA SPIAGGIA	51
2.4.1. Spiaggia emersa	51
2.4.2. Spiaggia sommersa e stima della profondità di chiusura, a breve e lungo termine....	53
2.5 PANORAMICA SULLA VEGETAZIONE COSTIERA RAVENNATE	56

CAPITOLO 3.

VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DA MAREGGIATA

3.1 INTRODUZIONE.....	66
3.2 STIMA DEI VALORI ESTREMI - <i>Extreme value analysis, EVA</i>	68
3.2.1. Metodologia.....	67
3.2.2. Livello idrometrico marino (LIV)	72

3.2.3. Altezza d'onda significativa (Hs) e periodo di picco (Tp)	78
3.2.4. Sopraelevazione totale del livello marino (STM)	80
3.3 CONCLUSIONI.....	81

CAPITOLO 4. CARATTERIZZAZIONE DELLA VEGETAZIONE COSTIERA

4.1 INTRODUZIONE	84
4.2 AREA DI STUDIO	85
4.3 METODOLOGIE.....	88
4.4 RISULTATI	92
4.4.1. Caratterizzazione generale della vegetazione psammofila ravennate	92
4.4.2. Relazioni vegetazione-geomorfologia.....	108
4.5 CONCLUSIONI.....	112

CAPITOLO 5. FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE DUNE EMBRIONALI

5.1 INTRODUZIONE.....	114
5.2 AREA DI STUDIO	115
5.3 METODOLOGIE.....	118
5.3.1. Applicazione della fotogrammetria <i>Structure from Motion</i> (SfM) per il monitoraggio geomorfologico.	121
5.3.2. Comparazione dei rilievi	122
5.3.3. Analisi d'immagine per la valutazione della copertura vegetale	122
5.3.4. Rilievi topografici plot-riva.....	123
5.3.5. Analisi statistiche	123
5.4 RISULTATI	124
5.4.1. Dati meteomarini	124
5.4.2. Dinamica geomorfologica	136
5.4.3. Turn over della vegetazione	150
5.4.4. Monitoraggio sedimentologico.....	154
5.4.5. Rilievi topografici plot-riva	156
5.4.6. Analisi delle relazioni tra componenti.....	158
5.5 CONCLUSIONI.....	167

CONCLUSIONI GENERALI 170

BIBLIOGRAFIA 173

ALLEGATO I - MISURE TRA TARGET RILEVATE AD OGNI RILIEVO 182

ALLEGATO II - RISULTATI DELLE ANALISI GRANULOMETRICHE 184

ALLEGATO III - SERIE DELLE COMPARAZIONI TRA PC, ORDINATE PER CONFRONTI (C) SUCCESSIVI 185

PRODUZIONE SCIENTIFICA

FABBRI S., SCARELLI F., SISTILLI F., CANTELLI L., GABBIANELLI G., 2015. Foredune geomorphological analysis based on laser technology: a proposition to characterize trend in crestline and footline displacement, Ravenna, Italy. Submitted to Geomorphology.

SISTILLI F., SCARELLI F., STECCHI F., FABBRI S., CANTELLI L., GABBIANELLI G., 2015. Spatial and temporal evolution and morphodynamic zonation of the Ravenna shoreface. CM2, Coastal and Maritime Mediterranean Conference, 25-27 November 2015, Ferrara (Italy). <http://www.paralia.fr/cmcm/e03-18-sistilli.pdf>

SCARELLI F., GABBIANELLI G., FABBRI F., CANTELLI L., SISTILLI F., 2015. Geomorphology and territorial evolution characterization from XVI century to present, Ravenna, Italy. ABEQUA, 18-23 October 2015, Tramandà (Brasile).

INTRODUZIONE

Le aree costiere sono territori ricchi di risorse, relativamente accessibili e climaticamente miti rispetto all'immediato entroterra, sono quindi da sempre soggette all'imponente "grande opera" di modifica del territorio da parte dell'uomo.

Dal punto di vista ambientale, la costa è un ecosistema di transizione dove agiscono i processi naturali di entrambi gli ecosistemi limitrofi, quello terrestre e quello marino, un numero elevato di fattori che determinano alle diverse scale spaziali e temporali un equilibrio di tipo dinamico che si realizza con il continuo adattamento delle morfologie.

Questa estrema dinamicità diventa un fattore di sensibilità quando gli impatti delle attività antropiche vanno a modificare e/o interrompere i flussi naturali, come nel caso del ciclo sedimentario costiero dove l'insieme degli impatti antropici ha innescato una condizione di erosione generalizzata che dura da oltre mezzo secolo.

In questo contesto l'opera umana è stata da sempre rivolta al raggiungimento di un certo grado di benessere e sicurezza; la prima legge per la difesa degli abitati è del 1907 con la quale prende piede l'idea che il miglior modo di proteggere gli insediamenti abitativi costieri e le nascenti attività economiche fosse una sorta di "ingessatura" del sistema naturale, contrastando dal punto di vista fisico gli eventi pericolosi, con argini e barriere. Lo stesso è accaduto con i fiumi che ormai, pesantemente artificializzati, non riescono più a garantire un apporto di sedimento sufficiente al mantenimento dei litorali. Tutto ciò ha innescato una fase di erosione che solo in poche isolate località non desta preoccupazione, sia dal punto di vista della sicurezza che della conservazione degli habitat naturali. L'erosione dei litorali insieme con altri fenomeni come la subsidenza e le conseguenze dei cambiamenti climatici in atto, quali innalzamento eustatico marino e intensificazione della *storminess*, definiscono un quadro complessivo preoccupante e di difficile contrasto.

A partire dalle prime decadi del Novecento in poi le coste romagnole, come in generale quelle italiane, hanno subito profonde modificazioni e in particolare una progressiva distruzione delle dune costiere, formazioni eoliche che si sviluppano nella parte interna della spiaggia, al posto delle quali sono sorti stabilimenti balneari, palazzi e infrastrutture. Tale pratica ha sostanzialmente privato il sistema di una delle componenti più efficaci di contrasto all'ingressione marina, essendo l'unico rilievo topografico naturale presente sulle spiagge nonché elemento fondamentale di resilienza (la capacità di recupero delle condizioni di equilibrio dopo un evento di perturbazione).

Nonostante l'introduzione di numerose forme di tutela a vari livelli, la scomparsa delle dune residue è ancora oggi in atto a causa di un sistema divenuto negli anni estremamente precario. La mancanza di un input sedimentario adeguato e le modificazioni dei flussi indotte dalle opere artificiali hanno un impatto negativo rilevante sullo sviluppo delle dune che, sebbene possano

ancora mostrare una dinamica attiva laddove non vi siano impatti antropici, hanno costantemente sempre meno sedimento a disposizione sia per il recupero delle morfologie naturali dopo le mareggiate invernali che per la formazione di nuove dune embrionali in posizione più avanzata. Inoltre, se la mancanza/perdita di sedimento è certamente la causa principale di un generale stato di sofferenza dei sistemi dunosi, un altro fattore decisivo è indubbiamente lo stato di vulnerabilità delle comunità vegetali. È noto, infatti, che la formazione delle dune è intimamente legata alla presenza della vegetazione psammofila, composta cioè da specie adattate alla vita in quest'ambiente particolarmente difficile e selettivo per gli organismi; alcune di queste specie hanno sviluppato adattamenti talmente importanti che contribuiscono attivamente alla formazione delle dune e sono quindi definite "pianta edificatrici". Oggigiorno la costante presenza umana sulle spiagge causa la scomparsa di queste specie in diversi modi: utilizzo di mezzi meccanici per la pulizia, calpestio, diffusione di specie alloctone, introduzione di rifiuti che determinano condizioni di nitrofila estranee a quest'ambiente.

L'oggetto di studio di questo lavoro sono quindi le dune costiere non come elemento isolato ma nell'ottica complessiva di un sistema ambientale dinamico e complesso che coinvolge le forzanti meteomarine, la spiaggia e la vegetazione.

La prima parte dello studio ha uno scopo perlopiù introduttivo al problema di base che è, come appena descritto, la scomparsa delle dune del territorio costiero della provincia Ravenna (Emilia-Romagna). A tal riguardo, è stata effettuata la mappatura in ambiente GIS delle aree di duna, delle opere di difesa costiere e dell'urbanizzazione della costa, a scala secolare (dal 1892 al 2012), andando poi ad analizzare il fenomeno sia da un punto di vista quantitativo (estensioni) che qualitativo (modalità e cause).

Definiti i trend evolutivi generali, l'attenzione si è spostata sui singoli fattori ambientali, fisici e biologici.

Lo studio dei fattori fisici ha riguardato in primis la definizione del quadro meteomarinico di base, andando ad analizzare i dati meteo disponibili per il territorio, con particolare attenzione verso l'analisi degli eventi potenzialmente erosivi quali mareggiate e *storm surge* (o "acqua alta"). Tale analisi ha riguardato sia le frequenze attuali sia le probabilità di accadimento di eventi estremi in termini di sopraelevazione totale marina, in altre parole scenari di pericolosità.

Un breve approfondimento ha riguardato inoltre la caratterizzazione della componente spiaggia, emersa e sommersa. Tale caratterizzazione, da intendersi da un punto di vista teorico e modale, definisce le spiagge naturali dell'area ravennate come spiagge di tipo di dissipativo. Uno sguardo alla spiaggia sommersa poi ha permesso la stima di valori di profondità di chiusura, ordinari ed estremi, cioè del limite verso mare della spiaggia attiva da un punto di vista morfodinamico.

Per quanto riguarda la componente biotica, la ricerca è proseguita con lo studio della vegetazione costiera in relazione al caratteristico sviluppo in fasce parallele alla costa, cioè analizzandone

le serie spaziali vegetazionali in sei diverse località costiere. Questo tipo di analisi ha evidenziato situazioni di disturbo o naturalità in base ai contatti tra le diverse comunità psammofile, all'aggregazione e alla numerosità delle specie, che inoltre sono state valutate in relazione alle principali valibili morfo-topografiche della duna.

Conclusa la fase di approfondimento si è proseguito quindi con il vero e proprio studio integrato incentrato sullo sviluppo delle dune embrionali nell'area naturale della foce del torrente Bevano; in quest'area, a elevata naturalità, l'accesso libero e la balneazione sono vietati per la protezione del Fratino, caradrive a rischio di scomparsa che nidifica nella parte alta della spiaggia. Il monitoraggio di queste formazioni per circa un anno solare ha permesso l'osservazione dei patterns di sedimentazione/erosione, della risposta di tali formazioni ai singoli eventi potenzialmente erosivi, nonché la quantificazione dei tassi di crescita in elevazione. Le diverse componenti rilevate sono state considerate, singolarmente e complessivamente, in relazione alla dinamica geomorfologica, intesa come aree di accumulo, stabilità, erosione e monitorata tramite tecniche di fotogrammetria digitale *ground-based* o terrestre.

In conclusione, l'obiettivo dello studio è stato quello di contribuire alla conoscenza delle dinamiche ambientali del sistema costiero, partendo dalle singole componenti per poi evidenziarne le possibili interazioni, fornendo utili e reali indicazioni per la realizzazione di auspicabili interventi di conservazione e ripristino di questi habitat, tanto importanti quanto minacciati.

CAPITOLO 1.

DUNE COSTIERE, CARATTERISTICHE GENERALI

1.1 DUNE COSTIERE, IMPORTANZA E MINACCE.

Le dune costiere sono formazioni di origine eolica che si formano sul lato interno delle spiagge sabbiose e sono parte integrante del più ampio e complesso ecosistema costiero che comprende la spiaggia, emersa e sommersa, flora e fauna psammofila e forzanti meteo-marine.

Il meccanismo di formazione di una duna vede coinvolte principalmente tre componenti: la sabbia, il vento e la vegetazione. Il vento prende in carico la sabbia asciutta e la rilascia quando incontrando un ostacolo perde la propria energia; comunemente sulle spiagge questi ostacoli sono rappresentati dalle piante ma possono esserlo anche tronchi e biomassa spiaggiata in genere.

La formazione delle dune non è un processo lineare, come spesso accade in natura, poiché le variabili coinvolte e le loro interazioni sono talmente numerose e complesse da rendere davvero difficile il compito di prevedere o parametrizzare tali fenomeni (Bauer *et al.*, 2009); la superficie sabbiosa della duna è costantemente rimaneggiata dal flusso turbolento del vento così che la relazione tra la topografia e il fluido che le scavalca può essere descritta come fortemente cibernetica, risultante in un paesaggio stocastico o non determinato (Nordstrom *et al.*, 1990). L'ambiente costiero nel suo complesso è per antonomasia l'ambiente di transizione, tra mare e terra; ciò si traduce in un'elevata dinamicità delle morfologie che si adattano continuamente alle forzanti meteo-marine assumendo una configurazione di equilibrio dinamico tale da dissipare l'energia del moto ondoso e ridistribuendo i sedimenti in modo che questi non siano dispersi al di fuori del sistema.

Funzioni ambientali

In quest'ottica di bilancio sedimentario costiero stagionale, se la spiaggia è l'elemento centrale di raccordo, le dune e le morfologie sommerse rappresentano gli elementi di "immagazzinamento" del sedimento, una delle funzioni più importanti delle dune costiere.

Nel periodo primaverile-estivo solitamente le condizioni ambientali sono favorevoli per l'accumulo sabbioso nel retrospiaggia. La spiaggia, meno acclive e con poche morfologie (Figura 1.1), ha una maggiore ampiezza e di conseguenza vi sarà più sabbia disponibile alla deflazione eolica; la maggior parte delle piante è nel pieno del proprio sviluppo; i fenomeni meteo-marini intensi che possono dar luogo a erosione sono poco frequenti e in generale le onde marine esercitano un'azione "costruttrice" sulla spiaggia, onde lunghe o *swell waves* (Pranzini, 2004). Con l'arrivo della stagione autunnale-invernale le condizioni meteo-marine generali cambiano, si fanno più energetiche, e mareggiate e *storm surge* diventano frequenti; in partico-

lare le mareggiate (*storm waves*) esercitano sulla spiaggia e sulle dune un vero e proprio “effetto ruspa” asportando buona parte del sedimento, aumentando la pendenza della spiaggia che si fa più stretta e con numerose morfologie erosionali (berme di tempesta, scarpate erosionali). Se l'evento in questione non è di particolar intensità ma si configura nelle condizioni di mareggiata media, di norma questo sedimento si andrà a depositare nei primi metri delle spiaggia sommersa, poiché dopo l'impatto l'onda ha perso la maggior parte della propria energia e rilascia il sedimento. In questo modo la sabbia va ad alimentare il sistema di barre sommerse, intertidali o più profonde, che come le dune rappresentano degli elementi di stoccaggio della sabbia e inoltre, crescendo, esercitano un'azione di dissipazione dell'energia del moto ondoso.

Nuovamente, con l'avvicinarsi della stagione mite primaverile-estiva, le *onde di swell* favoriscono l'avvicinamento/saldamento delle barre sommerse alla spiaggia che, di nuovo, si fa più ampia e dalle pendenze meno pronunciate.

Questa capacità di recupero delle condizioni di equilibrio dopo una perturbazione è nota come *resilienza* e le dune sono quindi un elemento essenziale di resilienza del sistema costiero.

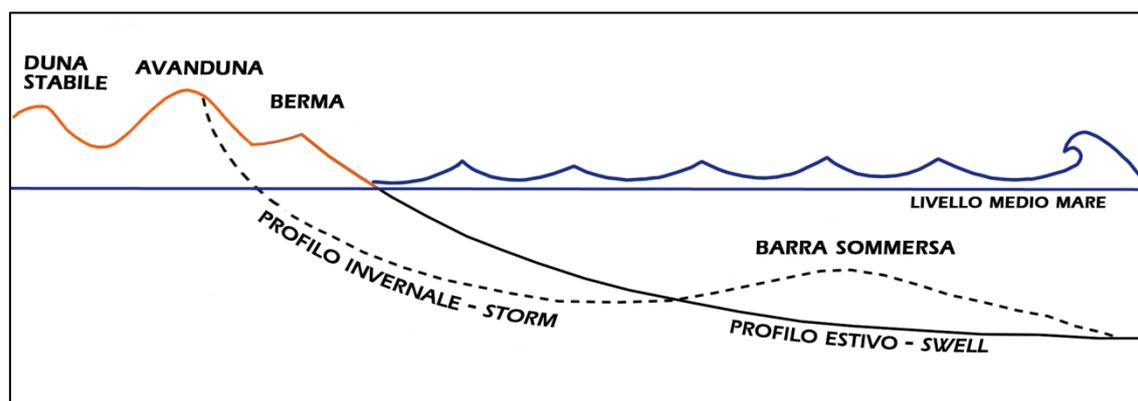


Figura 1.1 – Schema del bilancio sedimentario stagionale teorico del sistema duna-spiaggia emersa-spiaggia sommersa.

Altra funzione, non meno importante della prima, è la capacità delle dune di contrastare l'ingresso d'acqua salata nel sottosuolo, ossia l'ingresso del cosiddetto cuneo salino (Antonellini *et al.*, 2008; Giambastiani *et al.*, 2007). Questo problema, tipico delle zone costiere, si verifica quando l'altezza della tavola d'acqua dolce dell'acquifero freatico costiero non è sufficiente a contrastare la risalita dell'acqua salata dal mare, secondo il principio fisico di Ghyben-Herzberg :

$$Z = h (\rho_w / \rho_s - \rho_w)$$

dove, Z è la profondità dell'interfaccia acqua dolce-salata sotto il livello del mare, h è l'altezza della tavola d'acqua sopra il livello del mare, ρ_w è la densità dell'acqua dolce, ρ_s è la densità dell'acqua salata.

Secondo questa relazione, maggiore è lo spessore d'acqua dolce costiera, maggiore sarà la profondità dell'interfaccia tra le acque; al contrario, se l'acqua dolce viene a mancare vi sarà uno spostamento dell'interfaccia verso terra, Figura 1.2. Oltretutto il rapporto tra le grandezze è di circa 1:40, per cui un abbassamento di 1 cm dell'altezza della tavola d'acqua sul livello medio marino corrisponde a una risalita di 40 cm dell'acqua salata.

Nell'ultimo secolo, i mutamenti subiti dai territori costieri hanno determinato l'intensificarsi di questo problema, in particolare in zone (come l'area di studio) dove buona parte del territorio si trova al di sotto del livello medio marino ed è soggetto a subsidenza. L'urbanizzazione costiera, lo sfruttamento agricolo dei territori nell'immediato entroterra, la presenza di pinete litoranee determina uno sfruttamento intensivo delle risorse idriche e bassi tassi di ricarica naturale.

Le dune costiere, grazie all'elevata capacità d'infiltrazione dell'acqua piovana, sono in grado di accumulare acqua dolce al loro interno contribuendo in modo significativo alla ricarica dell'acquifero.

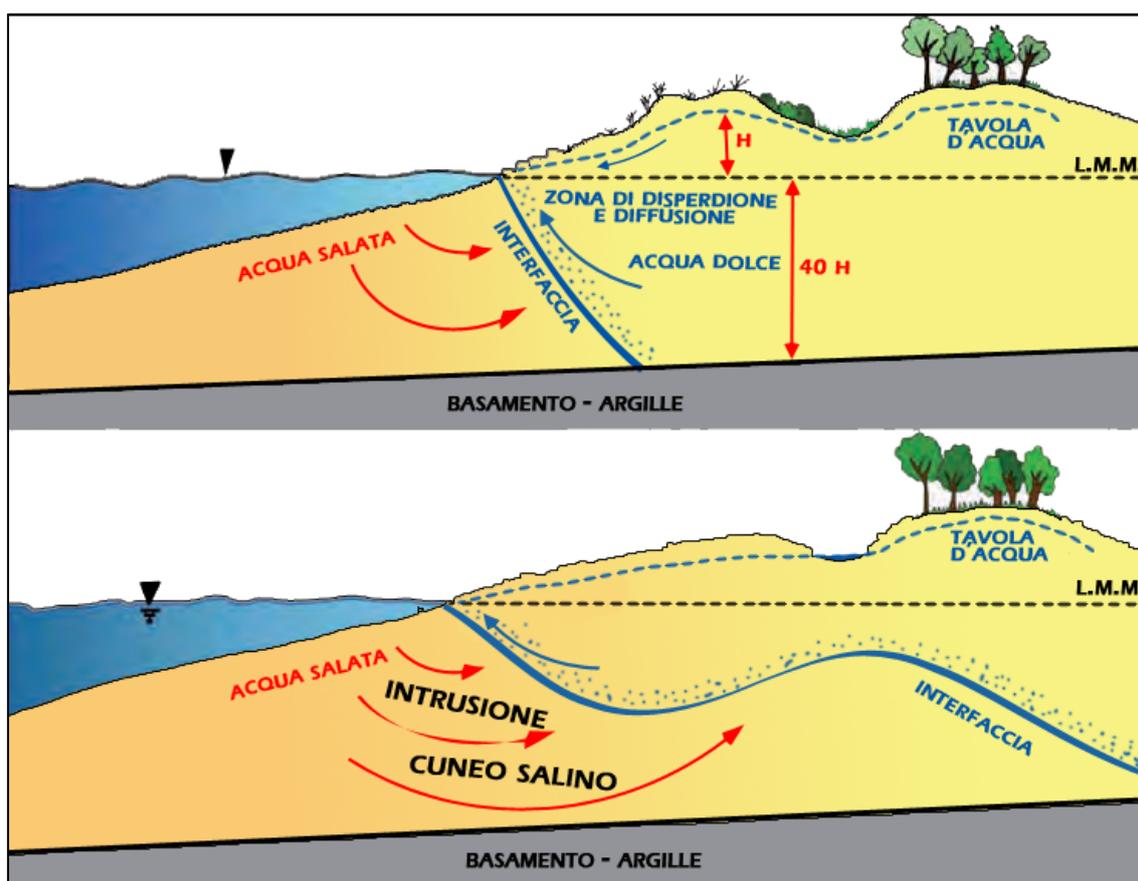


Figura 1.2 – Schema del processo di intrusione del cuneo salino. In alto, la presenza della duna e dell'acqua dolce al suo interno spingono in profondità l'interfaccia acqua salata/acqua dolce; in basso, la mancanza della duna determina l'abbassamento della tavola d'acqua e quindi l'innalzamento dell'interfaccia acqua salata/acqua dolce (modificato da Gabbianelli *et al.*, 2008)

Un ultimo aspetto riguarda infine il valore intrinseco di un ecosistema tanto peculiare quanto minacciato. Una delle caratteristiche più rilevanti è la distribuzione in tutto in globo in associa-

zione a spiagge sabbiose che determina un'eccezionale diversità ecologica, in termini di geomorfologia, di eterogeneità ambientale e variabilità delle specie vegetali e animali. Tale valenza ecologica è risultata fondamentale nei primi studi di ecologia a fine '800, per la definizione stessa di "successione vegetazionale" intesa sia nello spazio sia nel tempo e per lo sviluppo del concetto d'interazione dinamica tra geomorfologia e vegetazione (Martinez *et al.*, 2004). La particolare distribuzione della vegetazione, la cui zonazione è determinata da numerosi e forti gradienti ambientali, permette la coesistenza di differenti comunità di piante in uno spazio relativamente piccolo dove però agiscono dinamiche terrestri e marine, a formare un sistema transizionale ecologicamente fondamentale (ecotono).

Quello costiero è un habitat estremamente selettivo per le piante e ciò è evidente anche dalla ricchezza in specie relativamente bassa se paragonata ad altri ambienti; ciò nonostante, la stretta specializzazione fa sì che in molti casi siano anche specie rare o dal alto valore conservazionistico perché minacciate o endemiche. In riferimento alla Direttiva Habitat (Direttiva n. 92/43/CEE), essenziale in materia di conservazione e tutela degli habitat, Biondi *et al.*, 2009 confermano la presenza di numerosi habitat d'importanza comunitaria di dune costiere, 11 per tutta la penisola di cui 9 presenti in Emilia-Romagna; di questi, tre sono indicati come *prioritari* cioè habitat che rischiano di scomparire e per i quali dovrebbero essere intraprese azioni di conservazione.

La vulnerabilità delle dune

La scomparsa delle dune costiere, un fenomeno che s'intensifica particolarmente nella seconda metà del XX secolo, è imputabile principalmente all'impatto antropico, in forme dirette e indirette.

Tra gli impatti indiretti si possono annoverare tutti quei fenomeni naturali, come l'erosione, la subsidenza e i cambiamenti climatici, che solo a causa delle attività umane sono divenuti dei problemi.

L'erosione delle coste in Italia, secondo Bovina & Sinapi, 2009 riguarda il 24% delle coste basse sabbiose (arretramenti maggiori di 25 metri nel periodo 1950-1999), dovuta in primis alla diminuzione degli apporti fluviali. Le cause dello scarso apporto solido sono da mettere in relazione indubbiamente alla progressiva regimazione degli alvei e, almeno fino agli anni '80, alla pratica di prelevare il sedimento fluviale a scopi edilizi. Tali pratiche privano il sistema costiero dell'elemento di base, la sabbia, che non è più disponibile per la formazione delle spiagge e delle dune. In secondo luogo, ci sono le intense modifiche subite dal drift litoraneo attraverso l'impiego massivo di opere rigide di difesa che ad ogni modo non hanno risolto il problema dell'erosione, soprattutto sul medio e lungo periodo, e in molti casi hanno contribuito al processo di artificializzazione e degradazione degli habitat costieri (Bovina & Sinapi, 2009). L'impiego di pennelli e moli trasversali, com'è noto, risolve il problema dell'erosione della

spiaggia sopraflutto ma lo sposta nell'adiacente spiaggia sottoflutto; di norma tali interventi sono effettuati in corrispondenza di centri abitati, per la protezione dalle mareggiate, spostando quindi il problema dell'erosione nelle spiagge naturali prive di difese.

Tali fenomeni possono essere poi aggravati localmente dalla subsidenza, l'abbassamento topografico del territorio, comune nelle aree di piana costiera. Sebbene la subsidenza sia un fenomeno naturale dovuto al costipamento dei sedimenti, allo stesso tempo può essere aggravata da alcune attività umane, come il prelievo di acque potabili nella falda superficiale e/o l'estrazione di gas metano, che nel tempo privano il sottosuolo di importanti volumi di fluidi. Le conseguenze sono l'arretramento della linea di riva (metri a fronte di pochi cm di abbassamento) quindi una maggiore esposizione ai fenomeni d'ingressione marina, un aumento della pendenza dei fondali e conseguente riduzione del corpo sabbioso costiero (GNRAC, 2006)

Erosione e subsidenza, fenomeni locali e relativi, sono poi da considerare sul medio e lungo periodo nell'ottica dei cambiamenti climatici globali in atto, confermati all'ultimo rapporto IPCC del 2014 (IPCC, 2015), con particolare riguardo all'innalzamento del livello marino e l'intensificarsi di fenomeni estremi. Se complessivamente dal 1901 al 2010 il livello del mare si è innalzato di mediamente di 0.19 m, nelle ultime tre decadi è stato riscontrato un tasso maggiore d'innalzamento, 1.7- 3.2 mm. A tal riguardo, numerosi sono i modelli che tentano di prevedere la risposta del sistema costiero a un innalzamento del livello marino, primo fra tutti il modello di Bruun, 1962, secondo il quale vi sarebbe un arretramento della costa con distruzione del sistema dunoso e accumulo del sedimento eroso nella spiaggia sommersa. Davidson-Arnott, 2005 propone invece un possibile spostamento verso terra dell'intero sistema con erosione della spiaggia sommersa e preservazione del sistema dunoso. Anche in quest'ultimo caso, è evidente la vulnerabilità dei sistemi dunosi che, almeno in Italia, in pochissimi casi sarebbero in grado di evolvere in tal modo, data l'attuale compressione del sistema costiero in una fascia di territorio esigua e densamente urbanizzata.

In merito agli impatti diretti si può far riferimento sostanzialmente ai diversi aspetti dell'urbanizzazione della costa, divenuta importante dal secondo dopoguerra a oggi.

I comuni costieri ospitano il 30% della popolazione italiana concentrati su un territorio pari a circa il 13% del territorio nazionale; il 35.8% della fascia compresa nei 300 m dalla linea di costa (fascia di rispetto minima, con divieto di costruzione a norma del D.Lgs. 490/1999) è urbanizzata, con molte regioni che superano il 50% (ISPRA, 2015). Dove s'insediano palazzi, strade e grandi stabilimenti balneari, i cordoni dunosi sono spianati o ridotti a residui privi di alcuna valenza ecologica. Anche nei tratti liberi da strutture fisse le pratiche di pulizia della spiaggia, distruggono qualsiasi accenno di attività naturale. Il passaggio delle ruspe distrugge le plantule e compatta la sabbia, un'attività effettuata per la rimozione di materiali come tronchi e alghe che da un punto di vista ecologico sono tutt'altro che rifiuti. Oltre al governo estivo, anche in inver-

no le spiagge vengono rimodellate artificialmente secondo la pratica della costruzione dell'argine artificiale invernale, in sostanza un cumulo di sabbia prelevata dalla battigia e accumulata davanti alla struttura da proteggere. Tale pratica è stata criticata più volte in quanto priva il sistema di un naturale adattamento al regime ondoso e quindi favorisce la dispersione della sabbia in mare (Corbau *et al.*, 2009).

Non meno importante è poi l'impatto del calpestio. La pratica di camminare e sostare sulle dune causa in tempi molto brevi una diminuzione netta di copertura (Farris *et al.*, 2013) e l'impovertimento della comunità vegetale che tende a essere povera di specie e meno strutturata, poiché sopravvivono solo le specie più tolleranti (Santoro *et al.*, 2012). La distruzione dalle piante poi provoca la formazione di superficie erosionali dove la sabbia sciolta diviene nuovamente disponibile alla deflazione eolica.

Vi è poi l'inquinamento proveniente da diverse fonti. I materiali biodegradabili derivanti dall'abbandono diretto o dall'apporto fluviale o marino possono dar luogo a fenomeni di locale eutrofizzazione, in un ambiente di per sé povero di nutrienti, che possono favorire l'ingresso nell'ecosistema di specie animali e vegetali aliene a carattere invasivo e/o cosmopolita; le prime possono comportare danni alla rete trofica originaria modificandone le relazioni, le seconde comportano la semplificazione/banalizzazione della comunità biotica. Ancora, un'intesa attività batterica e algale sulla spiaggia può determinare fenomeni *crusting*, ossia la formazione di una crosta che impedisce la movimentazione dei granuli di sabbia (Audisio *et al.*, 2002)

Un ultimo accenno va fatto in merito all'introduzione delle specie aliene. Sebbene in alcuni casi tali invasioni siano dovute all'ampliamento degli areali delle specie stesse a causa dei cambiamenti climatici, il più delle volte l'ingressione di aliene è ancora da imputare alle attività umane cosa che spesso avviene consapevolmente.

L'invasione di comunità naturali da parte di specie alloctone può portare a una drastica riduzione della biodiversità e quindi a una perdita di funzionalità dell'ecosistema stesso. Studi a livello europeo indicano che gli ecosistemi costieri sono tra i più esposti, soprattutto nelle aree retrodunali dove i fattori di stress si fanno meno intensi (Carboni *et al.*, 2010)

1.2 FORMAZIONE E SVILUPPO DELLE DUNE

1.2.1 Fattori fisici

Tra i fattori fisici che agiscono nel processo di formazione di una duna il vento è senza dubbio la forzante principale, l'energia messa in gioco grazie alla velocità è la forza in grado di trasportare il sedimento. Questo meccanismo di trasporto si attiva quando il vento supera una certa velocità soglia (*threshold shear velocity*) che sia in grado di trasmettere alle particelle di sedimento sufficiente energia cinetica in grado da farle muovere. La velocità minima necessaria è soggetta a forze opposte di tipo gravitazionale (peso, dimensione dei granuli) e coesivo (come la presenza di umidità); ad esempio, la velocità minima per il trasporto di granuli di quarzo di 0.2 mm è di 5 m/s (Pranzini, 2004). Tale movimento consiste perlopiù nella *saltazione* e in minor misura nella *sospensione* delle particelle di minori dimensioni.

Il flusso del vento che spirava su una spiaggia piatta può essere concepito come gradualmente accelerato ma al raggiungimento della duna, considerando venti da mare *onshore*, la struttura del flusso può essere sintetizzata, secondo Hsu, 1988, con la descrizione di tre zone principali: una zona di *underspeed*, in corrispondenza del piede della duna, dove il flusso del vento subisce una drastica riduzione in velocità a causa di un aumento di pressione (*stagnazione*); una zona di *overspeed*, in corrispondenza del pendio sopravento della duna fino alla cresta, dove il vento subisce un incremento di velocità; un'ulteriore regione di stagnazione (*cavity*), oltre la duna, dove la velocità si riduce nuovamente. In aggiunta, il processo di stagnazione al piede della duna è favorito da un aumento di pendenza della parete, fino alla verticale, meccanismo fondamentale per la ricostituzione del pendio in contrasto all'erosione marina (Hesp *et al.*, 2005).

Ad ogni modo, questo modello risulta troppo semplice e incompleto se applicato all'ambiente naturale dove molte altre sono le variabili in gioco; tra queste, fondamentali sono la direzione d'incidenza del vento rispetto l'orientazione della spiaggia, l'ampiezza della superficie sabbiosa disponibile alla deflazione eolica (*fetch effect*), la densità della vegetazione e la topografia.

Arens *et al.*, 1995 e Arens, 1996 sottolineano l'influenza della direzione d'incidenza del vento rispetto l'orientazione della spiaggia e delle dune, cioè, il controllo dell'assetto climatico- geografico sulla formazione delle dune poiché sono i venti onshore (da mare verso terra) a trasportare la sabbia dalla spiaggia alla duna. Oltretutto i venti onshore possono essere distinti in perpendicolari e obliqui (>60° dalla normale a costa) (Arens, 1995) e la maggior frequenza e velocità in un settore piuttosto che in un altro da luogo a morfologie differenti. Gli autori dimostrano che la decelerazione e quindi la deposizione al piede dunale è maggiore per i venti onshore in generale ma questa relazione diminuisce con l'aumento dell'obliquità. Quindi, secondo quest'approccio, la maggiore incidenza di venti obliqui produrrebbe depositi di entità minore a causa della minor perdita di velocità.

Ulteriori considerazioni che necessitano di essere accennate riguardano il ruolo dell'ampiezza della spiaggia e dei *supply-limiting factors*, complessivamente denominati *fecht effect* (Bauer *et al.*, 2009; Davidson-Arnott & Bauer, 2009; Delgado-Fernandez, 2010).

L'effetto fecht è l'incremento del trasporto eolico con la distanza percorsa dal vento su di una superficie erodibile, dal punto di zero trasporto; contestualmente, la distanza necessaria per raggiungere il tasso di massimo trasporto per un vento di una certa velocità è la *critical fecht distance* (F_c). Il fecht effect può rivelarsi un problema soprattutto nelle spiagge strette, dove è molto probabile che la massima distanza percorribile dal vento sia comunque minore della F_c , per cui il trasporto eolico reale sarà notevolmente minore di quello teorico. Davidson-Arnott & Law, 1990 dimostrano che F_c cresce al crescere della velocità, riportando F_c maggiori di 30 m per velocità minori di 8.3 m/s. Come già visto, a parità di altre condizioni i venti onshore perpendicolari sono quelli con la massima capacità deposizionale ma ciò può non essere vero per spiagge strette, dove tale situazione può essere completamente stravolta dal fecht effect. Nordstrom & Jackson, 1993 registrano che il trasporto eolico in un giorno di venti obliqui può essere di ben 20 volte maggiore rispetto a un giorno di venti onshore, poiché nel caso specifico i venti obliqui determinavano un fecht di ≈ 37 m e gli onshore di ≈ 18 m. Il fecht effect si verifica anche quando agiscono i cosiddetti *supply-limiting factors*, come la formazione di croste o la presenza di umidità. Se il primo fattore può essere considerato occasionale (Davidson-Arnott & Dawson, 2001) invece la presenza di umidità può essere un fattore limitante di un certo rilievo perché aumenta la velocità soglia del vento necessaria per la deflazione. La formazione di una superficie umida può derivare non solo dalle piogge ma anche durante le mareggiate, surge o le alte maree. In definitiva, se l'ampiezza della spiaggia totale è minore della F_c , il maggior tasso di trasporto sarà dato da un compromesso tra l'incremento del fecht dei venti obliqui e la diminuzione della deposizione netta sulle dune che gli stessi comportano (Bauer & Davidson-Arnott, 2003).

1.2.2 Fattori biologici

Tra le componenti biotiche dell'ecosistema spiaggia-duna il ruolo principale spetta senz'altro alla vegetazione psammofila, letteralmente "amante della sabbia".

In accordo con Hesp, 1983, la vegetazione ha un ruolo decisivo sul controllo della deposizione eolica e ciò dipende primariamente dalla sua densità/copertura; maggiore è la copertura vegetazionale maggiore sarà l'effetto di rugosità che essa determina sul flusso del vento, ossia la diminuzione della velocità del vento per attrito sulle piante e quindi la deposizione del sedimento. Come descritto nel precedente paragrafo, il flusso del vento che incontra il pendio della duna subisce un'accelerazione determinata dalla duna stessa, cioè dal brusco cambiamento della topografia; nel caso in cui il pendio sia vegetato l'accelerazione si verifica solo al di sopra dello strato vegetato mentre al suo interno si verifica una riduzione della velocità, significativa e co-

stante, che determina la deposizione di sedimento sul pendio (Hesp *et al.*, 2005). In sintesi la presenza della vegetazione, quale elemento di rugosità, contrasta l'accelerazione topografica e la dispersione del sedimento verso terra, Figura 1.3. Quello tra vegetazione e deposizione è un rapporto di auto-alimentazione, di *feedback* positivo: la maggior deposizione favorisce la crescita delle piante, le quali aumentano la rugosità determinando un aumento nella deposizione (Hesp, 1989). Tra i numerosi fattori ambientali limitanti, probabilmente quello del continuo seppellimento è il più importante rispetto alla selezione della comunità psammofila (Maun, 2009).

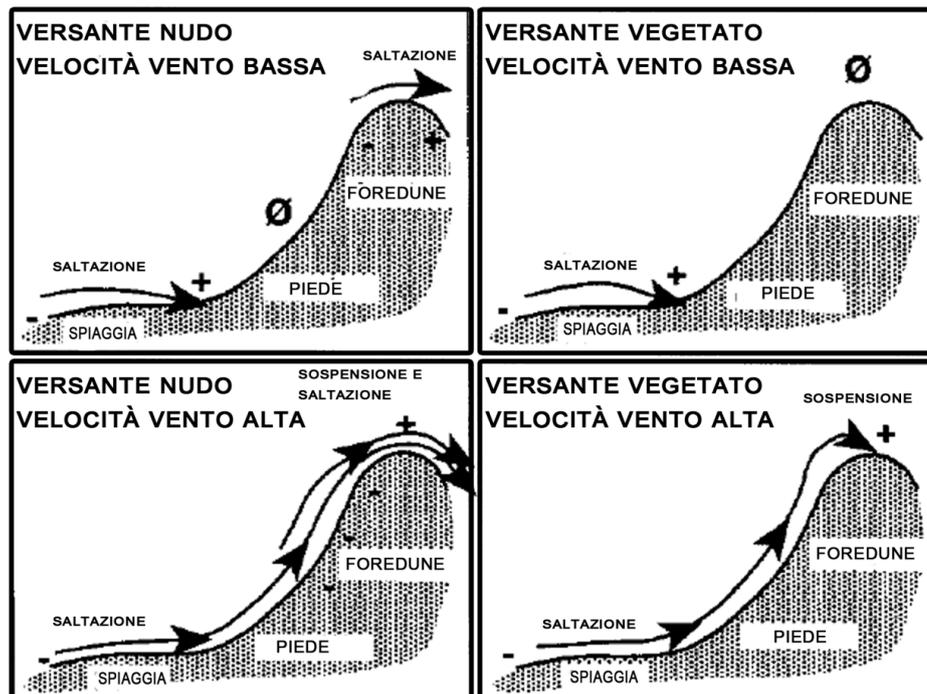


Figura 1.3 – Meccanismi del trasporto eolico in una duna priva di vegetazione (a sinistra) e vegetata (a destra); per velocità del vento minori (in alto) e maggiori (in basso). Il simbolo + indica deposizione, il simbolo - indica erosione e Ø indica zero trasporto (modificato da Arens, 1996).

Da un punto di vista ecologico, una volta che le prime piante pioniere e alo-tolleranti colonizzano una spiaggia, esse cominciano a intrappolare la sabbia agendo come un meccanismo di selezione per specie che tollerano il seppellimento, quindi specie edificatrici della duna. La formazione della duna embrionale/avanduna a sua volta riduce lo stress da salinità (dovuto alla vicinanza degli apparati radicali all'acqua salata in falda) e il trasporto eolico verso terra, creando le condizioni per la presenza di nuove specie, per la competizione ecologica e l'instaurarsi e l'evolvere di una successione vegetazionale costiera specifica per il territorio (Duran & Moore, 2013). La vegetazione determina i pattern di sedimentazione e quindi la morfologia della duna (Keijsers *et al.*, 2015), ad esempio agendo sul grado di connettività, con la formazione di un cordone continuo parallelo a costa piuttosto che di accumuli discontinui *hummocky* (Hesp, 2002).

1.3 CLASSIFICAZIONE GEOMORFOLOGICA

Secondo Hesp, 2011 sono quattro i principali tipi di dune che possono essere distinti in base a diversi parametri (regime di vento, disponibilità di sedimento, copertura della vegetazione) e diversi processi evolutivi: *foredune*, *blowout*, dune paraboliche e campi di dune trasgressivi.

Poiché le ultime due categorie non sono d'interesse in questo studio, di seguito saranno trattate esclusivamente le prime due.

Un altro metodo di classificazione, meno diffuso ma altrettanto interessante, divide le dune in primarie e secondarie (Davies 1972,1980 in Nordstrom *et al.*, 1990). Sono *primarie* le dune il cui apporto sedimentario deriva direttamente dalla spiaggia antistante mentre sono definite *secondarie* le dune che derivano dall'erosione delle primarie, cioè quelle dune che da un punto di vista strettamente geomorfologico sarebbero dune consolidate e ciò è riscontrabile in maniera diretta dal tipo di vegetazione ma che trovandosi su una spiaggia in forte erosione vengono riativate o erose al piede.

Infine, un ultimo accenno va fatto al lavoro di Nordstrom, 1994, secondo il quale le alterazioni dovute alle attività umane possono essere considerate parte integrante dell'evoluzione del territorio. Infatti la maggior parte delle classificazioni, come quelle fin qui riportate, riguardano esclusivamente morfologie ed evoluzione in assenza di impatto antropico diretto, mentre Nordstrom, 1994 considera e analizza le formazioni parzialmente o totalmente interessate dalle attività umane.

Foredune

Il termine *foredune* indica un cordone dunoso parallelo a costa, formatosi grazie alla deposizione di sabbia da parte del vento entro la fascia vegetata nella zona di retrospiaggia supratidale (Hesp, 2002). Le morfologie possono essere anche molto diverse a seconda delle forzanti ambientali caratteristiche del territorio ma ciò che caratterizza la *foredune* è la posizione più avanzata verso mare rispetto al sistema dunoso nel suo complesso.

Sempre in riferimento alla classificazione introdotta da Hesp, 1989, 2002, 2011 le *foredune* possono essere incipienti (*incipient*) o stabilizzate (*established*).

Le dune incipienti, sono le dune attive che scambiano attivamente sedimento con la spiaggia antistante e rappresentano un elemento fondamentale del bilancio sedimentario costiero. Possono essere distinte in dune embrionali (*embryo dunes*), di recente formazione, e in dune frontali (*frontal dunes*) che vanno a costituire il vero e proprio cordone dunoso attivo, in italiano conosciute con il termine di avandune.

La loro formazione può avvenire a partire da ciuffi discreti di piante o individui singoli isolati, a formare *shadow*, *mounds* o *nebka dunes*, oppure a partire da zone vegetate più ampie relativamente continue lungo il retrospiaggia (Hesp, 1989).

A parità di altri fattori, la vegetazione indubbiamente ha un ruolo essenziale nella determinazione dei pattern di sedimentazione e quindi delle morfologie (Hesp, 1983, 1989, Van Dijk *et al.*, 1999); ad esempio, gli alti e densi ciuffi di *Ammophila spp.*, pianta a elevata componente di rugosità e quindi di capacità di accumulo, formano dune alte dalla morfologia a punta; mentre la presenza di *Spinifex spp.*, in Italia vi è rimpiazzata da *Elytrigia juncea.*, produce dune basse ed estese. Oltre alla vegetazione, poi, a seconda dell'evoluzione della spiaggia, del tasso di trasporto eolico e dei fenomeni di erosione, le dune possono evolvere in tre morfologie principali: si formano *ramps* quando la vegetazione si espande verso mare, rispetto alla zona occupata originariamente, oppure quando cresce sul deposito alla base di una duna erosa; *terrace* si formano su spiagge in rapido accrescimento con veloce crescita delle piante; *ridge* si formano dove l'accrezione è abbastanza rapida e la deposizione avviene in primis nel lato verso mare della fascia vegetata.

Parte integrante del sistema dunoso sono poi le depressioni interdunali (*swale*) che si formano come zona di non deposizione del sedimento nel lato verso terra della duna stessa; più alta è la duna più profonda sarà la depressione. Generalmente sono continui lungo costa ma una maggiore complessità ambientale può dar luogo a depressioni localizzate.

La *foredune* diventa una duna stabilizzata quando l'apporto sedimentario si riduce drasticamente a causa della formazione di una nuova avanduna verso mare che intercetta la maggior parte della sabbia. Quando ciò si verifica, la vegetazione e il suolo evolvono progressivamente fissando il substrato sabbioso che comunque conserva la morfologia originaria.

Hesp, 2002 classifica le *established foredune* in cinque stadi morfologici attraverso i quali la duna può progredire, da 1 (molto stabile, ben vegetata, morfologia semplice) a 5 (residui in forte erosione, *sand sheet* e *blowout*). Ogni stadio rappresenta la condizione in cui la duna rimane per la maggior parte della sua esistenza oppure la condizione in cui si troverà a seconda dell'evoluzione della spiaggia, dell'evoluzione della copertura vegetale e il verificarsi di episodi erosivi. Tale progressione può invertirsi in alcuni casi, ad esempio per un rinnovamento della copertura vegetale e quindi una nuova stabilizzazione.

Blowout

Un *blowout* è una morfologia erosionale, tipica dei sistemi dunosi, che si presenta come una depressione localizzata all'interno di un accumulo eolico. In linea generale il blowout si manifesta laddove per svariati motivi, di origine naturale o antropica, viene a mancare la copertura vegetale e la sabbia viene nuovamente presa in carico dal vento; si forma quindi una superficie di deflazione in cui la sabbia viene asportata per poi essere ridepositata in un lobo deposizionale. Cooper, 1958 individua due tipologie di base che diventano tre in Hesp, 2011:

- *saucer blowout*: dalla forma semi-circolare e poco profondo
- *trough blowout*: dalla forma allungata e molto profondo, con ripide pareti laterali

- *bowl blowout*: sono l'evoluzione dei saucer blowout, quando diventano molto grandi e profondi.

Nordstrom, 1988 individua tre direzioni preferenziali dei blowouts che dipendono in ordine d'importanza dalla direzione del principale vento di tempesta, dalla direzione degli attraversamenti pedonali e dalla direzione del vento dominante.

Quando il processo prende il via si autoalimenta, poiché il vento è accelerato alla base e sulle pareti laterali, che sono le più soggette a crolli.

1.4 INTERAZIONE SPIAGGIA-DUNE

Il modello d'interazione proposto da Hesp, 1982, 1988, 2012 ha le proprie basi nel modello morfodinamico per le spiagge microtidali introdotto da Wright & Short, 1984 che si rifà al concetto di *stato morfodinamico*, in cui processi idrodinamici e forme deposizionali sono strettamente associati. Secondo Wright & Short, 1984 i due stati estremi sono *fully dissipative* e *highly reflective*, rispettivamente spiagge piatte con abbondanti riserve di sedimenti in morfologie sottomarine e spiagge molto inclinate con piccole riserve subacquee; ai due estremi si aggiungono quattro stadi *intermediate*.

In sintesi, si evidenzia come le spiagge dissipative mostrino il massimo trasporto eolico potenziale mentre per le spiagge riflettive sia minimo, nello specifico:

- in relazione all'ampia *surf zone* (zona dei frangenti), le spiagge dissipative mostrano la più elevata capacità di trasporto onshore da parte del moto ondoso.
- in relazione all'ampiezza della spiaggia, le spiagge dissipative mostrano solitamente le maggiori estensioni e quindi maggiori aree di fecht per la deflazione eolica
- in relazione alle morfologie della spiaggia, sulle spiagge dissipative, piatte o leggermente concave, il flusso del vento mostra una graduale accelerazione lungo il retrospiaggia massimizzando il trasporto eolico.

A tal riguardo, Short & Hesp, 1982 trovano che la foredune può essere 10 volte più alta in una spiaggia dissipativa; Houser & Mathew, 2011 segnalano che un aumento nell'ampiezza del fecht è correlato a una maggiore altezza della duna. Hesp, 1988 trova, in Australia, che a parità di altre condizioni, una spiaggia dissipativa può ricevere fino al 60 % in più di sabbia rispetto a una riflettiva. Miot da Silva & Hesp, 2010 trovano, in Brasile, che le più ampie foredune si trovano nei tratti di spiaggia dissipative a media e alta energia.

Infine un ultimo aspetto molto interessante riguarda il controllo della morfodinamica sulla comunità biologica, infatti, sempre secondo Hesp, 2012 e in accordo con Maun, 2009, tra i fattori che maggiormente incidono sulle caratteristiche della comunità vegetale vi sono il seppellimento e l'aerosol marino. Su spiagge dissipative, con le più ampie surf zone, il frangimento delle onde è maggiore e di conseguenza è maggiore l'intensità dell'aerosol marino e come descritto in precedenza anche l'apporto di sabbia risulta maggiore. Per questo, a parità di altri fattori, le spiagge dissipative mostrano comunità con ricchezze specifiche minori e zonazioni più ampie.

CAPITOLO 2.

INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area di studio comprende la zona costiera della provincia di Ravenna, circa 45 km della costa dell'Emilia-Romagna bagnata dal Mar Adriatico, Figura 2.1.

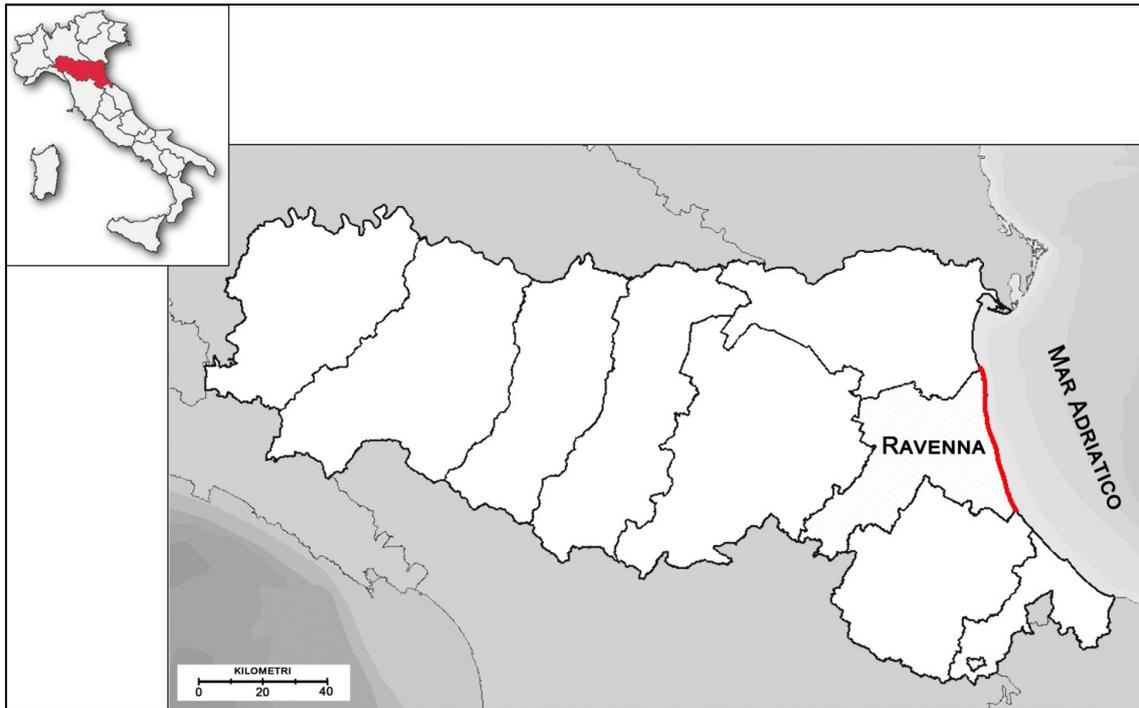


Figura 2. 1 - Area di studio. Zona costiera della provincia di Ravenna, Emilia - Romagna, Italia.

Il tratto costiero in questione è composto da spiagge sabbiose a basso gradiente, la maggior parte delle quali a forte grado d'antropizzazione e utilizzate nel periodo estivo per scopi turistico-economici. Sin dagli anni '50- '60 del XX secolo, infatti, tutta la zona costiera della regione ha visto un progressivo e incalzante sviluppo urbano della costa e parallelamente delle attività economiche legate al turismo balenare. Tutto ciò oltre che una fiorente economia turistica ha comportato anche una pesante perdita di habitat naturale e compromissione delle dinamiche costiere, come meglio descritto in seguito.

In alcuni tratti le spiagge sono ancora orlate da dune costiere che nella maggior parte dei casi si presentano come residui isolati e frammentati, seppur a volte di buone dimensioni come nel caso della duna costiera di Porto Corsini o della duna Giacobazzi a Marina di Ravenna. Due sono le zone a elevata naturalità, la prima a nord è la zona umida *Vene di Bellocchio*, una zona naturale di barriera-laguna, quindi estremamente dinamica e mutevole; la seconda, nella parte meridionale del territorio è la Riserva Naturale della Duna Costiera Ravennate e della Foce del Tor-

rente Bevano, caratteristica per la presenza di un cordone dunoso sostanzialmente continuo di circa 6 km.

Lo studio nelle sue diverse sezioni è stato eseguito a diverse scale e in diverse zone, comprendendo volta per volta l'intera area di studio, transetti spiaggia-duna in diverse località costiere e infine micro aree di dettaglio nella zona naturale di Foce Bevano.

2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO- GEOMORFOLOGICO

Da un punto di vista geologico- geomorfologico l'area in esame fa parte della pianura costiera Romagnola che a sua volta rappresenta il settore sud-est della piana alluvionale del Po. La formazione della piana costiera è da riferirsi sostanzialmente al periodo post glaciale (da 6 ka in poi) quando gli apporti fluviali diventano dominanti sull'erosione marina e la subsidenza sull'eustatismo (Bondesan *et al.*, 1995).

Precedentemente a questa fase, l'evoluzione sedimentaria della zona è stata determinata sostanzialmente dalle variazioni climatiche globali, quindi dalle variazioni eustatiche del livello marino, in particolare riferibili all'ultimo periodo glaciale *Wurm*, determinando un'alternanza di depositi marini e continentali.

I primi studi stratigrafici dei depositi del tardo Quaternario sono attribuibili a Rizzini, 1974 per l'area a sud di Ravenna e a Bondesan *et al.*, 1995 per l'area ferrarese. Entrambi gli studi mettono in luce la presenza di depositi riferibili a un ciclo trasgressivo- regressivo di età olocenica, di 20-30 metri di spessore, sovrastante depositi continentali pleistocenici (Amorosi, 1999), Figura 2.2.

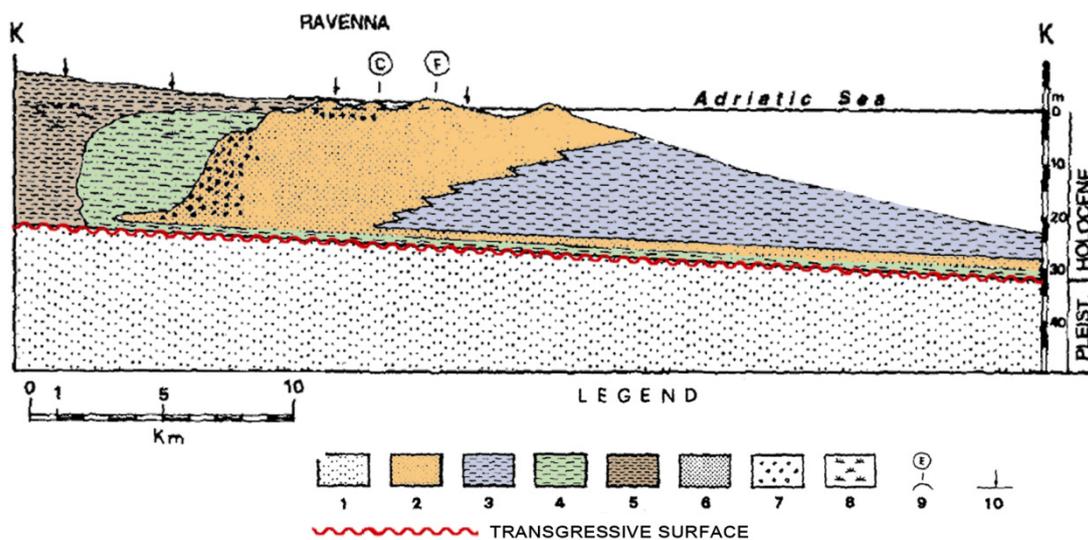


Figura 2. 2 - Sezione geologica schematica del settore da Ravenna. Tardo Pleistocene: (1) sabbie e silt di facies continentale. Olocene: (2) facies di sabbie costiere; (3) argille e silt di facies marina; (4) argille e silt di facies lagunare; (5) argille e silt di facies continentale; (6) sabbie fluviali; (7) ghiaia; (8) torba; (9) principali cordoni costieri affioranti; (10) sondaggio geotecnico (modificato da Bondesan *et al.*, 1995 e Veggiani 1974).

Più recentemente, Amorosi *et al.*, 1999, 2005 ricostruiscono l'evoluzione sedimentologica della pianura costiera Romagnola per il tardo Pleistocene-Olocene.

In generale, le fluttuazioni del livello del mare in relazione alle variazioni climatiche mettono in evidenza un'asimmetria con lunghi periodi in cui il livello marino subisce un progressivo abbassamento ($\approx 125-18$ ka) seguiti da una rapida fase di risalita ($\approx 18-6$ ka) e una fase di *high-stand* (Alto stazionamento) corrispondente agli ultimi 6000 anni (Amorosi *et al.*, 1999).

Da un punto di vista crono-stratigrafico gli autori individuano tre unità sedimentarie principali che possono essere riferite alle classiche suddivisioni in *system tracks*.

Una prima fase regressiva e di basso stazionamento (FST- LST) composta da uno spesso strato di sedimenti alluvionali continentali pleistocenici. In questo periodo il livello marino subisce un lento e progressivo abbassamento arrivando fino a circa -120 m dal livello attuale; la linea di costa era ubicata a circa 250 Km a sud rispetto all'attuale e tutta l'area dell'alto Adriatico era una vasta pianura alluvionale.

La seconda fase trasgressiva (TST), è rappresentata da un gap stratigrafico (25-8 ka) che corrisponde alla superficie della trasgressione Flandriana (*ravinement surface*). In questa fase il livello marino risale rapidamente determinando la migrazione verso terra di successivi sistemi di barriera-laguna. Alcuni di questi sistemi deposizionali relitti, sommersi nell'Adriatico a decine di km dalla costa attuale, vennero identificati già in Colantoni *et al.*, 1979. La fase trasgressiva è rappresentata quindi da depositi di retro-barriera sottili e discontinui. Il limite superiore di questi depositi rappresenta la massima superficie di risalita marina (MFS) che marca il passaggio dalla fase trasgressiva a quella di progradazione durante l'Optimum climatico (6 ka), quando la linea di costa era ubicata a circa 20 km nell'entroterra dall'attuale.

Quest'ultima è la fase di alto stazionamento (HST), ancora in corso, durante la quale avviene appunto la formazione della piana alluvionale e dell'antico delta arcuato (*wave-dominated*) del Po (Amorosi *et al.*, 1999), testimoniata da più sistemi di cordoni litoranei (Bondesan *et al.*, 1995), Figura 2.3.

L'evoluzione tardo-olocenica dell'area ravennate è intimamente connessa alle vicende idrografiche del Po. All'eustatismo e alla subsidenza, si aggiungono in epoca storica e contemporanea le modificazioni territoriali apportate dall'opera umana: deviazioni dei corsi fluviali, opere di bonifica dei terreni paludosi, espansione dei centri urbani costieri.

La repentina progradazione dell'antico sistema deltizio del Po riferibile massimamente ai paleoalvei del Po di Spina e al Po di Primaro (fino all'età romana-VI secolo d.C.) determina la progradazione della pianura costiera compresa tra Comacchio e Ravenna, attraverso la progressiva formazione di cordoni litorali sempre più avanzati e recenti, Figura 2.3 (Amorosi, 1999).

Tra il 13° e il 15° secolo, con la "rotta di Ficarolo" l'alveo principale del Po si trasferisce verso Nord e inizia così la costruzione del delta moderno; questo evento determina l'abbandono del

sistema deltizio meridionale, Po di Primario, sul quale s'innesta un processo di trasformazione verso un ambiente di barriera -laguna, a causa della forte subsidenza locale.

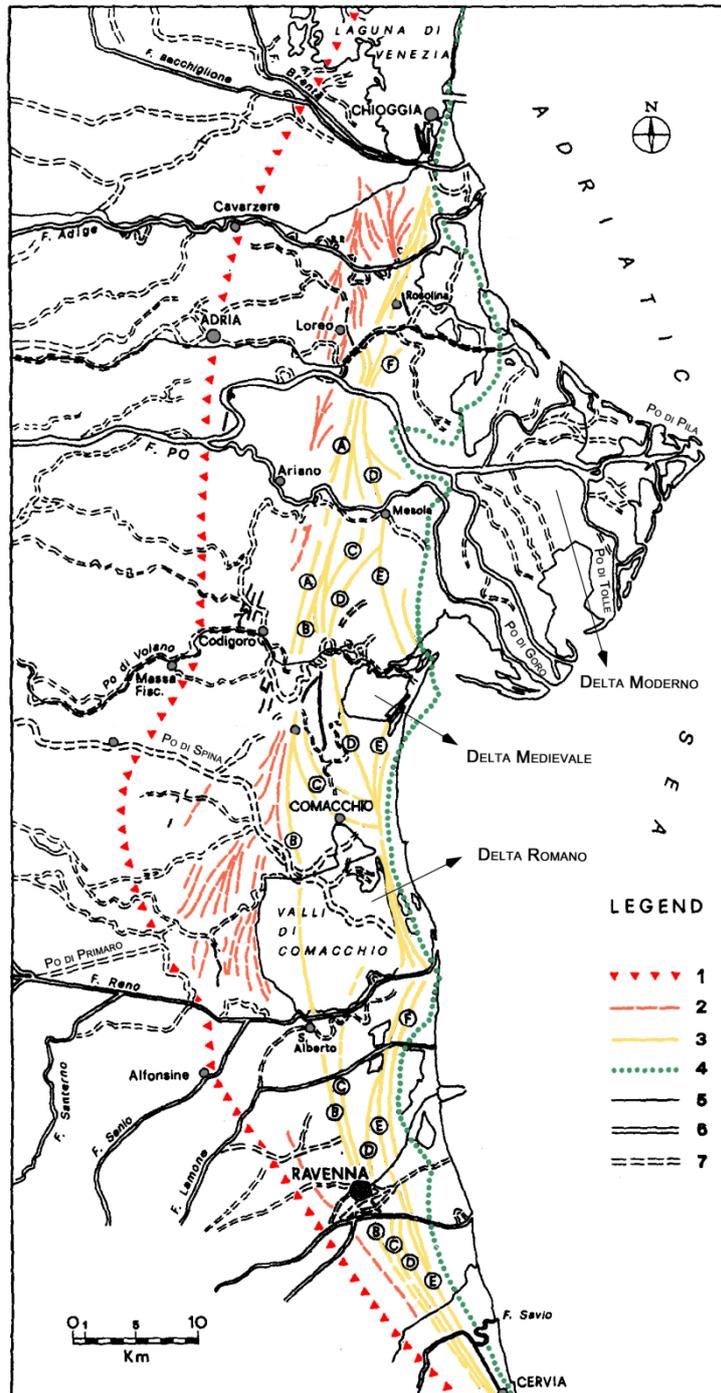


Figura 2. 3 - Mappa geomorfologica: (1) possibile posizione della linea di costa durante la fase di massima trasgressione marina; (2) cordoni litoranei sepolti; (3) cordoni litoranei affioranti di diverse età (A= transizione subboreale-subatlantica; B= 6°-4° secolo a.C.; C= 1°-2° secolo d.C.; D= circa 5° secolo d.C.; E= circa 10° secolo d.C.); (4) linea di costa alla fine del 16° secolo; (5) linea di costa attuale; (6) fiumi attuali; (7) principali paleo-alvei. (modificato da Bondesan *et al.*, 1995)

Nella parte più a sud della pianura alluvionale scorrono invece i fiumi appenninici, che a partire dal 1460 in poi vengono via via connessi all'alveo del Po di Primaro in via d'abbandono, il Santerno, il Lamone (1504), il Reno (1526), il Senio (1537) (Amorosi, 1999).

Nel XVI secolo, oltre alla foce del Reno, l'unico altro delta indipendente in Adriatico era quello dei fiumi Montone e Ronco che sfociavano nella zona dell'attuale Punta marina; nel 1739, con un'importante opera di regimazione fluviale il tratto di alveo comune ai due fiumi viene deviato a sud di Ravenna, realizzando foce Fiumi Uniti. L'intervento volto a scongiurare il pericolo di alluvione della città di Ravenna, determina anche la formazione dell'attuale Piallassa Baiona, area che prima dell'intervento era un'insenatura marina (Bondesan, 1990), Figura 2.4.

Il cordone di dune fossili affioranti più antico è di età etrusca, Figura 2.4; procedendo verso est, si susseguono fasce di cordoni di età medievale- moderna dalla forma arcuata, sono questi i cordoni su cui sorgono le attuali pinete ravennati.

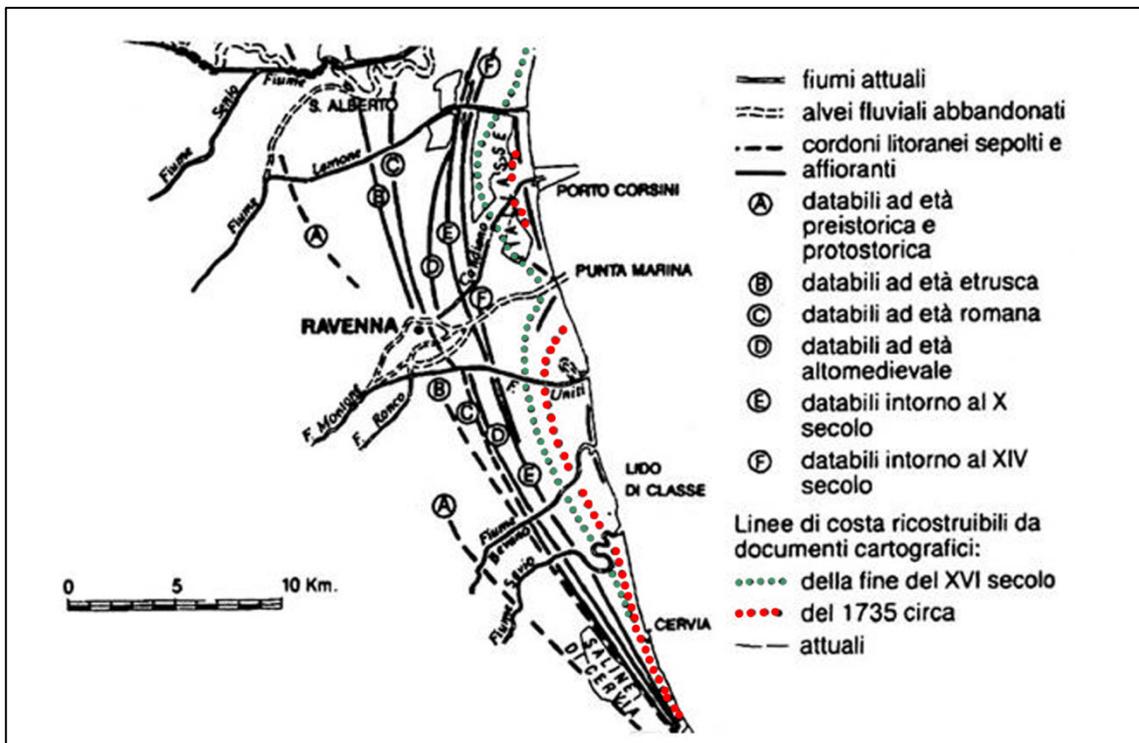


Figura 2. 4 - Ricostruzione dell'evoluzione della linea di costa dalla preistoria al XIV secolo (modificato da Bondesan, 1989)

2.2 EVOLUZIONE RECENTE DELL'AREA COSTIERA

L'evoluzione geomorfologica recente dell'area di studio è stata ricostruita, oltre che da fonti di letteratura, sulla base del lavoro effettuato per la tesi di laurea specialistica “La conservazione delle dune costiere: proposte di ripristino e gestione nell'area ravennate” (Sistilli, 2011) e successive revisioni. Tale lavoro è consistito nella mappatura delle aree di duna della costa ravennate tramite fotointerpretazione in ambiente GIS, da fine '800 al 2008. In seguito lo stesso lavoro è stato integrato aggiungendo l'analisi delle ortofoto satellitari del 2012 e aggiungendo all'analisi la mappatura delle opere costiere (classificate per tipologia) e dell'urbanizzazione della costa (strutture e infrastrutture presenti sull'arenile). Complessivamente il lavoro è stato svolto su datasets cartografici e ortofotografici per gli anni: 1892- 1935- 1954- 1972- 1989-2000- 2005-2008- 2012.

Sul finire dell'Ottocento, il litorale romagnolo si caratterizza per la presenza di cordoni dunosi paralleli o sub-paralleli, disposti secondo l'orientazione della costa o debolmente arcuati con falcature in corrispondenza delle foci. I cordoni, costituiti per la maggior parte da dune vive e prive di copertura arborea, erano lunghi da decine di metri a chilometri e larghi fino a 700- 800 metri (Cencini, 1980).

Le principali foci fluviali si trovavano in posizioni molto diverse dall'attuale. Foce Reno sporgeva di oltre un kilometro verso est ed era soggetta a una progressiva rotazione verso Nord; tale fenomeno, nello stesso tempo, provoca la formazione di un nuovo cordone litoraneo che andava a isolare una laguna interna, la *Sacca di Bellocchio* (Cencini, 1980; Bondesan *et al.* 1978). Anche Foce F. Uniti e Foce Savio si trovavano in posizione diversa da quella attuale, in particolare foce Fiumi Uniti protendeva per circa due kilometri verso nord e per circa mezzo kilometro verso est, a formare una lunga freccia litorale con presenza di dune, Figura 2.5.

In seguito, nella prima metà del '900, inizia una fase erosiva importante che determina da una parte il progressivo smantellamento dei principali apparati deltizi e dall'altra il ripascimento naturale dei tratti di costa interposti e di conseguenza la formazione di nuovi cordoni, come è evidente nell'area del torrente Bevano, Figura 2.6. Inizia quindi una fase, ancora attuale anche se con tassi diversi, di progressiva rettificazione della costa.

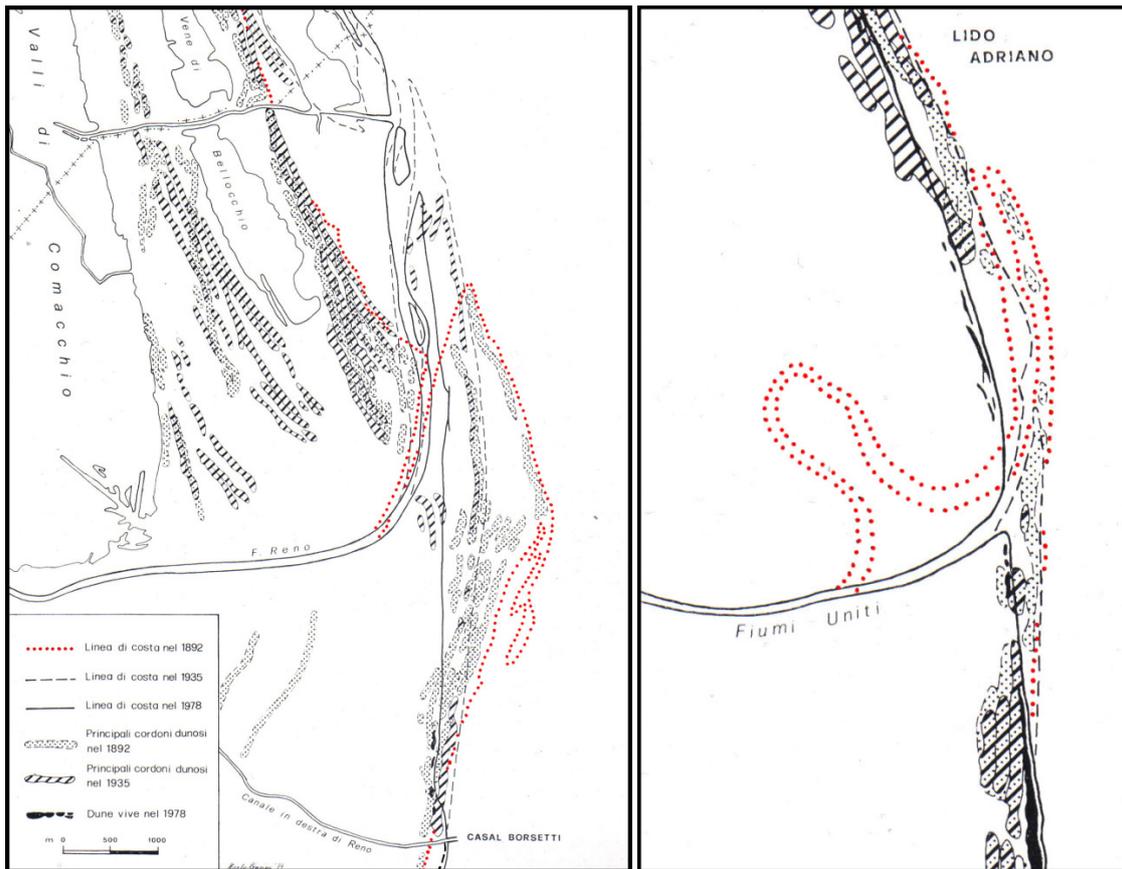


Figura 2. 5 – Evoluzione di Foce Reno (a sinistra) e di Foce F. Uniti (a destra), da fine '880 al 1978 (modificato da Cencini, 1980)

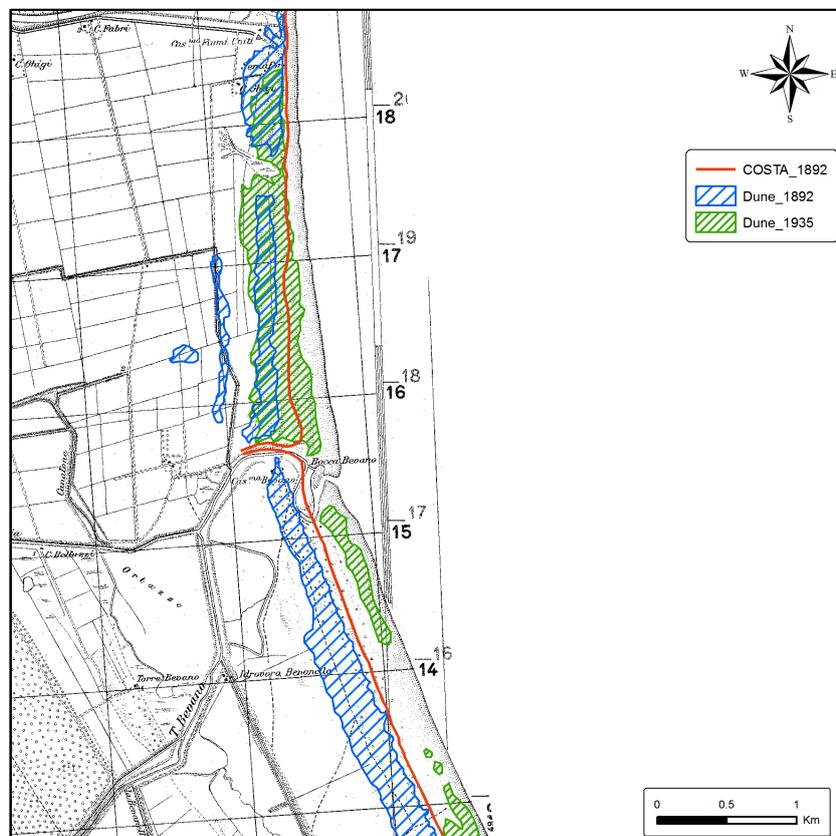


Figura 2. 6 - Avanzamento della costa e formazione di nuovi cordoni a foce Bevano tra il 1892 e 1935. (Sistilli, 2011)

Secondo lo studio “Lo stato dei litorali italiani” (GNRAC, 2006), questa fase di erosione è da imputare certamente alla riduzione delle portate solide fluviali che a sua volta è stata determinata da una serie di concause: cambiamenti nell'uso del suolo (da seminativi a prati e boschi) per il progressivo spopolamento delle aree collinari e montane; grande attività estrattiva negli alvei per la costruzione delle principali infrastrutture pubbliche.

Nello stesso periodo c'è un altro elemento che determina mutamenti del paesaggio costiero, l'impianto delle pinete demaniali. Tali opere furono condotte con lo scopo di proteggere dai venti salsi i nuovi terreni resi disponibili con le bonifiche. Ciò portò a intense piantumazioni negli anni '20 e '30 che fissarono a pineta la maggior parte delle aree di duna.

In questa fase quindi avviene un drastico cambiamento del paesaggio costiero, testimoniato dall'enorme perdita di aree naturali dunose che, in base alla mappatura operata in Sistilli, 2011 e revisioni, nel 1892 contavano circa 10 M di m² mentre già nel 1935 risultano meno della metà con 4.5 M m², Tabella 2.1.

Nella seconda metà del '900, la continuità dei cordoni è ancora in buona parte conservata anche se le aree risultano nettamente diminuite.

L'evoluzione della costa ravennate, in questa fase, è determinata da una parte dall'inasprirsi di quella crisi erosiva che va a intaccare tutto il litorale e non più solo le cuspidi e dall'altra dall'imponente quanto repentino sviluppo urbano costiero.

Casè, strade e ferrovie si sostituiscono alle dune e alle pinete, com'è il caso di Lido Adriano, Lido di Classe e Lido di Savio, dove le costruzioni si spingono al limite della battigia lungo tratti già allora interessati da erosione. Di pari passo allo sviluppo urbano inizia la crescita della fiorente economia romagnola del turismo; nel ravennate la sistemazione degli impianti viene impostata sul primo cordone dunoso, per cui vaste aree di dune vengono sbancate con mezzi meccanici ben oltre le necessità (Cencini, 1980). Il moltiplicarsi di stabilimenti balneari e accessi alla spiaggia frammentano in modo incontrollato i tratti dunosi residui che così perdono qualsiasi funzionalità ambientale, prima di tutto quella di barriera contro le mareggiate.

Nelle decadi successive il processo di frammentazione iniziato negli anni '60 continua su tutta la costa di pari passo con il moltiplicarsi delle strutture balneari, come ad esempio nella zona di Porto Corsini – Marina Romea, Figura 2.7. Nella stessa immagine, Figura 2.7, è possibile apprezzare anche la condizione di dinamica positiva del tratto di costa subito a nord del molo determinata proprio dalla presenza di quest'ultimo che intercettando il drift litoraneo da nord favorisce il rapido accrescimento della spiaggia e quindi il mantenimento e l'espansione, tuttora in atto, della duna di Porto Corsini.

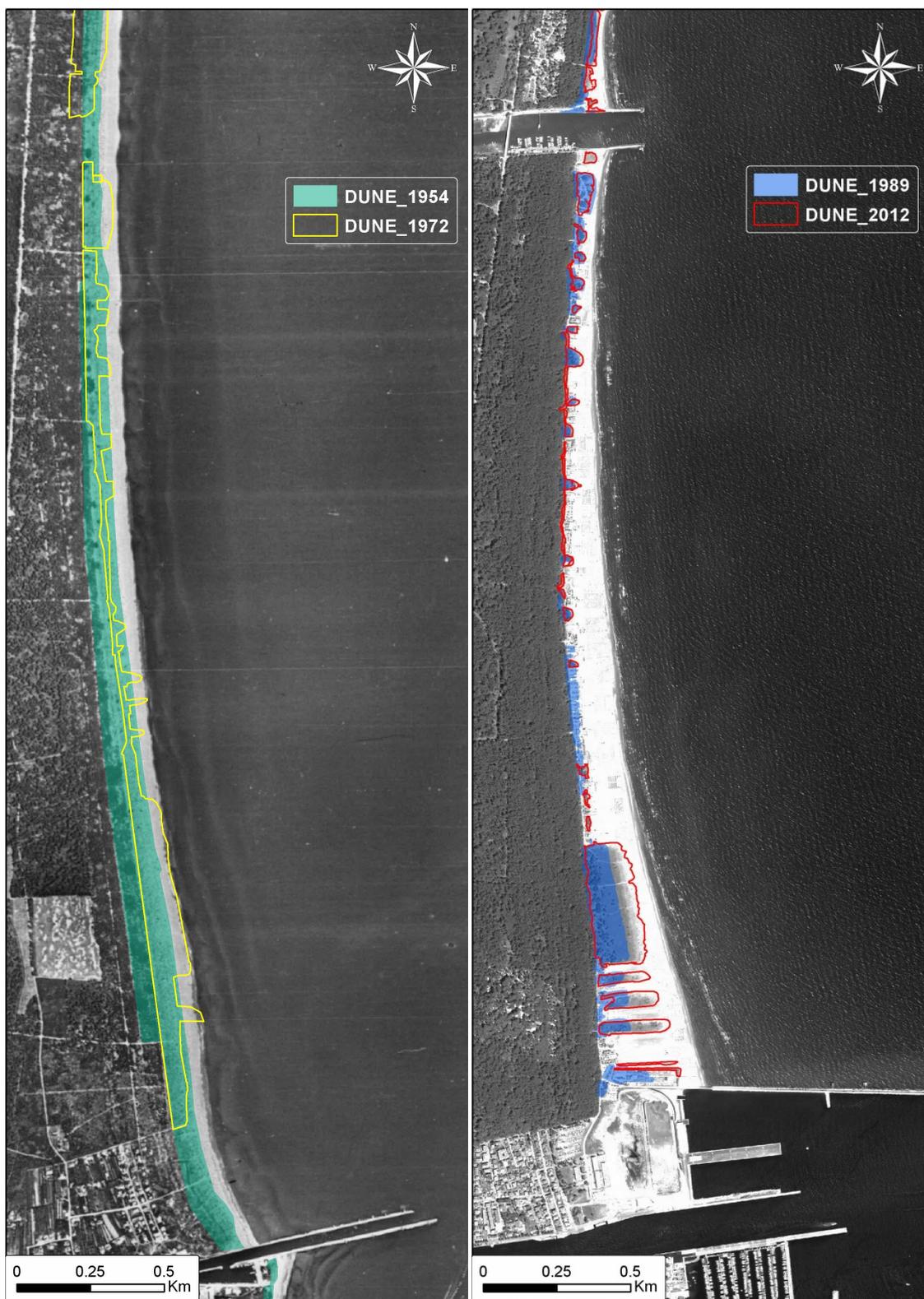


Figura 2. 7 – Progressiva diminuzione e frammentazione delle aree di duna in località Porto Corsini- Marina Romea, dal 1954 al 2012.

Il lavoro di mappatura in definitiva ha evidenziato la seguente situazione, riassunta in Tabella 2.1, aree dunose calcolate per ciascun datasets carto- fotografico, e negli istogrammi in Figura 2.8.

Tabella 2. 1 – Superfici di aree dunose calcolate dalla mappatura in ambiente GIS.

	AREA [m²]
1892	10 048 477
1935	4 463 843
1954	3 786 579
1972	2 137 577
1988	911 578
2000	787 278
2005	979 954
2008	1 052 137
2012	819 327

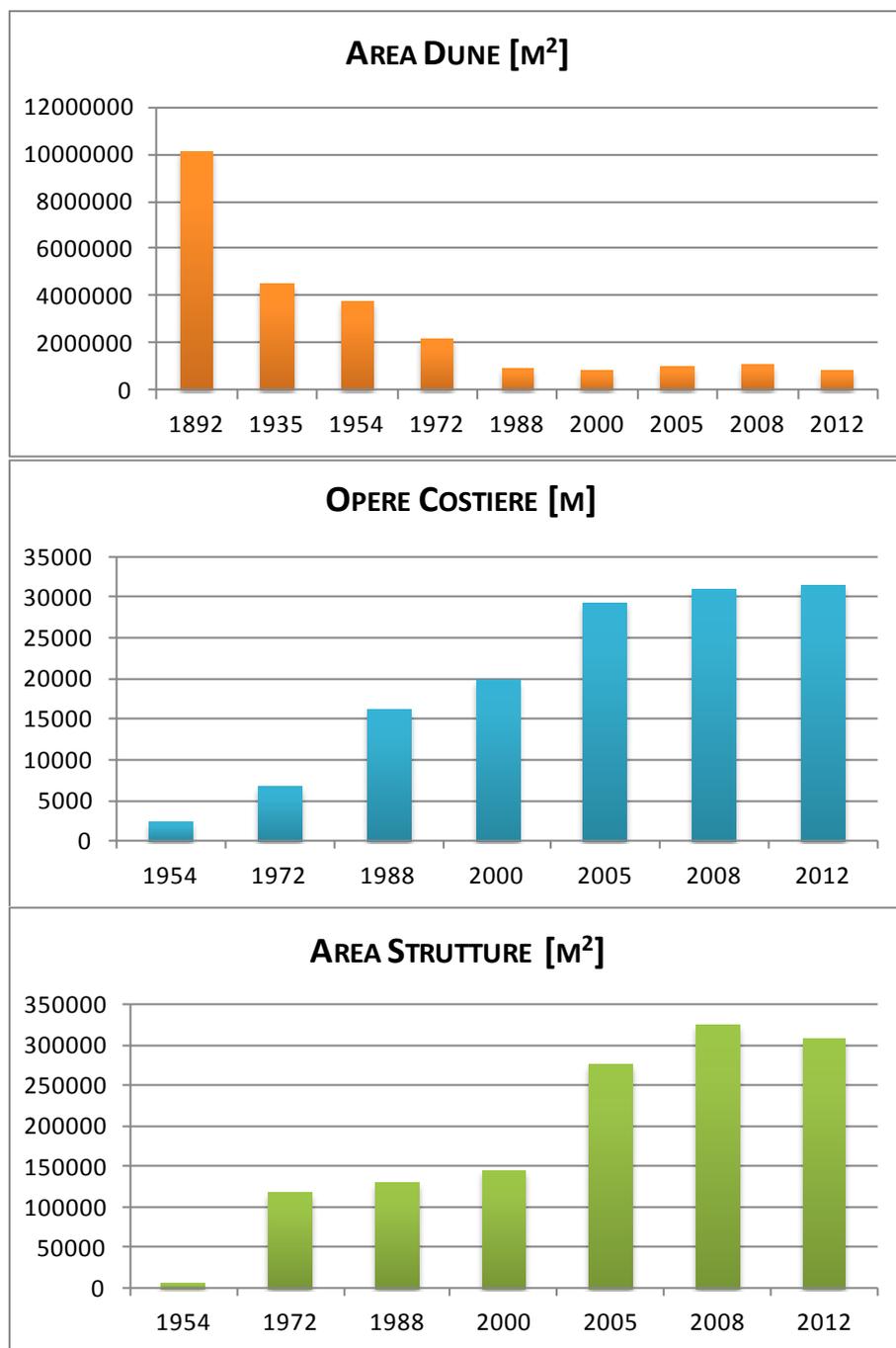


Figura 2. 8 – Risultati complessivi della mappatura, rispettivamente da sopra a sotto: Aree delle dune, estensione delle opere costiere e aree dell'urbanizzazione dell'arenile.

Alcune considerazioni sono obbligatorie nella valutazione della Tabella 2.1 e degli istogrammi in Figura 2.8. Bisogna premettere, infatti, che le fonti carto-fotografiche sono di natura e qualità molto diverse. In particolare i dataset riferiti agli anni 1989 e 2000, soprattutto quest'ultimo, risultano di pessima leggibilità, cosa che probabilmente ha comportato una sottostima della mappatura; invece, riguardo gli ultimi tre anni c'è da sottolineare che 2005 e 2012 sono foto satellitari in bianco e nero mentre il dataset 2008 è composto ortofoto aeree a colori di elevata qualità e risoluzione, cosa che ha reso molto più accurata la mappatura.

Ad ogni modo, risultano chiari i trend di diminuzione delle dune e di aumento delle opere costiere e dell'urbanizzazione dell'arenile,

Per completezza viene riportata qui di seguito, Figura 2.9, una mappa per la zona di Dante in cui sono presenti i tre elementi d'interesse.

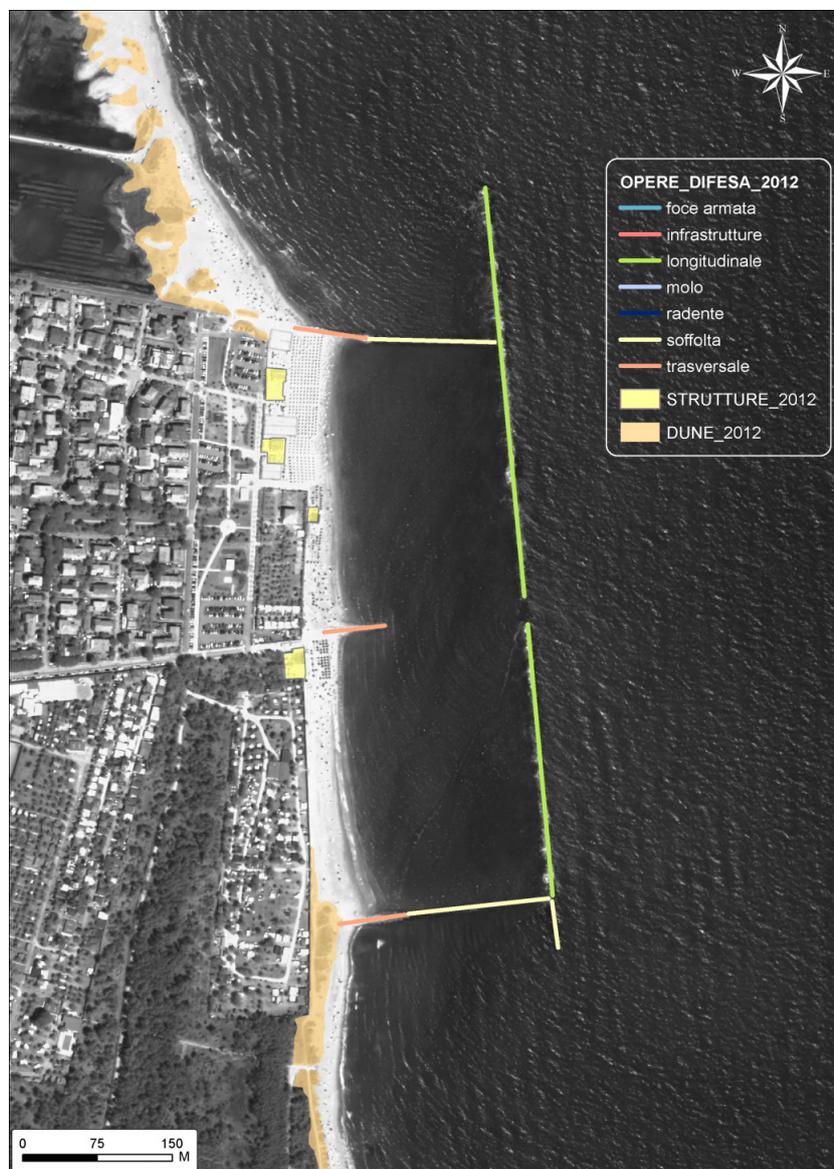


Figura 2. 9 – Dettaglio della mappatura per l'area di Lido di dante.

Lo stato attuale del litorale

Attualmente, secondo la classificazione fisica della costa operata da Calabrese *et al.* 2010, la costa ravennate si presenta ancora tendenzialmente ondulata, con le cuspidi fluviali di Foce Reno, Foce F. Uniti e Foce Savio e i tratti concavi interposti in corrispondenza di Lido degli Estensi, Porto Corsini e Foce Bevano. Il processo di rettificazione della costa è tuttora in atto anche se con tassi non paragonabili al secolo scorso, sia per il problema già visto della diminuzione dell'apporto solido fluviale ma anche per la sostanziale "ingessatura" della costa con opere di difesa di svariate tipologie.

La costa odierna è senza dubbio dominata dai processi marini, *wave-dominated coast*, e il drift litoraneo costiero è diretto principalmente verso Nord, tranne che in corrispondenza delle foci del Reno e del Savio, dove il flusso diverge e si formano due tratti a direzione meridionale (Preti, 2009).

L'aggiornamento 2006-2012 dello studio *SICELL- Il sistema gestionale delle celle litoranee* (Montanari & Marasmi, 2014) riporta un quadro esaustivo della situazione attuale dello stato del litorale regionale, suddiviso in 7 macrocelle. Tale studio classifica i tratti costieri secondo l'indice ASPE, un indicatore della tendenza complessiva del tratto costiero esaminato che considera la variazione del volume di sabbia, la variazione della linea di riva e gli interventi di difesa, Figura 2.10.

Le macrocelle 3- 4- 5 sono quelle afferenti alla provincia di Ravenna:

- Macrocella 5: Porto Garibaldi - molo nord Porto Ravenna.

Per questo tratto sono stati individuati 13.3 km di spiagge in condizioni di criticità di cui 8.7 in forte erosione: Marina Romea, Foce Reno e Bellocchio. Vi sono poi due ampi tratti in avanzamento, L. Estensi e Porto Corsini, un avanzamento che però procede con tassi sempre minori.

- Macrocella 4 : molo sud Porto Ravenna – Foce Savio.

Qui sono stati rilevati 4.3 km di spiagge in erosione: Punta Marina nord, Foce Fiumi Uniti, tratto a nord dell'area naturale di Foce Bevano. Vi sono poi 7 km di spiagge stabili, area a sud di Foce Bevano e Marina di Ravenna. Infine, le spiagge di Lido Adriano e Punta Marina si mantengono stabili ma solo grazie ai ripascimenti e alle opere di difesa.

- Macrocella 3: Foce Savio - Cesenatico

In questo tratto di costa sono stati identificati 4.5 km di spiagge in erosione.

In generale, gli autori delineano una situazione di peggioramento rispetto alla precedente analisi (2000- 2006), tranne che per la Macrocella 4 dove la tendenza erosiva è in diminuzione.

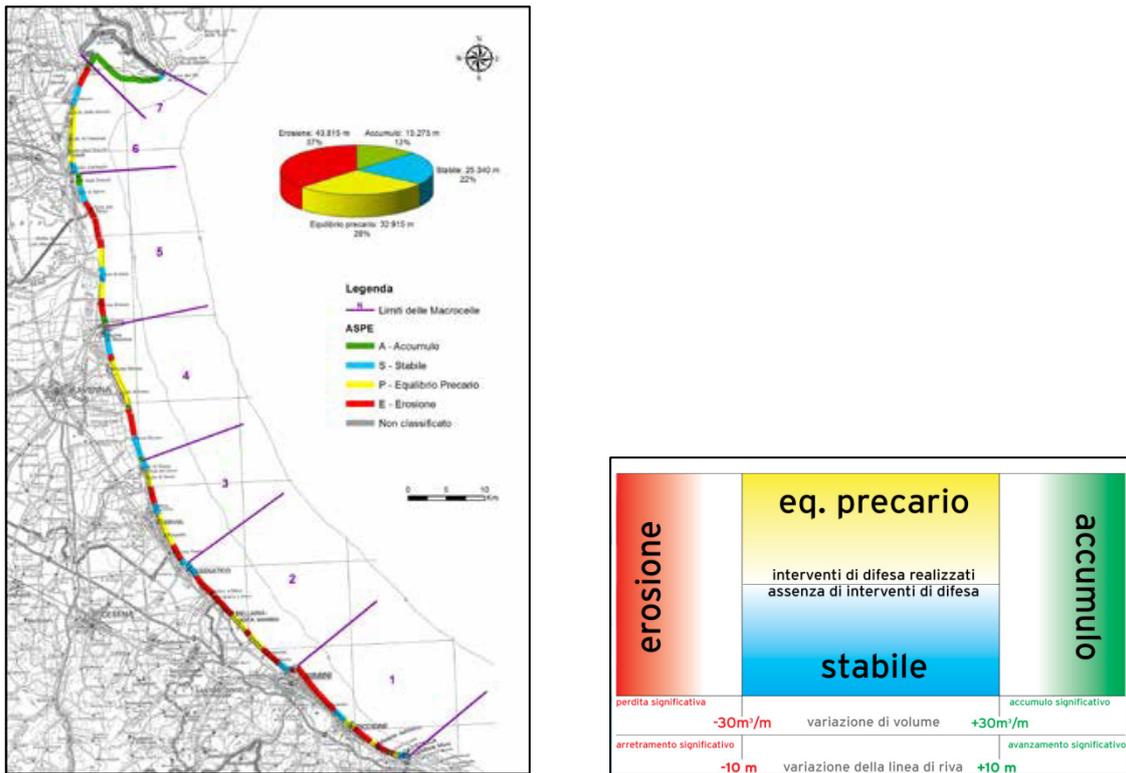


Figura 2.10 – A sinistra: Risultati della classificazione ASPE 2006-2012 del litorale Emiliano-romagnolo. A destra: grafica esplicativa dell'indice ASPE; A: accumulo; S: stabile; P: equilibrio precario; E: erosione (modificato da Montanari & Marasmi, 2014)

Subsidenza

A completamento di questo quadro generale sull'evoluzione geomorfologica costiera non può essere tralasciato un accenno al fenomeno della subsidenza.

La pianura costiera romagnola è naturalmente soggetta a un tasso di subsidenza naturale, a causa della compattazione dei sedimenti, variabile tra 0.5- 3 mm/anno (Preti, 2009)

A partire dal secondo dopoguerra tale fenomeno ha subito un drastico incremento a causa di alcune attività antropiche, in primis l'estrazione di acqua dal sottosuolo e secondariamente dall'estrazione di gas da giacimenti costieri; tale situazione, unita alla crisi di apporto solido fluviale, ha determinato una perdita netta di territorio nonché un aumento del rischio da ingressione marina. Tale situazione ha avuto il periodo di massima intensità negli anni '70, quando furono raggiunti tassi di abbassamento massimi di 110 mm/anno nell'area industriale a nord-est di Ravenna, dove avvenivano i massimi emungimenti di acqua dal sottosuolo (Teatini *et al.*, 2005). Negli ultimi decenni, a partire dagli '80, i tassi di subsidenza sono diminuiti considerevolmente, grazie soprattutto all'allaccio della rete idrica di Ravenna al bacino artificiale della diga di Ridracoli che ha permesso di bloccare i prelievi in falda.

Oltretutto a partire dal 1997- 1998 la regione si è dotata di una rete di monitoraggio, costituita da una rete di livellazione geometrica di alta precisione con oltre 2300 capisaldi e da una rete di circa 60 punti GPS, rilevata periodicamente.

L'ultima campagna di misurazioni risale al 2012, Figura 2.11, e mostra che l'area della città di Ravenna si presenta sostanzialmente stabile (2- 3 mm/anno). Il litorale, nel suo complesso, mostra una prevalente tendenza alla diminuzione dei tassi di subsidenza con abbassamenti fino a circa 5 mm/anno, valori dimezzati rispetto al periodo precedente (rilievo 2005- 2007); unica considerevole eccezione è il tratto che va da Lido Adriano fin oltre la foce del T. Bevano, con massimi di oltre 20 mm/anno in corrispondenza di Foce Fiumi Uniti, Figura 2.11.

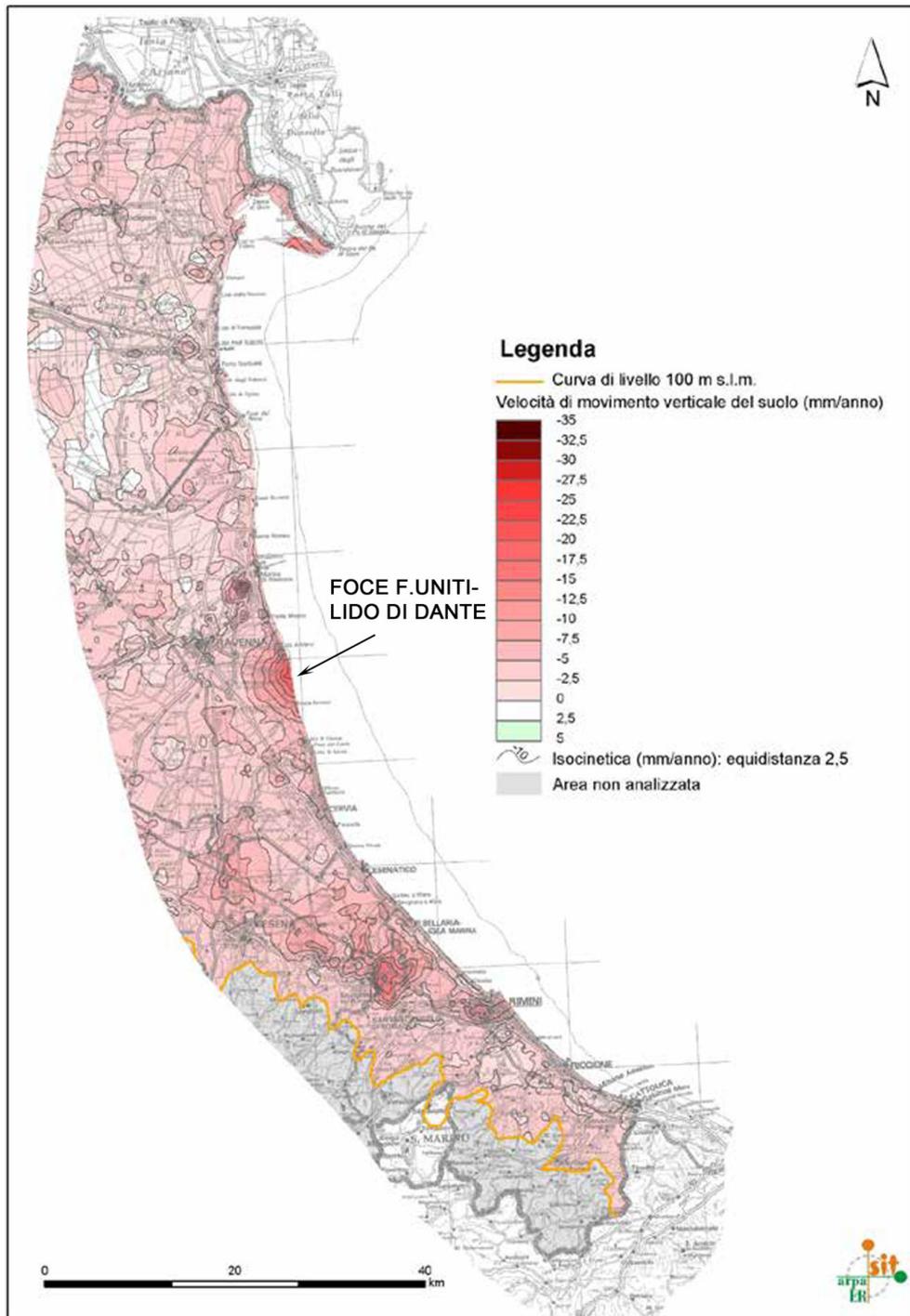


Figura 2. 11 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2012 per la fascia costiera ravennate (modificato da Montanari & Marasmi, 2014)

2.3 INQUADRAMENTO METEOMARINO

2.3.1 Settore di traversia, *fetch* geografico e *fetch* efficace

Il *settore di traversia* è un arco che comprende tutte le direzioni di generazione di moto ondoso da parte del vento, con origine nel luogo d'interesse e delimitato dalle rette tangenti alle due punte maggiormente protese in mare costituenti un ostacolo alla propagazione del moto ondoso. Al suo interno si può ulteriormente distinguere il *settore di traversia principale* che raggruppa le direzioni di provenienza dei venti dominanti (> 20 m/s o comunque caratterizzati dalle più alte velocità rilevabili) e quindi delle maggiori agitazioni ondose.

Con riferimento alla località di Porto Corsini, il settore di traversia generale è delimitato a N dall'area del Delta del Po e a S-E dal promontorio del Conero, compreso tra 20°N e 134°N . Il settore di traversia principale è compreso tra 45°N e 75°N ed è stato così individuato considerando che da queste direzioni provengono i venti con le maggiori velocità (>10 m/s) e la quasi totalità delle mareggiate ($H_s > 1.5$ m), come verrà meglio esplicitato in seguito, Figura 2.12.

Per *fetch* s'intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso da parte del vento e si calcola utilizzando il concetto di *fetch geografico*, ossia la distanza tra il paraggio d'interesse e la più vicina terra ferma secondo una certa direzione. Sempre in riferimento alla località di Porto Corsini il *fetch geografico* è stato calcolato per intervalli di 5° all'interno del settore di traversia, 20°N - 134°N . Il maggior *fetch geografico* è risultato di 940 Km secondo la direzione dei 130° , Figura 2.12.

Il *fetch efficace* considera che il vento genera moto ondoso anche nei settori adiacenti la direzione media di provenienza andando a influenzare la propagazione del moto ondoso proveniente dalle altre direzioni; quindi, se il *fetch geografico* considera l'effetto dalla lunghezza della zona di generazione del moto ondoso, il *fetch efficace* ne integra l'effetto della larghezza.

Secondo Seymour, 1977 il *fetch efficace* è la media ponderata dei *fetch geografici* di un settore di 180° centrato nella direzione d'interesse, secondo la formula:

$$F_{eff}(\theta_j) = \frac{\sum_{i=j-90}^{j+90} F_i \cos^{n+1}(\theta_i - \theta_j)}{\sum_{i=j-90}^{j+90} \cos^n(\theta_i - \theta_j)} \quad [1]$$

dove n è un esponente legato alla legge di distribuzione direzionale dell'energia del moto ondoso, generalmente posto uguale a 2.

Nel caso dei mari italiani, le lunghezze del *fetch geografico* che contribuiscono al calcolo del *fetch efficace* possono essere limitate a 500 Km in ragione delle dimensioni delle perturbazioni meteorologiche che influenzano il bacino del Mediterraneo (Corsini *et al*, 2004).

In Figura 2.13 i valori calcolati di *fetch geografico* ed *efficace* nel settore di traversia considerato (20°N - 134°N).

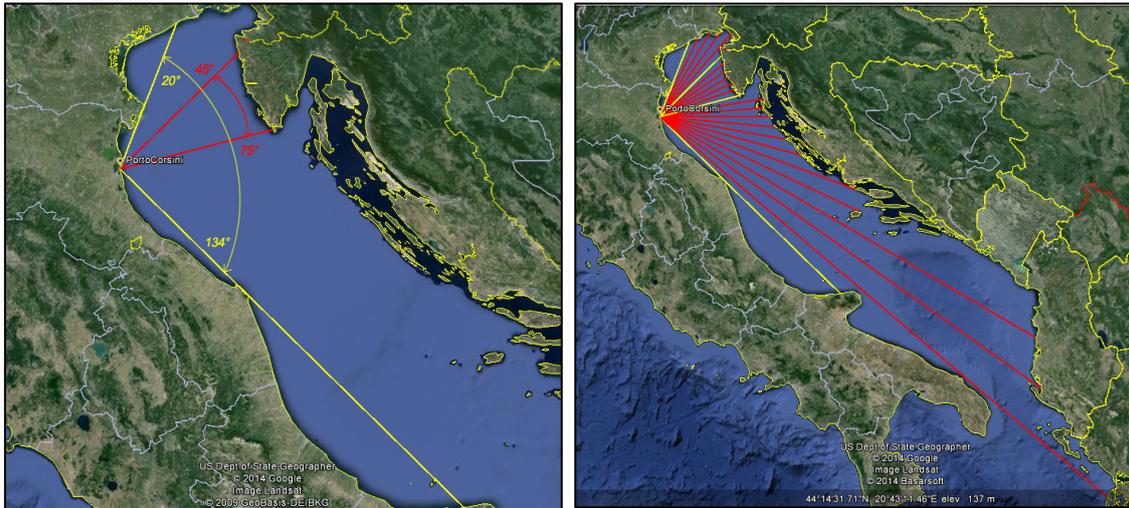


Figura 2. 12 – In alto: Settore di Traversia (linee gialle) e Settore di traversia Principale (linee rosse). In basso: Fetch geografici (linee rosse) e Settori di Traversia (linee gialle).

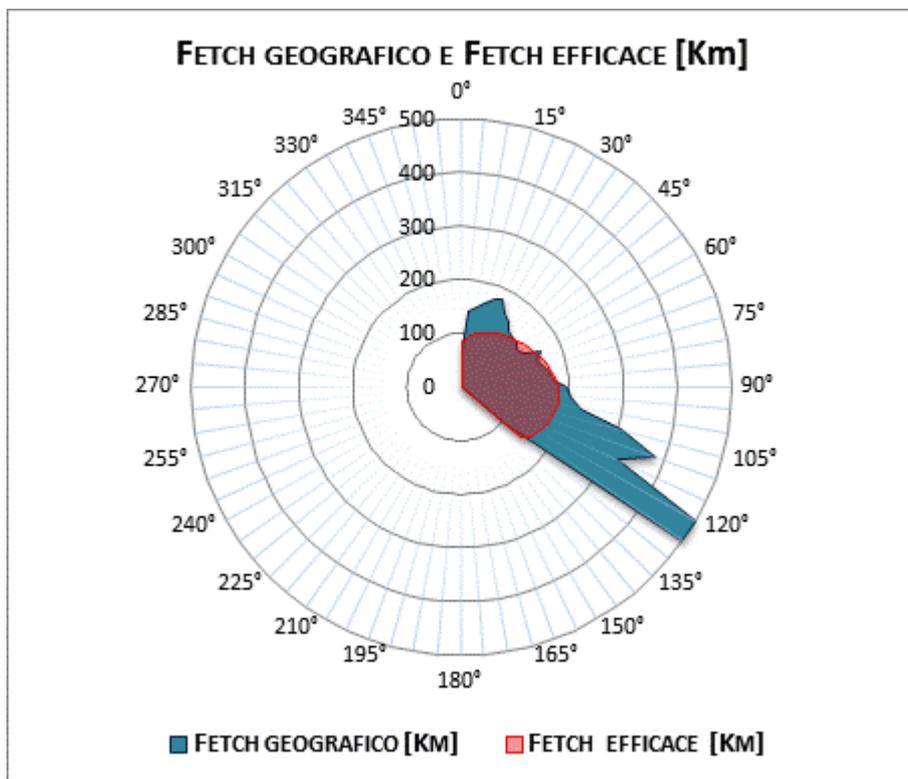


Figura 2. 13 - Fetch geografici e fetch efficaci per il settore di traversia (20°N-134°N).

2.3.2 Regime eolico

I dati utilizzati sono quelli dell'anemometro di Ravenna- Porto Corsini della Rete Mareografica nazionale (RMN¹), posto a 2 m l.m.m, che registra velocità (m/s) e direzione del vento (N°) con una misura all'ora fino al 2010 e successivamente ogni 10'.

Per questo studio sono stati considerati i dati dal 1998 al 2015, con aggiornamento al 01/03/2015, da cui sono risultati il 7% di misure mancanti rispetto alle attese.

Sono state calcolate le frequenze assolute e cumulate per classi di velocità del vento e per direzioni di provenienza in settori di ampiezza di 30° (in modo che ad esempio il settore "60°" comprendesse le direzioni tra 45°N e 75°N), Tabella 2.2.

Tabella 2. 2 - Regime eolico per direzione di provenienza (°N) e classi di velocità (m/s) - Porto Corsini (1998/2015)

N°/[m/s]	≤0.5	≥0.6	≥4	≥7	≥10	TOT
0°	0.39%	1.87%	0.41%	0.18%	0.08%	2.93%
30°	0.31%	2.28%	0.85%	0.46%	0.43%	4.33%
60°	0.28%	3.24%	1.36%	0.68%	0.59%	6.15%
90°	0.26%	5.15%	2.16%	0.77%	0.29%	8.63%
120°	0.28%	6.19%	2.84%	0.63%	0.17%	10.11%
150°	0.32%	5.22%	2.77%	0.70%	0.31%	9.33%
180°	0.46%	4.46%	0.98%	0.19%	0.04%	6.14%
210°	0.79%	4.02%	0.64%	0.10%	0.01%	5.55%
240°	0.84%	4.57%	1.11%	0.22%	0.02%	6.76%
270°	0.90%	15.35%	3.32%	0.14%	0.03%	19.74%
300°	0.65%	10.89%	3.34%	0.22%	0.03%	15.12%
330°	0.46%	3.93%	0.73%	0.06%	0.03%	5.21%
TOT	5.94%	67.17%	20.51%	4.35%	2.02%	100.00%

In Figura 2.14, gli stessi dati in formato grafico mostrano che i venti più frequenti (*venti regnanti*) provengono da W-NW mentre quelli con le velocità maggiori (*venti dominanti*) provengono dal I Quadrante e secondariamente dal II Quadrante.

Nel grafico in basso in Figura 2.14, sono state poi evidenziate le classi di velocità ≥ 7 m/s e ≥ 10 m/s che si concentrano nel settore 15°-165°, con le maggiori frequenze concentrate tra 45°- 75° che a ragione può essere considerato il *settore di traversia principale*.

Le rose del vento stagionali, in Figura 2.15, evidenziano che il vento da Ponente è frequente in tutte la stagioni, il Maestrale da N-W prevale nel regime eolico invernale e autunnale, mentre in primavera e in estate diventano prevalenti i venti da E e S-E.

In tutte le stagioni la classe di velocità più frequente è quella tra i 2 e 4 m/s. Le classi di velocità maggiori ≥ 7 m/s e ≥ 10 m/s sono minime in estate e massime in inverno, la direzione preferenziale di provenienza è sempre quella del settore 45°-75° ma in primavera e in autunno si può osservare un secondo picco nel II Quadrante, che assume particolare rilievo per l'estensione del fetch (>500 Km) e quindi nei fenomeni di *storm surge*.

¹ <http://www.mareografico.it>

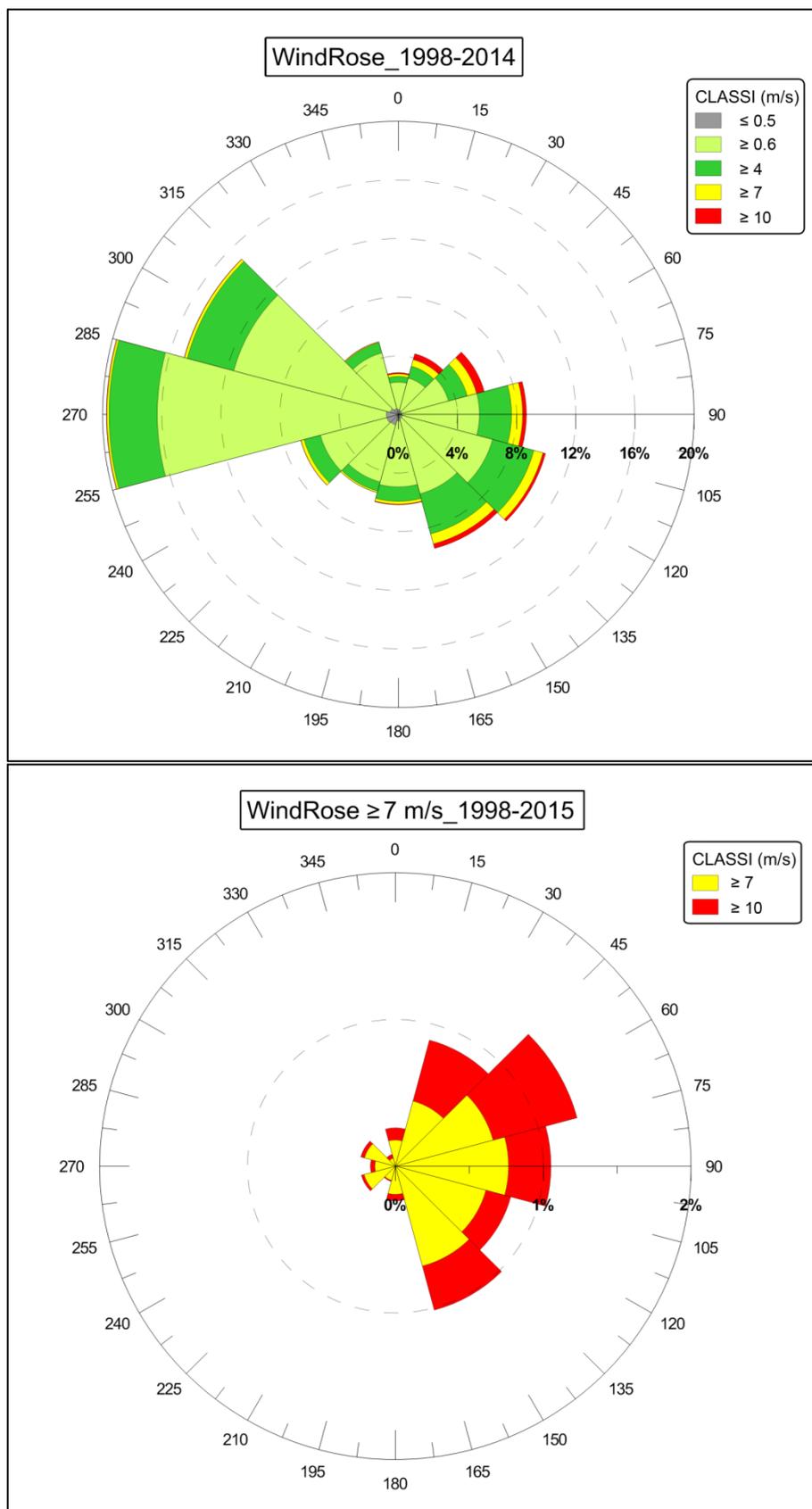


Figura 2. 14 – In alto: Rosa del vento - Porto Corsini (1998/2015); In basso: Rosa del vento - Porto Corsini (1998/2015) - Dettaglio per le classi a maggiore velocità ≥ 7 m/s, ≥ 10 m/s.

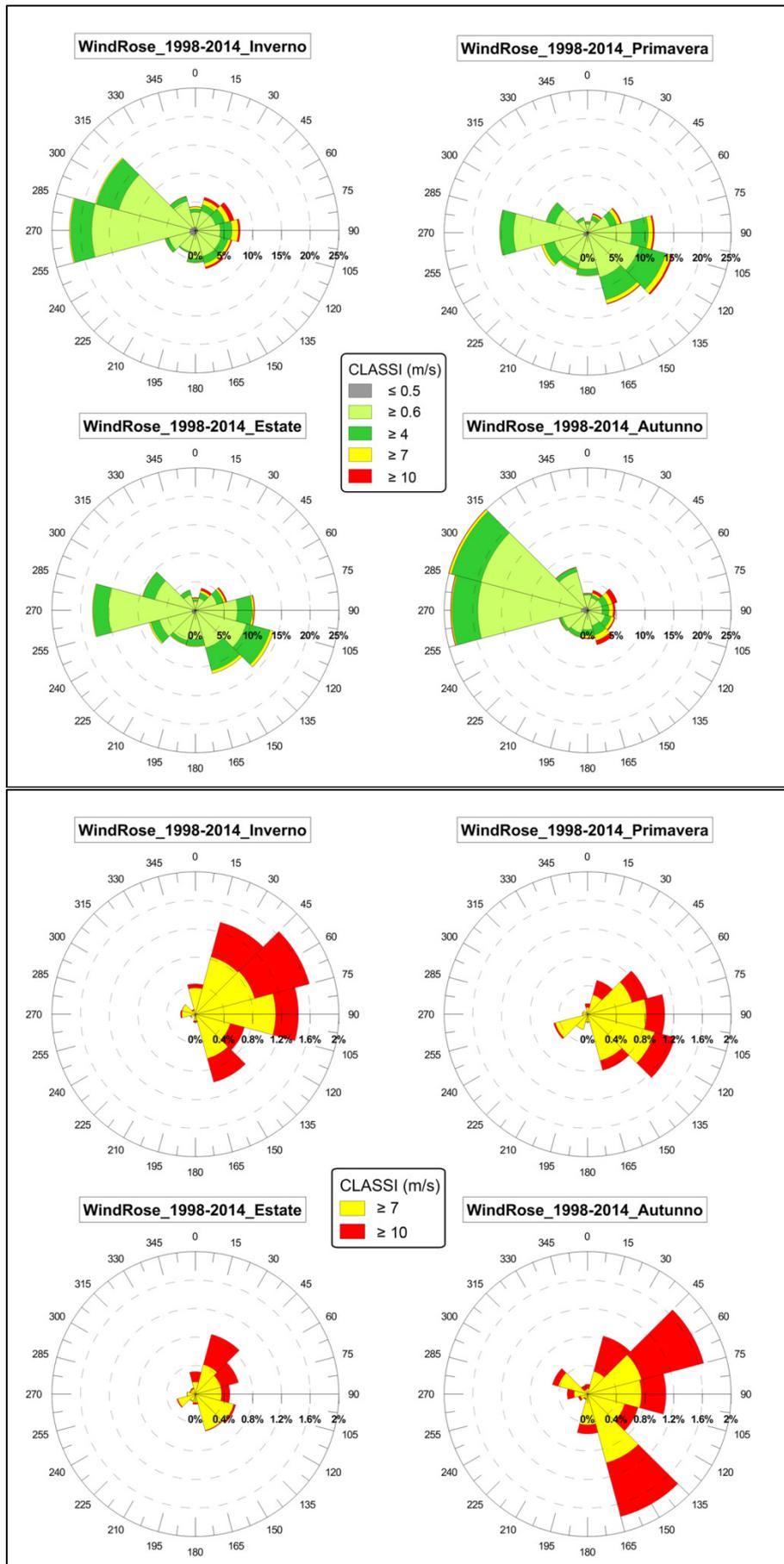


Figura 2. 15 - Rose di venti stagionali

2.3.3 Pluviometria

Per quanto riguarda questo parametro sono stati utilizzati i dati storici presenti nell'archivio di Arpa e accessibili tramite Sistema Dexter². Quattro sono le stazioni pluviometriche storiche che hanno un record di dati molto lungo a partire dal 1945 o dal 1947: Marina di Ravenna – Ravenna Urbana – Ravenna Classe – Idrovora Fosso Ghiaia. Per semplicità è stato analizzato un solo dataset tra questi ed è stato scelto quello di Marina di Ravenna, la stazione più vicina al mare e posta a 3 m l.m.m.

La piovosità, registrata dallo strumento come quantità giornaliera [mm/giorno], è stata analizzata come quantitativo totale negli anni e come media mensile, Figura 2.16 e 2.17.

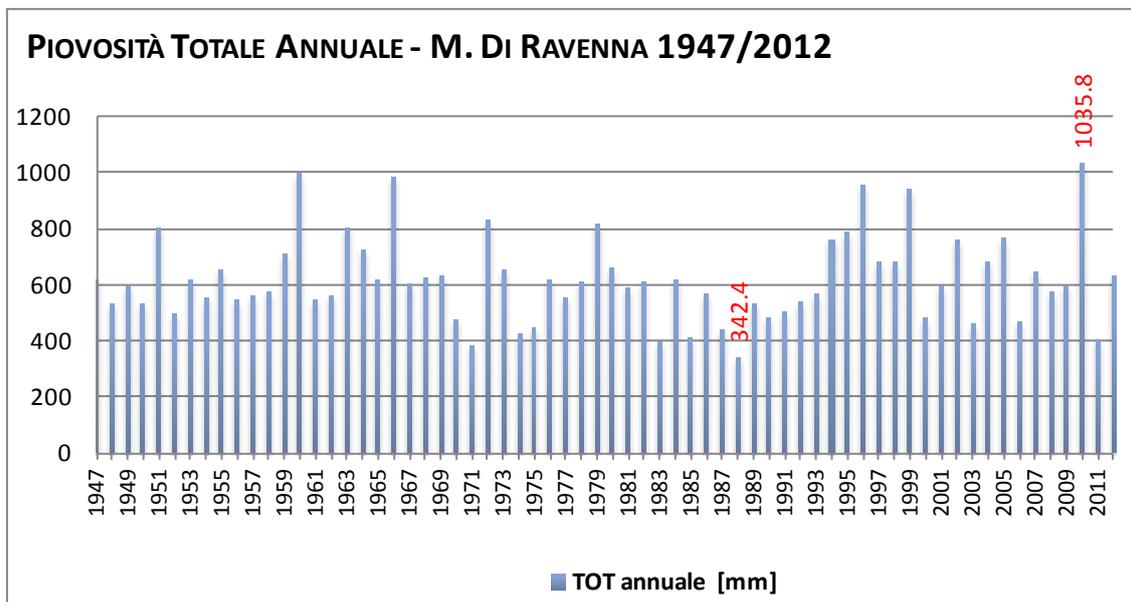


Figura 2. 16 - Piovosità totale annuale - 1947- 2012

In media la piovosità annuale è risultata di 619 mm, variabile tra i 342 mm del 1988 e i 1035 mm del 2010.

L'andamento medio mensile, Figura 2.17, evidenzia due picchi di precipitazioni, il primo di maggior intensità in autunno e il secondo inferiore in primavera, e due periodi secchi in estate e inverno. Questo tipo di regime pluviometrico è tipico del Clima temperato umido a estate calda (Cfa), secondo la classificazione di Koppen, 1936, indicato per le zone costiere dell'Alto Adriatico.

² http://www.arpa.emr.it/dettaglio_generale.asp?id=3284&idlivello=1625

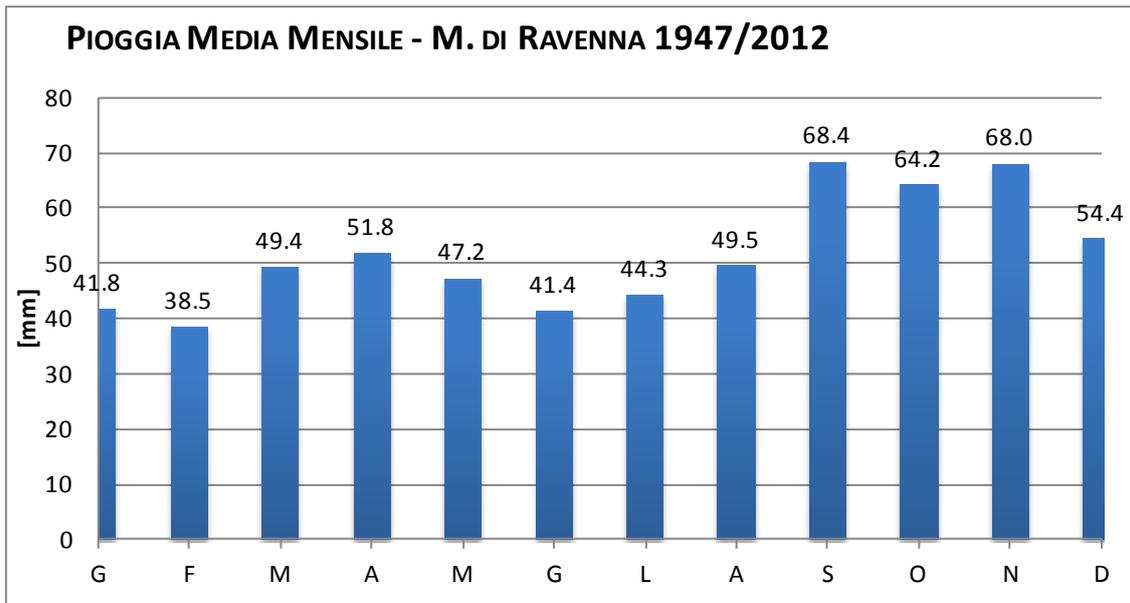


Figura 2. 17 - Piovosità media mensile

2.3.4 Livello idrometrico marino e fenomeni di “acqua alta” (*storm surge*)

Anche per questo parametro i dati provengono dalla stazione mareografica di Ravenna - Porto Corsini (RMN). La stazione è dotata di caposaldi altimetrici riferiti al valore medio mare di Genova nel 1942 ed è attiva dal 1897, pur subendo nel tempo diversi spostamenti e modiche strumentali. L'attuale posizione è mantenuta dal 1957 mentre la strumentazione ha subito ammodernamenti e calibrazioni nel 1986 e poi nel 2010.

Attualmente il mareografo (a sensore radar, precisione di 4 mm) registra una misura del livello marino ogni 10 minuti e la disponibilità delle misure inizia dal 1986³.

I dati utilizzati per questo studio coprono un periodo abbastanza ampio, dal 1986 al 2015. Bisogna premettere però che i dati in questione non sono omogenei, cosa che si ripercuote sui risultati: i dati 1986-1999 sono estremamente frammentati con elevate percentuali di dati mancanti, mentre dal 2000 la registrazione è quasi del tutto costante; in secondo luogo i dati 1986-1998 sono stati registrati con frequenza oraria mentre dal 1999 in poi la frequenza del campionamento è aumentata a 10'.

Il livello del mare (LIV) in dato momento è determinato dall'influenza di più fattori che si sommano. C'è la componente astronomica delle maree e c'è la componente meteorologica (*storm surge*) determinata sia dalla bassa pressione atmosferica sia localmente produce il rialzo del livello marino (effetto barometrico inverso) sia dalla persistenza di venti da S-E (Scirocco) che spirando lungo l'asse longitudinale dell'Adriatico producono un effetto di trascinamento e impilamento di acqua sotto costa nella porzione chiusa settentrionale del bacino.

³ www.idromare.it – www.mareografico.it

Gli eventi di *surge* possono essere oltretutto accompagnati dalle *sesse*, onde armoniche che si sviluppano in bacini stretti e chiusi come l'Adriatico e che possono perdurare per giorni in seguito all'evento che le ha generate; l'oscillazione longitudinale in Adriatico ha un periodo di circa 21.5 ore (Vilibic, 2006), molto simile all'onda di marea con la quale può di conseguenza entrare in fase.

In questo contesto, l'obiettivo è stato quello di individuare e caratterizzare l'incidenza dei fenomeni di *storm surge* e a tale fine si è proceduto all'isolamento degli eventi in cui il LIV ha superato la soglia dei +0.45 m l.m.m., massimo livello raggiunto dalla marea astronomica in fase di sigizie, e dei +0.70 m sul l.m.m, soglia di allerta per i fenomeni di acqua alta in Emilia Romagna (Perini *et al.*, 2011), Figura 2.18.

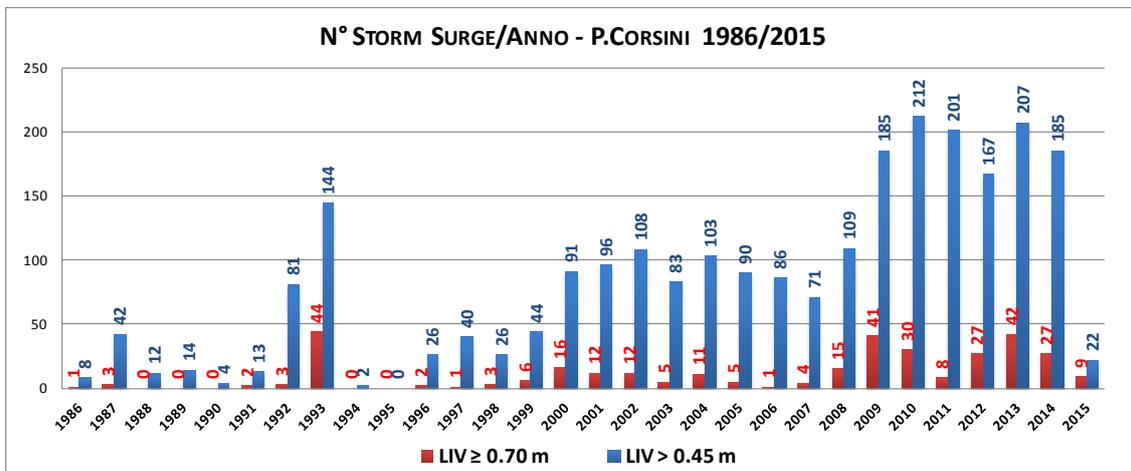


Figura 2. 18 - N° eventi di superamento soglie del livello marino (>0.45 m - ≥0.7 m)

Ad una prima valutazione i dati elaborati indicano la presenza di tre periodi ben distinti: il primo fino al 1999 con incidenze minime del fenomeno (fatta eccezione per il 1993), il secondo fino al 2008 con incidenze maggiori ed il terzo periodo in cui la frequenza degli eventi mediamente raddoppia. Questo trend di aumento di frequenza del fenomeno è confermato dal punto di vista statistico, attraverso le analisi di *trend detection* effettuata sulla serie dei massimi annuali (AM) con il software *Anabasi 1.3* (Braga *et al.*, 2013b), Figura 2.19.

Non altrettanto chiare sono certamente le cause di questo trend, infatti, come già accennato in precedenza, il dataset si presenta fortemente disomogeneo per cause strumentali, quali misure mancanti, diversa frequenza di campionamento e subsidenza. Potendo escludere queste cause si potrebbe quindi affermare che il trend sia dovuto all'effetto dei cambiamenti climatici ma la coincidenza di tali periodi con le cause strumentali deve far optare necessariamente verso questa spiegazione; nello specifico, il primo periodo coincide con gli anni con elevate percentuali di misure mancanti, il secondo coincide con il campionamento orario ed il terzo con l'aumento della frequenza di campionamento.

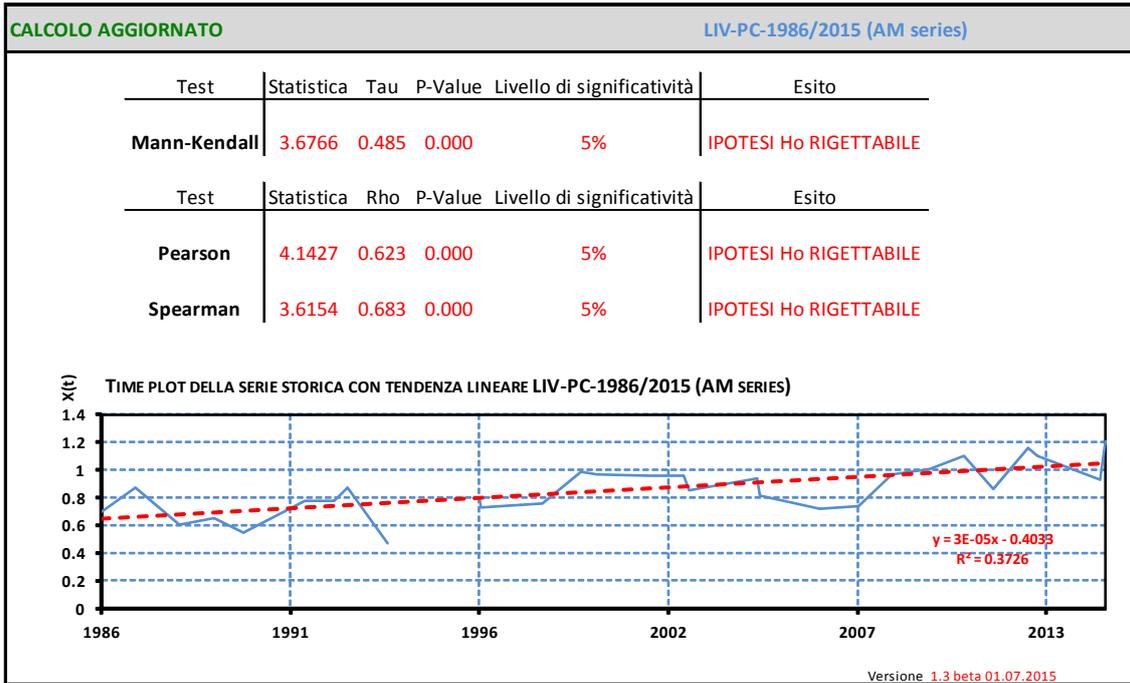


Figura 2. 19 - Analisi per il "Trend detection" e Time plot (in evidenza il trend lineare) – Porto Corsini.

Infine, l'incidenza mensile degli eventi di "acqua alta" a Porto Corsini è risultata massima tra ottobre e febbraio con due picchi in novembre e dicembre, Figura 2.20.

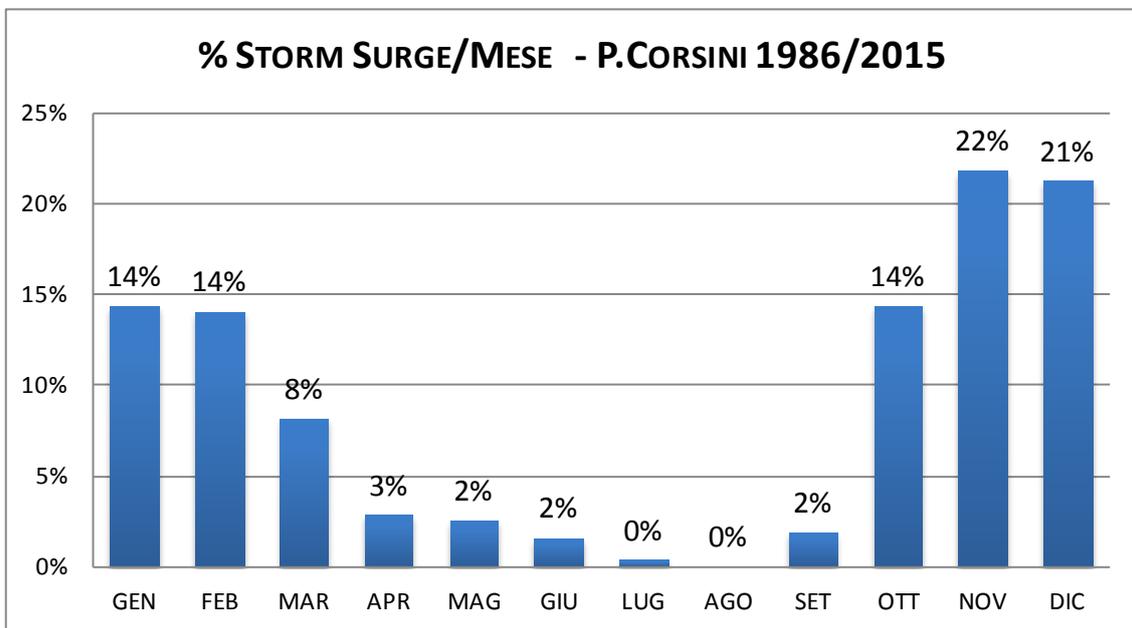


Figura 2. 20 - N° eventi/mese di superamento del livello marino di 0.7 m

2.3.5 Clima ondosso ed eventi di mareggiate

Il clima ondosso è stato ricostruito a partire ai dati della boa ondometrica Nausicaa, posta in opera nel 2007 nell'ambito del progetto Beachmed-E a 8 km al largo di Cesenatico su un fondale di 10 m di profondità (44.2155°N; 12.4766°E); la boa è gestita dall'ARPA regionale⁴ ed acquisisce ogni 30 minuti dati di altezza significativa (Hs), direzione di provenienza (N°), periodo medio (Tm) e periodo di picco delle onde (Tp); temperatura media del mare.

I dati disponibili partono dal maggio 2007 ma nonostante un campionamento tutto sommato costante, il dataset presenta periodi continui di non funzionamento anche molto lunghi: dal 23-02-2014 al 23-06-2014 e dal 24-01-2015 al 01-03-2015. A tal riguardo, per non incorrere in problematiche dovute alla disomogeneità dei dati si è proceduto al recupero di dati da altre fonti, nello specifico:

- dati da rete RON (Rete Ondometrica Nazionale) boa di Venezia per il 2014 (per gentile concessione di Ispra).
- dati dalla piattaforma "Angelina" per il 2014-2015 (per gentile concessione di eni).

Per la caratterizzazione del clima ondosso sono stati quindi utilizzati i dati della boa Nausicaa, con integrazione dalla boa Venezia per i periodi mancanti; questi ultimi dati sono stati trasformati secondo il *criterio della similitudine dei fetch efficaci* (Gardelli *et al.*, 2007), lasciando invariata la direzione di provenienza:

$$\mathbf{H}_{Nausicaa} = [\mathbf{F}_{eff:Nausicaa} / \mathbf{F}_{eff:Venezia}]^{1/2} * \mathbf{H}_{Venezia} \quad [2]$$

Sui soli dati di Nausicaa la media annuale di dati mancanti è risultata del 19%, concentrati oltretutto nei mesi invernali quando si verificano le mareggiate più intense.

Sono state calcolate le frequenze assolute e cumulate per le classi d'altezza d'onda raggruppate ogni 0.5 m e per direzione di provenienza in settori di ampiezza di 30°, Tabella 2.3.

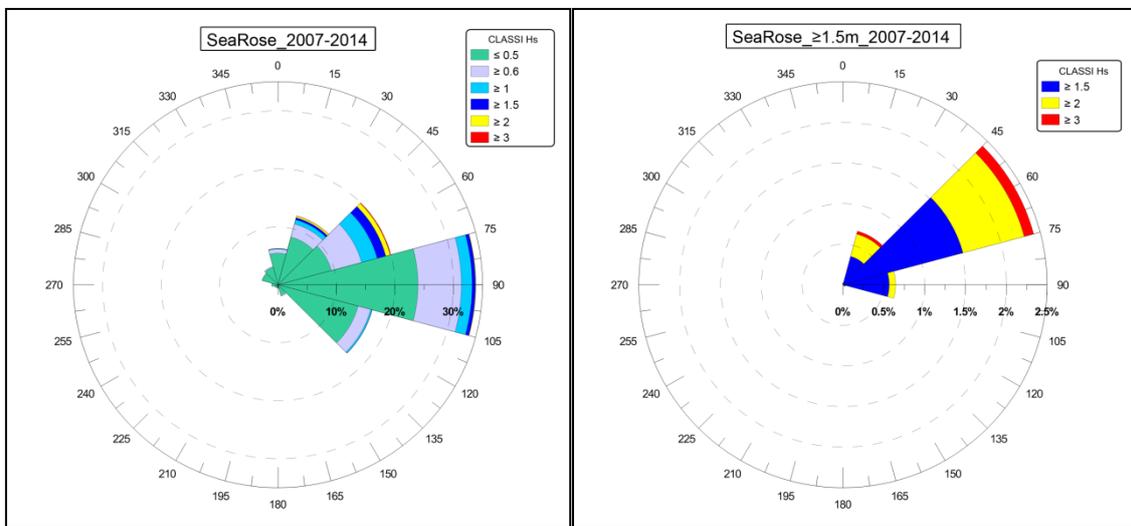
In Figura 2.21. gli stessi dati in formato grafico a rosa, È evidente come tutto il moto ondosso incidente provenga dal I e II Quadrante e sia concentrato in primis nelle Hs fino a 0.5 m e secondariamente tra 0.5 e 1 m.

L'isolamento delle Hs superiori a 1.5 m (Figura 2.21 a destra), soglia di attenzione per le mareggiate, evidenzia come queste ultime si concentrino tra i 45° e 75°.

⁴ http://www.arpa.emr.it/sim/?osservazioni_e_dati/dexter

Tabella 2. 3 - Frequenze moto ondoso Nausicaa – 2007/2014.

N°/[m]	≤0.5	>0.5	≥1	≥1.5	≥2	≥3	TOT
0°	5.44%	0.73%	0.08%	0.02%	0.01%		6.27%
30°	8.53%	2.32%	0.76%	0.36%	0.28%	0.04%	12.29%
60°	9.46%	5.35%	2.77%	1.52%	0.78%	0.12%	20.00%
90°	23.95%	7.43%	1.84%	0.57%	0.08%		33.86%
120°	14.19%	2.23%	0.24%	0.03%	0.01%		16.69%
150°	1.80%	0.18%	0.03%				2.02%
180°	0.56%	0.01%	0.00%			0.00%	0.57%
210°	0.48%	0.00%	0.00%				0.49%
240°	0.62%	0.03%					0.65%
270°	1.03%	0.02%	0.00%				1.06%
300°	2.74%	0.08%	0.00%				2.83%
330°	3.09%	0.17%	0.01%				3.27%
TOT	71.91%	18.55%	5.74%	2.49%	1.15%	0.16%	100.00%

Figura 2. 21 – A sinistra: Rosa del Clima ondoso – Nausicaa 2007/2014; a destra: Rosa del Clima ondoso Nausicaa $H_s \geq 1,5$ m.

Per quanto riguarda poi l'individuazione degli eventi di mareggiata, l'analisi è stata effettuata secondo i criteri individuati nel progetto MICORE da Armaroli *et al.*, 2012.

Si considera *mareggiata* un evento durante il quale:

- $H_s \geq 1.5$ m per 6 ore consecutive
- $H_s < 1.5$ m per 3 ore consecutive, evento concluso o eventi distinti

I dati utilizzati coprono il periodo maggio 2007- marzo 2015 registrati dalle boe Nausicaa e Angelina. Sono stati così individuati 101 eventi di mareggiata.

I grafici successivi mettono in evidenza come il numero di mareggiate all'anno sia piuttosto costante ad esclusione del 2014 e del 2015, Figura 2.22.

Tali eventi si concentrano nei mesi invernali e secondariamente in Maggio ma è importante sottolineare che il numero complessivo di mareggiate è molto probabilmente sottostimato a causa dell'elevata percentuale di misure mancanti proprio nei mesi di maggior interesse (gennaio, febbraio, novembre e dicembre).

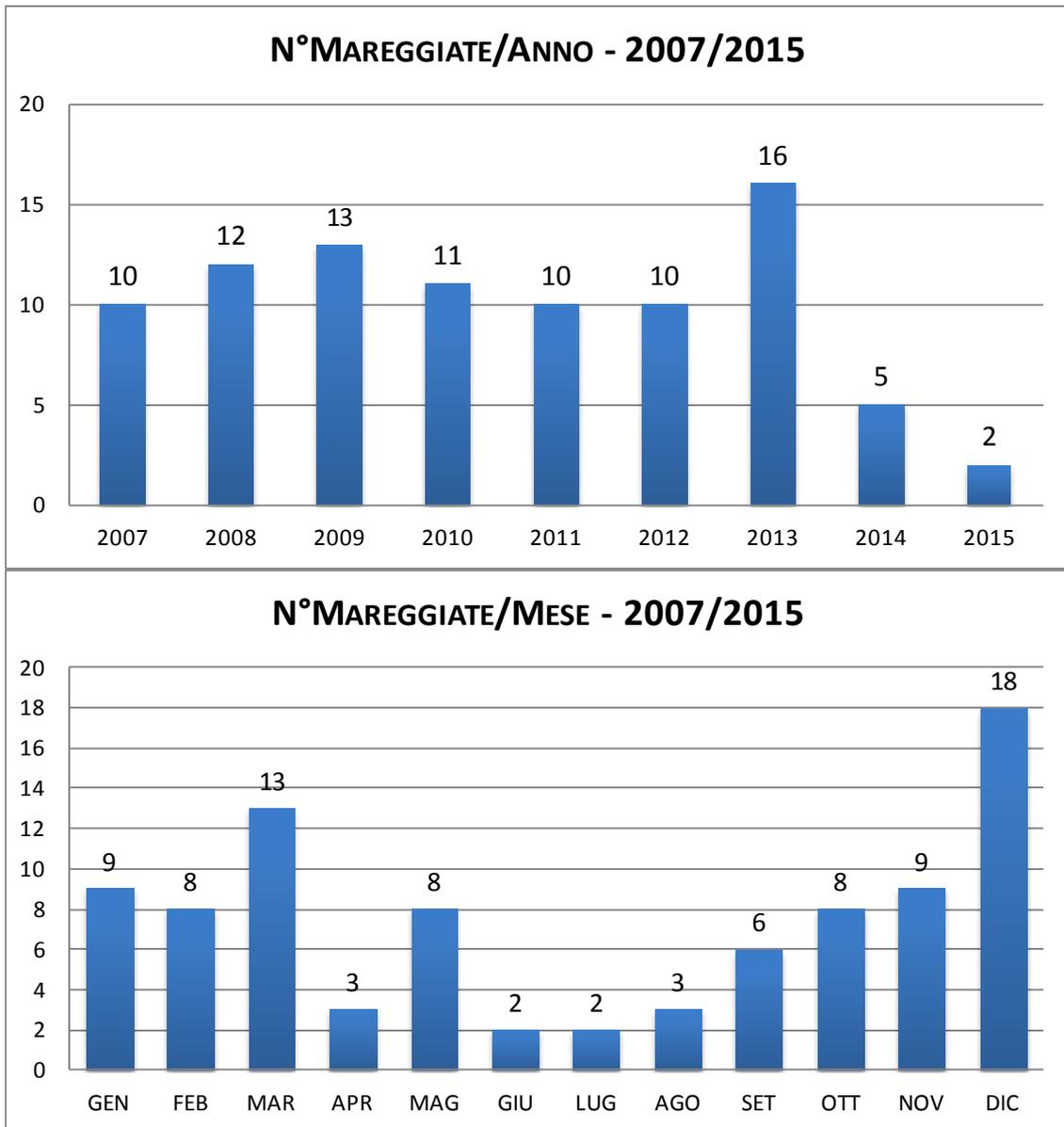


Figura 2. 22 - N° eventi mareggiata per anno (sopra) e per mese (sotto).

Le mareggiate identificate hanno una durata media di 18 ore e l'evento più lungo è stato di 71 ore (20-23 gennaio 2011).

La maggior parte di questi eventi si caratterizza per Hs massime tra 2 e 2.5 m. Figura 2.23.

La direzione preferenziale di provenienza delle mareggiate è indubbiamente N-E, in particolare dalle direzioni comprese tra i 45°-75° N, pochissime sono le mareggiate dal II quadrante, Figura 2.24.

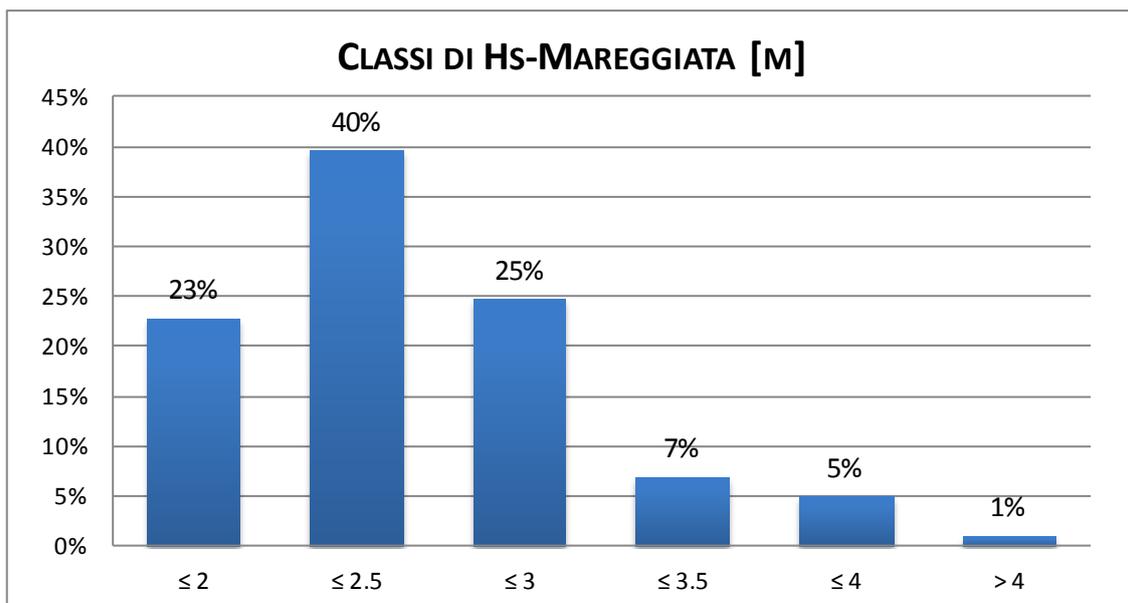


Figura 2. 23 - Classi di altezza d'onda per gli eventi di mareggiata

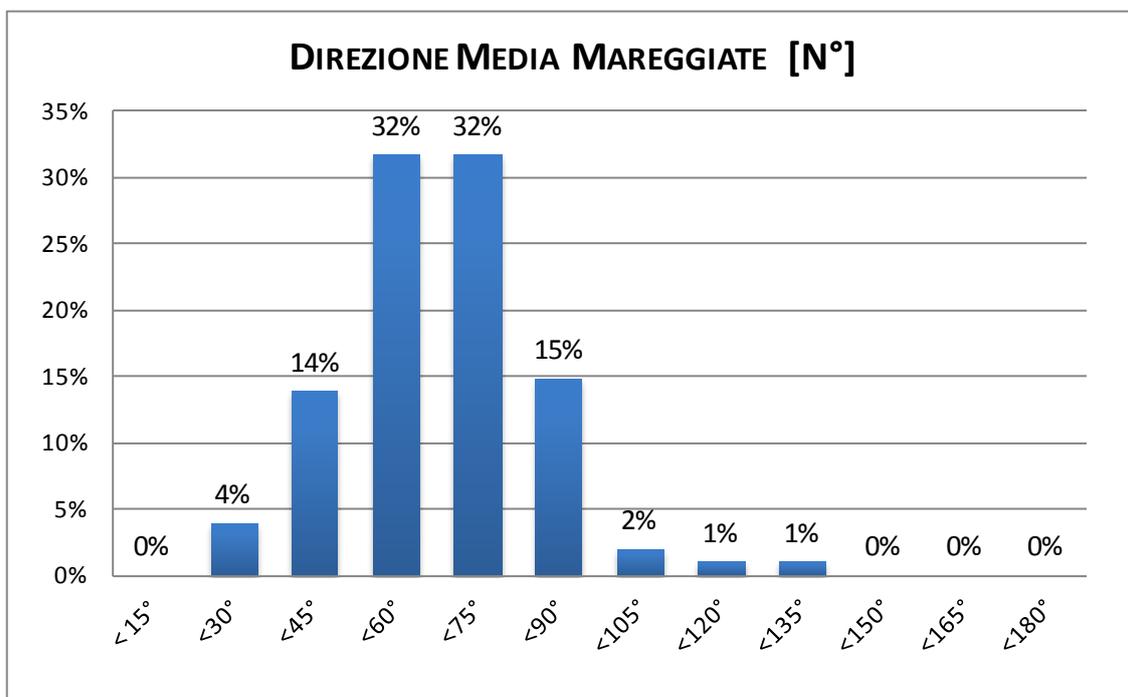


Figura 2. 24 - Direzione media di provenienza degli eventi di mareggiata.

Infine, nel grafico in Figura 2.25, sono rappresentati per ogni evento di mareggiata, il livello medio del mare durante l'evento ed il livello massimo. Il livello medio del mare durante gli eventi di mareggiata è molto variabile e nella maggior parte dei casi non raggiunge livelli di allerta ma ciò è abbastanza ovvio poiché le mareggiate possono durare da diverse ore a diversi giorni durante i quali si succedono alte e basse maree.

Andando a considerare i livelli massimi, registrati durante ogni singolo evento, si può notare invece che molto spesso viene raggiunta la soglia di superamento della massima marea sizigiale ($> 0.45\text{m}$) ed in alcuni casi viene superata anche la soglia di allerta per le "acque alte" ($\geq 0.7\text{m}$). Per la precisione su 101 eventi di mareggiata, individuati tra il 05/2007 e il 01/03/2015, in 61 casi il livello marino ha superato $+0.45\text{ m}$ (60%) di cui in 23 casi ha superato $+0.70\text{ m}$ (23%).

In conclusione, nonostante l'indipendenza delle due tipologie di eventi estremi (mareggiata e acqua alta) circa 1 volta su 4 (23%) gli eventi si sono verificati contemporaneamente.

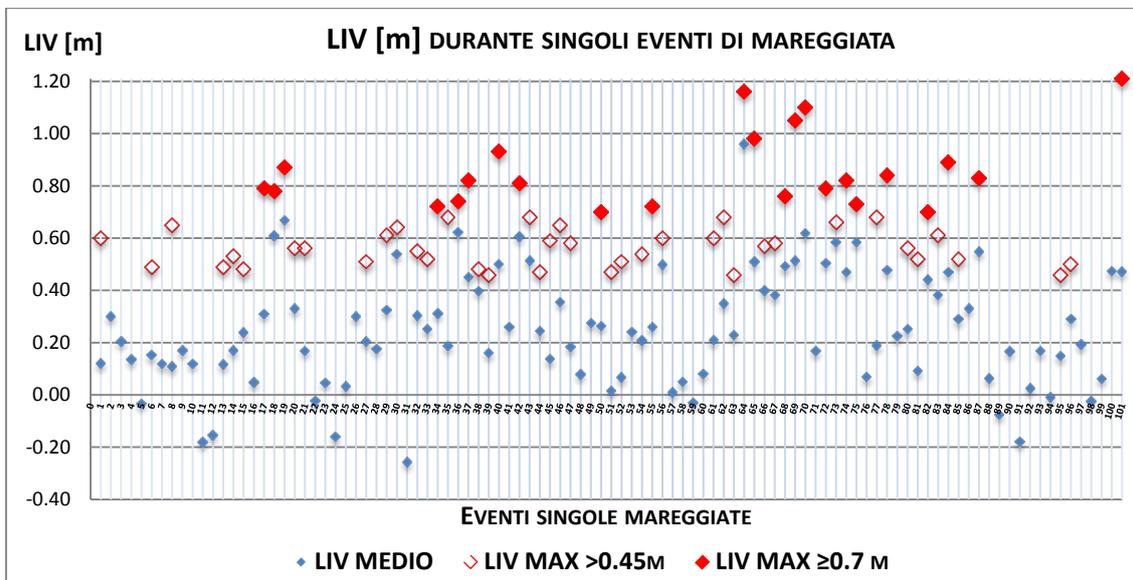


Figura 2. 25 - Livello marino durante gli eventi di mareggiata.

2.4. CARATTERIZZAZIONE MORFODINAMICA DELLA SPIAGGIA

2.4.1. Spiaggia Emersa

Lo stato morfodinamico della spiaggia, come accennato al paragrafo 1.4, si riferisce alle interazioni tra i processi idrodinamici (onde, correnti e maree) ed i relativi aggiustamenti dei sedimenti, quindi alle morfologie. Secondo Writh & Short, 1984 lo stato morfodinamico della spiaggia (regime microtidale) è controllato dalle condizioni ambientali, dalle caratteristiche dei sedimenti e dal clima ondoso. Secondo gli autori possono essere distinti sei stati diversi che vanno da *fully dissipative* a *highly reflective* e quattro stati *intermediate*.

Tale distinzione avviene in base al *Surf scaling parameters* (Guza & Inman, 1975).

Se la morfologia di una spiaggia in un determinato momento è funzione delle condizioni agenti e di quelle immediatamente antecedenti, è anche vero che sul lungo periodo tenderà a mostrare uno stato modale o molto frequente (*modal beach morphodynamic type*) che a sua volta è determinato dal clima ondoso modale; la variabilità attorno al clima modale, ossia tutto lo spettro di onde più alte e più basse determinano la mobilità della spiaggia.

In sintesi, lo stato morfodinamico varierà in relazione all'altezza d'onda poiché le caratteristiche del sedimento tendono a rimanere simili nel tempo.

Quando le variazioni nel clima ondoso sono dominate dai cambiamenti stagionali, cioè abbiamo onde alte di tempesta in inverno e onde lunghe in estate, ci si aspetta una variabilità stagionale nello stato morfodinamico che va un profilo più dissipativo in inverno ad un profilo più riflettivo in estate.

In questa parte della ricerca l'obiettivo è stato di ottenere una caratterizzazione modale e generale delle spiagge naturali dell'area di studio.

A tale scopo sono stati calcolati alcuni indici ampiamente utilizzati in letteratura:

ϵ - *Surf scaling parameters* (Guza & Inman, 1975)

$$\epsilon = 2\pi^2(H_b/gT^2 \text{tg}^2\beta) \quad [3]$$

ϵ definisce la tipologia della spiaggia tra Riflettiva ($\epsilon < 1$), Intermedia e Dissipativa ($\epsilon > 30$); valori maggiori di ϵ indicano una surf zone più ampia e quindi una maggiore dissipazione dell'energia delle onde incidenti

ξ_0 - *Surf similarity parameters* (Battjes, 1974)

$$\xi_0 = \text{tg}\beta/\sqrt{(H_0 / L_0)} \quad [4]$$

ξ_0 predice la tipologia di frangente:

surging or collapsing $\xi_0 > 3.3$

<i>plunging</i>	$0.5 < \xi_0 < 3.3$
<i>spilling</i>	$\xi_0 < 0.5$

Questo parametro deriva direttamente del più noto:

ξ_b - Iribarren number (Iribarren & Nogales, 1949)

$$\xi_b = \text{tg}\beta / \sqrt{(H_b / L_0)} \quad [5]$$

Nelle formule appena proposte, [3] [4] [5], H_0 e H_b indicano rispettivamente l'altezza d'onda significativa a largo e al frangimento.

H_b può essere calcolata in relazione ad H_0 secondo Komar & Gaughan, 1972:

$$H_b = 0.39 g^{0.2} (T H_0^2)^{0.4} \quad [6]$$

L_0 è la lunghezza d'onda a largo, calcolata secondo la Teoria lineare del moto ondoso- Teoria di Airy, in relazione al periodo d'onda a largo (T_0):

$$L_0 = (gT^2)2\pi = 1.56 T^2 \quad [7]$$

$\text{tg}\beta$, nella formula [5], è la pendenza media del tratto intertidale (*foreshore slope*) (Benavente *et al.*, 2002) ed è stata calcolata tra +0.5m e -0.5m l.m.m. (alta marea in sigizie: +0.45 m), estratte dai rilievi batimetrici effettuati da Arpa nel 2012⁵, considerando solo i tratti di costa liberi da barriere (circa 17 Km su 37) la pendenza media è risultata di 1.4° (0.02 $\text{tg}\beta$).

In sintesi, secondo Wright & Short, 1984 la spiagge possono essere distinte in sei principali stati morfodinamici in base agli indici fin qui considerati, nello specifico:

- Spiaggia riflettive $\epsilon < 1$, $\xi_b > 2$
- Spiagge dissipative $\epsilon > 30$, $\xi_b < 0.23$

Seguendo le metodologie ed utilizzando i dati appena descritti sono stati calcolati i seguenti indici:

$$\epsilon = 270; \xi_0 = 0.11; \xi_b = 0.11$$

secondo i quali le spiagge considerate possono essere indicate come spiagge di tipo dissipativo, almeno da un punto di vista generale e modale.

A tal riguardo è importante specificare che uno studio completo sulla morfodinamica della spiaggia dovrebbe prenderne in considerazione ed analizzarne la grande variabilità, soprattutto stagionale, mediante rilievi topografici di dettaglio (e.g. Grottoli & Ciavoli, 2012; Armaroli *et al.*, 2013). Un tale livello di approfondimento sarebbe oltre gli scopi di questo studio, per il quale si è ritenuta sufficiente un'analisi di tipo teorico-matematico basata ad ogni modo su dati topografici reali per quanto mediati sull'intera costa.

⁵ nell'ambito della "5^a campagna di rilievo della rete topo-batimetrica e analisi dell'evoluzione recente del litorale emiliano-romagnolo" a cura di ARPA e SGSS-Regione Emilia-Romagna.

2.4.2 Spiaggia sommersa e stima della profondità di chiusura, a breve e lungo termine.

Il concetto di Profondità di chiusura (*Closure depth*) è fondamentale dal punto di vista della morfodinamica della spiaggia nel suo complesso, poiché è il confine che distingue una zona attiva verso terra da una zona molto meno attiva verso mare, per un dato periodo temporale (Nicholls *et al.*, 1996). La zona attiva è quella coinvolta nello scambio di sedimenti che coinvolge oltre alla spiaggia sommersa, la spiaggia emersa e le dune.

La stima della profondità di chiusura è un'osservazione di tipo statistico poiché allargando il periodo d'osservazione aumentano le probabilità di osservare un evento capace di movimentare sedimento a profondità più elevate (Pranzini & Wetzel, 2008).

Seguendo la metodologia adottata in Pranzini & Wetzel, 2008, sono stati calcolati i valori di *Dc typical* ed *extreme*. I primi si riferiscono a valutazioni su scale temporali da piccole a medie (giornaliera, stagionale, annuale) mentre i secondi fanno riferimento a scale temporali maggiori (decadi, secoli) teoricamente fino alle geologiche.

Per la determinazione della D_c è stata utilizzata la formula empirica di Hallermeier, 1978:

$$D_c = 2.28 H - 68.5 H^2 / g T^2 \quad [8]$$

dove H e T sono rispettivamente altezza d'onda significativa e periodo di picco del moto ondoso locale e g è l'accelerazione gravitazionale.

I dati ondametrici utilizzati fanno riferimento alla boa ondometrica Nausicaa, posizionata a largo di Cesenatico, in corrispondenza di un fondale di 10 m di profondità.

Il dataset considera un periodo di circa 7 anni e mezzo, da maggio 2007 a dicembre 2014.

La stima dei valori estremi è stata effettuata sulla base di H e T per diversi tempi di ritorno (Tr) ottenuti mediante *extreme value analysis* (EVA) secondo Braca *et al.* 2013a, analisi che sarà descritta ed approfondita nel capitolo 3.

Stima dei valori ordinari della D_c (typical D_c)

La D_c è stata calcolata per ogni elemento del dataset disponibile, caratterizzato da H_s (altezza d'onda significativa) e T_p (periodo di picco), ottenendo una distribuzione completa del valore D_c . Sono stati quindi estrapolati il valore medio (D_{cMED}) e massimo (D_{cMAX}) dell'intera distribuzione e il valore corrispondente al 95% ($D_{c95\%}$) nella curva delle frequenze cumulate della distribuzione totale della D_c .

Secondo Hallermeier, 1978, su spiagge naturali il limite verso mare della spiaggia attiva, ossia la parte di spiaggia sommersa in cui si hanno significativi movimenti di sedimento cross-shore, è ben stimato dalla D_c in associazione all' H_s eccedente le 12 ore/anno, ossia lo 0.137% dei dati a disposizione (D_{cH}). Di seguito i valori calcolati:

Tabella 2. 4 - Valori ordinari di Dc

	Dc [m]	Hs [m]	Tp [s]
Dc_{MED}	-0.9	0.4	4.3
Dc_{95%}	-2.7	1.3	6.6
Dc_{MAX}	-7.6	3.9	9.1
Dc_H	-4.4	2.2	7.2

La spiaggia sommersa superiore (*Upper shoreface*) è la zona attiva ed il suo limite, su un periodo di circa 8 anni, può essere stimato a circa -4 m di profondità, dove agisce un'onda di 2.2 m. La spiaggia sommersa inferiore (*Lower shoreface*) è la zona dove la movimentazione di sedimento avviene solo in concomitanza di eventi ad elevata energia per cui meno frequenti; tale limite è quindi strettamente legato all'evento singolo ed in quest'analisi è stato considerata un'onda di 3.9 m, la maggiore del dataset, che secondo questo studio può agire fino a profondità di circa -8 m.

Stima dei valori estremi della Dc (estreme Dc)

I valori estremi di Dc sono stati calcolati inserendo nell'equazione [8] le misure di H e T per tempi di ritorno di 10, 20, 50 anni; tali misure sono state stimate attraverso l'EVA, analisi dei valori estremi che verrà illustrata in dettaglio nel paragrafo 3.3. Di seguito i valori calcolati:

Tabella 2. 5 - Valori estremi di Dc

	Dc [m]	Hs [m]	Tp [s]
Dc_{Tr10}	-8.7	4.3	10.6
Dc_{Tr20}	-9.1	4.5	10.9
Dc_{Tr50}	-9.7	4.8	11.3

È interessante notare come, sebbene Dc_{Tr10} e Dc_{Tr50} comportino una differenza minima sia in termini di Hs (0.5 m) che in termini di Dc (1m), tali cifre comportino in realtà un cambiamento dello spazio d'azione dei processi costieri molto grande; bisogna considerare infatti che a quelle profondità, tra -8.7 m e -9.7 m, la distanza tra le batimetriche si aggira tra 1-1.5 km, Figura 2.26, cioè cambiando prospettiva temporale dalla decade a mezzo-secolo avremo circa 1.5 km in più di fondale potenzialmente in cambiamento. Ciò naturalmente assume particolare importanza più che altro da un punto di vista ingegneristico.

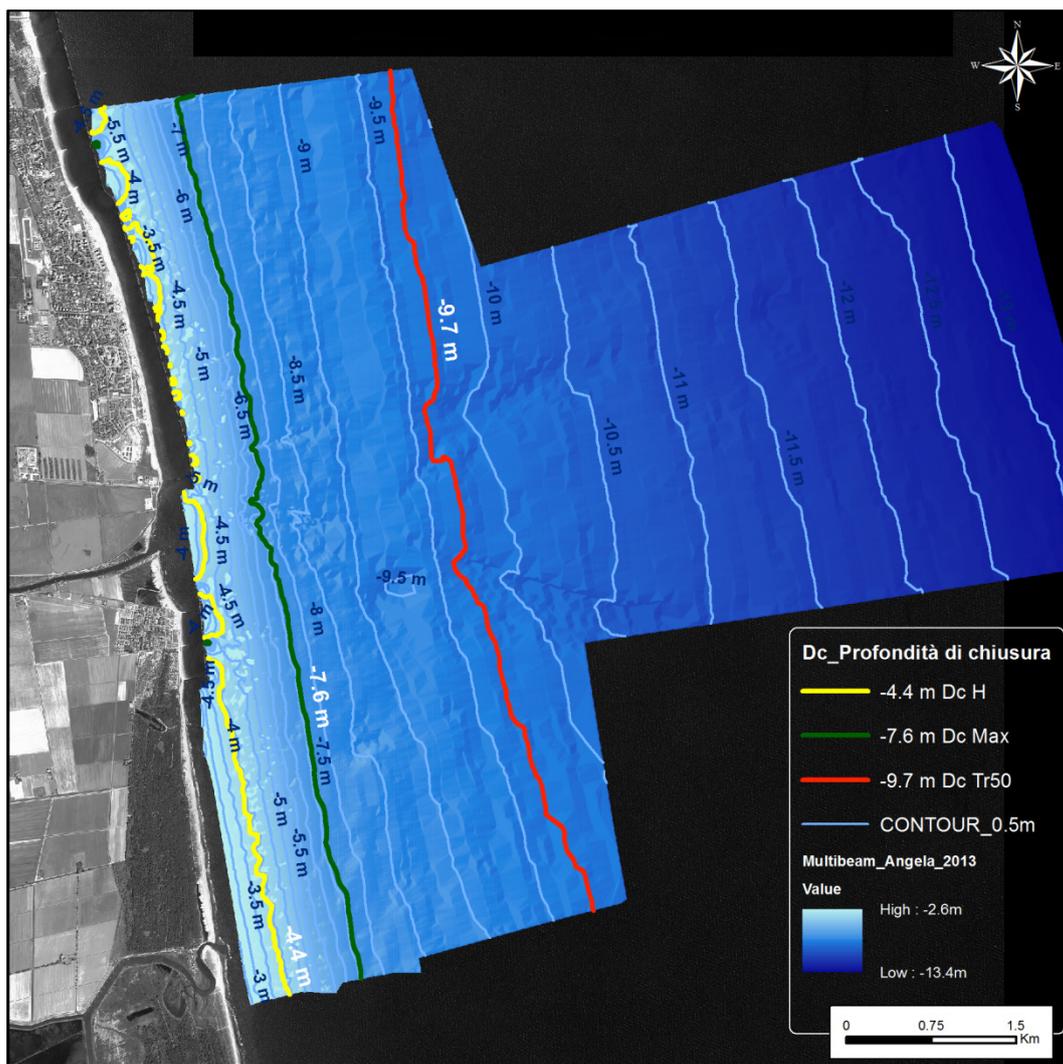


Figura 2. 26 – Mappatura di D_{cH} , D_{cMAX} , D_{cTr50} su rilievo batimetrico multibeam dell'area costiera di fronte Foce Fiumi Uniti.

2.5 PANORAMICA SULLA VEGETAZIONE COSTIERA RAVEN-NATE

I fattori paleogeografici, e in parte quelli bioclimatici, hanno determinato delle differenziazioni significative nella flora psammofila dei vari territori italiani (Brullo *et al.*, 2001).

La vegetazione costiera è una vegetazione strettamente connessa alla presenza di un netto gradiente, mare-terra, di fattori ambientali limitanti quali vento, salinità e consolidamento del sedimento sabbioso. Tali condizioni definiscono una precisa sequenza spaziale delle comunità, in cui le singole cenosi presentano areali molto vasti apparentemente svincolati dal macroclima (Gamper *et al.*, 2008). “L’influenza del macroclima è direttamente proporzionale alla distanza dalla linea di costa” (Gamper *et al.*, 2008), per cui avremo comunità con areali vasti verso mare e comunità sempre più specifiche del territorio verso l’entroterra. Da un punto di vista biogeografico il litorale settentrionale dell’Adriatico viene, infatti, inserito nella regione Eurosiberiana, provincia Appennino-Balcanica, subprovincia Padana, Figura 2.27. (Rivas-Martínez, 2004) e da un punto di vista bioclimatico l’area viene classificata a bioclimate Temperato oceanico (Toc), con termotipo mesotemperato.

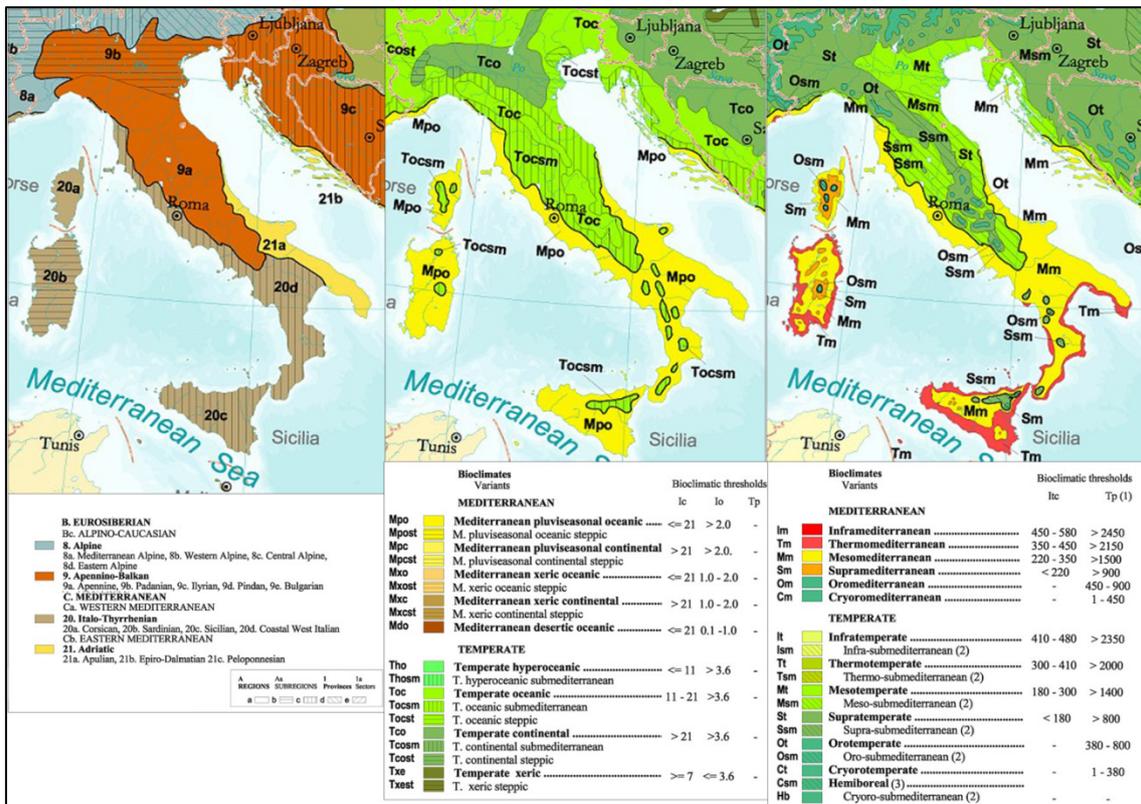


Figura 2. 27 – Inquadramento bioclimatico dell’area di studio secondo Rivas-Martínez, 2004.

Tale assetto bioclimatico rende l'area in esame senza dubbio una peculiarità nell'ambito della zona mediterranea che, ad eccezione di un tratto della costa genovese, risulta l'unico settore costiero del Mediterraneo a non rientrare nella Regione climatica mediterranea (Rivas-Martínez, 2004). Ciò fa sì che le associazioni vegetali dell'Alto Adriatico abbiano specie diverse rispetto al resto della penisola, adattate allo stesso ruolo ecologico, cioè specie vicarianti geografiche.

Come fin qui delineato, le formazioni dunose dell'Emilia-Romagna sono estremamente ridotte e in uno stato di conservazione precario, di conseguenza, visti gli stretti rapporti tra dune e vegetazione anche la successione dinamica naturale dei litorali sabbiosi ne risulta fortemente alterata. La successione della vegetazione spontanea descritta schematicamente in Figura 2.28 risulta già da decenni compromessa. L'erosione marina inghiotte la spiaggia e scalza le dune, di conseguenza le prime comunità pioniere si ritrovano in posizioni più arretrate mentre le associazioni successive sono costipate e mescolate sulle prime dune, soprattutto l'agropireto e l'ammofileto (Cencini, 1980).

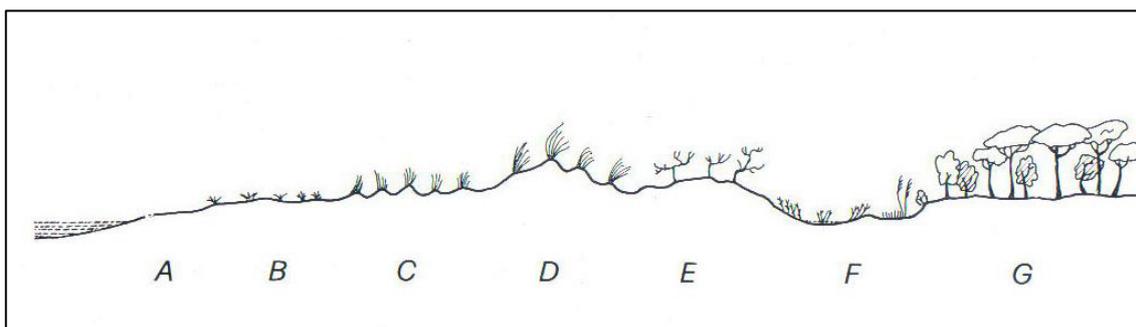


Figura 2. 28 – Schema della successione vegetazionale reale del litorale ravennate. (modificato da Giacomini, 1974 in Cencini, 1980):

- A – Zona battuta dalle onde (afitoica)
- B – Zona di battito temporaneo, sabbie a cakileto
- C – Dune basse proprie delle spiagge larghe, sabbie ad agropireto
- D – Primo cordone dunoso propriamente detto ad ammofileto
- E – Dune rinsaldate a bassa boscaglia di olivello spinoso e ginepro
- F – Depressioni interdunali temporaneamente inondate, con vegetazione igrofila
- G – Paleodune rimboschite a pino marittimo (pinete demaniali)

”In generale si osserva una retrocessione spaziale dell'intero sistema psammofilo” (Ferrari, 1980). Lo sfruttamento balneare della spiaggia comporta la perdita di tutta la fascia pioniera e dell'agropireto a causa delle ripuliture stagionali con mezzi meccanici. Sulle dune il calpestio e l'abbandono di rifiuti favoriscono l'inserimento di specie ruderali nitrofile come *Ambrosia maritima*, *Oenothera biennis*, *Conyza canadensis* (Ferrari, 1980). Le interruzioni dei cordoni, per la costruzione di stabilimenti, aggiungono fragilità al sistema che diviene più erodibile.

Nella successione spontanea di Figura 2.28 troviamo le paleodune a pino marittimo come stadio finale anche se, come già sottolineato, la pineta non è un bosco litoraneo naturale ma naturalizzato. In Emilia Romagna esistono sulla costa più nuclei di pineta demaniale gestiti dal Corpo Forestale dello Stato e protetti come Riserve Statali o SIC. Le pinete sorgono su antichi cordoni dunosi elevati di alcuni metri sul livello del mare, il suolo è composto quindi principalmente da sabbie ed è un suolo poco evoluto. L'alternarsi di zone sopraelevate e bassure, corrispondenti alle depressioni interdunali, ne determina una differenziazione come vicinanza alla falda che condiziona il diverso riunirsi delle specie. Le pinete sono formate da pino domestico e pino marittimo, il secondo generalmente più vicino al mare, accompagnate da specie tipiche di bosco xerofilo quali il leccio, fillirea e pungitopo e specie di bosco più igrofilo quali pioppo, *Fraxinus oxycarpa* e farnia. In queste pinete sono presenti le problematiche riguardanti l'eccessiva vicinanza al mare, mancano le formazioni vegetali arbustive protettive che si ritrovano solo in piccole radure formatesi per la morte dei pini. Altri fattori di deperimento sono l'innalzamento della falda freatica, dovuto alla subsidenza, che determina atrofia dell'apparato radicale, il parassitismo e l'inquinamento.

Nonostante la presenza di una rete di aree di protette di vario grado, le comunità vegetali litoranee del ravennate sono a rischio di rarefazione o scomparsa, a causa degli impatti antropici, diretti ed indiretti (Merloni & Piccoli, 2007).

L'inquadramento sintassonomico della vegetazione delle dune costiere ravennate segue essenzialmente i lavori di Merloni *et al.*, 2015, Lazzari *et al.*, 2008, 2012, Merloni & Piccoli, 2007, Gamper *et al.*, 2008 e Sburlino *et al.* 2013.

Come riportato dagli autori, la nomenclatura delle specie vegetali segue Conti *et al.* 2015, come indicato nell'IPFI - *Index Plantarum Florae Italicae*. Per completezza, alla classificazione fitosociologica viene affiancata quella della Rete Natura 2000 (Direttiva Habitat 42/93/CEE).

Zona afitoica

È la zona della spiaggia priva di vegetazione poiché a diretto contatto con il mare. Qui l'azione meccanica del moto ondoso e l'elevato stress termico-salino, determinano condizioni troppo instabili e proibitive per l'attecchimento di organismi vegetali. Questa zona comprende la battigia e la spiaggia intertidale, sino al limite d'incidenza delle alte maree.

Vegetazione erbacea pioniera della spiaggia sabbiosa

CAKILETEA MARITIMAE Tüxen & Preising ex Br.-Bl. & Tüxen, 1952

EUPHORBIETALIA PEPLIS Tx 1950

Euphorbion Peplis Tx 1950

Salsolo kali-Cakiletum maritimae Costa & Manzanet, 1981 nom. mut. propos in Rivas-Martínez *et al.* 2002

Definito come “linea di difesa” dell'ecosistema litoraneo (Ferrari, 1980), il cakileto è una comunità di piante pioniere a ciclo annuale (terofite). La specie che dà il nome all'associazione è *Cakile maritima*, una crucifera succulenta fortemente adattata all'ambiente arido; altre piante tipiche sono *Salsola tragus*, *Chamaesyce pepelis*, *Atriplex prostrata*; la presenza di *Xanthium italicum* (neofita invasiva secondo l'IPFI) denota condizioni di maggiore nitrofilia. Frequenti sono le specie di altre associazioni psammofile in contatto catenale (Merloni *et al.*, 2015). Queste piante formano una comunità pioniera instabile, la diversità specifica è molto bassa come anche la copertura superficiale. Gli apparati radicali permettono la formazione di piccoli cumuli sabbiosi alla base della pianta o sottovento ad essa, preparando l'ambiente per l'attecchimento di piante più esigenti.

Si tratta di comunità molto rarefatte (Lazzari *et al.*, 2012), poiché all'avvicinarsi della stagione balneare le spiagge vengono sistematicamente “pulite” e spianate con mezzi meccanici, cosa che determina la scomparsa di tale associazione.

Vegetazione delle dune embrionali

AMMOPHILETEA Br.-Bl. & Tüxen ex Westhoff, Dijk & Passchier, 1946

AMMOPHILETALIA AUSTRALIS Br.-Bl., 1933

Ammophilion australis Br.-Bl., 1921 corr. Rivas-Martínez, Costa & Izco in Rivas-Martínez, Lousã, T.E. Díaz, Fernández-González & J.C. Costa, 1990

Echinophoro spinosae-Elymetum farcti Géhu, 1987

Quest'associazione si caratterizza per una maggiore complessità dell'aggregazione vegetale, con maggiori coperture e con piante perenni. *Elytrigia juncea* (= *Agropyron junceum* = *Elymus farctus*) è la graminacea caratteristica di questa associazione. I suoi semi sono in grado di germinare solo sui piccoli accumuli sabbiosi, quindi ad una certa distanza dalla falda salata, e ad una certa distanza da riva, quindi dall'influenza marina; caratteristica fondamentale della specie sono i complessi apparati radicali orizzontali che strisciano a pochi centimetri di profondità, intrappolando efficacemente la sabbia e formando accumuli eolici continui lateralmente e dalle altezze maggiori. Altre specie frequenti in questa associazione sono *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias*, *Xanthium italicum*, nonché le cosmopolite *Ambrosia coronopifolia*, *Cynodon dactylon* e *Cenchrus spinifex*. Comune è la presenza di specie delle associazioni contigue, definita “compenetrazione” (Merloni *et al.*, 2015)

HABITAT NATURA 2000: 2110 - Dune embrionali mobili

Vegetazione perenne dell'avanduna attiva (Dune bianche)

AMMOPHILETEA Br.-Bl. & Tüxen Ex Westhoff, Dijk & Passchier, 1946

AMMOPHILETALIA AUSTRALIS Br.-Bl., 1933

Ammophilon australis Br.-Bl., 1921 corr. Rivas-Martínez, Costa & Izco in Rivas-Martínez, Lousã, T.E. Díaz, Fernández-González & J.C. Costa, 1990

Echinophoro spinosae-Ammophiletum australis (Br.-Bl. 1933) Géhu, Rivas-Martínez & R. Tx. 1972 in Géhu *et al.*, 1984

Questo stadio della successione è dominato dalla presenza di *Ammophila arenaria* = *A. littoralis*, lo sparto pungente. Anche questa pianta è una graminacea perenne ed è caratterizzante l'associazione. L'ammofila si sviluppa con culmi molto robusti, i cespi di foglie erette sono alti fino a 1.50 metri e si sviluppano in maniera molto intricata, garantendo una copertura del suolo molto più ampia (50-70%). La conformazione della pianta determina un accumulo di sabbia alla sua base molto efficiente, per cui la duna cresce in altezza e in estensione. L'ammofila cresce insieme alla duna in un esemplare processo di *feed-back*: la pianta determina l'accumulo di sabbia e a sua volta è stimolata nella crescita dal seppellimento. Inoltre l'esteso e ramificato apparato radicale dà stabilità alla duna e la notevole capacità di rigenerazione vegetativa garantisce una rapida ripresa della pianta, fondamentale quando eventi di mareggiata colpiscono la duna lasciando scalzati i rizomi e asportando sabbia.

Nell'ammofiletto la diversità specifica aumenta in modo significativo, decine di specie tra le quali *Echinophora spinosa*, *Medicago marina*, *Pancratium maritimum*, *Cyperus capitatus* e molte altre crescono assieme all'ammofila. In condizioni di disturbo sono comuni le alloctone *Cenchrus spinifex*, *Ambrosia coronopifolia*, *Yucca gloriosa*, *Oenothera stucchii*. Anche la fauna diventa più abbondante, molto evidente sui litorali italiani è la presenza di *Theba pisana*, mollusco pulmonato, che produce un continuo accumulo di gusci che arricchiscono in carbonato il suolo.

Nelle radure di questa vegetazione perenne si possono rinvenire formazioni terofitiche riferibili all'alleanza *Laguro ovati-Vulpion fasciculatae* dell'habitat 2230 "Dune con prati dei Malcolmietalia", presenza correlata a forme di disturbo (Merloni *et al.*, 2015).

HABITAT NATURA 2000: 2120 - Dune mobili del cordone litorale con presenza di *Ammophila arenaria* (dune bianche)

Vegetazione dei pratelli terofitici

TUBERARIETEA GUTTATAE (Br.-Bl. In Br.-Bl., Roussine & Nègre, 1952) Rivas Goday & Rivas-Martínez, 1963 nom. mut. propos. in Rivas-Martínez *et al.*, 2002

CUTANDIETALIA MARITIMAE Rivas-Martínez, Díez Garretas & Asensi 2002

Laguro ovati-Vulpion fasciculatae Géhu & Biondi 1994

Sileno coloratae-Vulpietum membranaceae Pignatti 1953 corr. Géhu et Scoppola in Géhu, Scoppola, Caniglia, Marchiori et Géhu-Franck 1984

Quest'associazione si caratterizza per una certa sporadicità, si va ad inserire infatti al posto delle associazioni perenni dell'avanduna e del retroduna, in caso di presenza di fattori disturbo che alterano la copertura vegetale originaria.

È appunto una vegetazione annuale in cui le specie più comuni sono *Silene canescens* (= *S. colorata* subsp. *canescens*), *Silene conica*, *Vulpia fasciculata* (= *V. membranacea*), *Lagurus ovatus*, *Phleum arenarium*, *Medicago littoralis*, *Anisantha diandra* (= *Bromus gussonei*), oltre alle alloctone *Ambrosia coronopifolia*, *Cenchrus spinifex* (= *C. incertus*), *Oenothera stucchii*.

HABITAT NATURA 2000: 2230 - Dune con prati dei Malcomietalia

Vegetazione retrodunale

KOELERIO GLAUCAE-CORYNEPHORETEA CANESCENTIS Klika in Klika et Novák, 1941

ARTEMISIO-KOELERIETALIA ALBESCENTIS Sissingh, 1974

Syntrichio ruraliformis-Lomelosion argenteae Biondi, Sburlino et Theurillat in Sburlino, Buffa, Filesi, Gamper et Ghirelli, 2013

Tortulo-Scabiosetum Pignatti, 1952

La vegetazione di questa comunità si sviluppa sulle dune più interne dai pendii più dolci ed un apporto sedimentario quasi nullo, la copertura superficiale diventa completa e la duna è completamente stabilizzata, spesso indicata come “duna grigia”.

La maggiore complessità di questo stadio si evince anche dal fatto che la composizione specifica cambia secondo la posizione geografica, lungo le coste Tirreniche e meridionali troviamo le specie del Crucianello mentre nell'Alto Adriatico troviamo appunto il Tortuleto.

L'associazione si caratterizza per una copertura quasi continua da parte del muschio *Tortula ruraliformis*, da vari licheni del genere *Cladonia* e dall'emicriptofita perenne *Scabiosa argentea* (= *Lomelosia argentea*), molto diffusa anche *Fumana procumbens*. I pendii più dolci e la presenza del muschio rendono il suolo meno erodibile e più ricco d'acqua favorendo l'accumulo di sostanza organica.

Nelle stesse aree è molto comune anche l'associazione del Sileno-Vulpieto composta principalmente da *Vulpia fasciculata*, *Silene canescens* (= *S. colorata* subsp. *canescens*) ed altre piante erbacee che compongono praticelli terofitici a mosaico con l'ammofileto ed il tortuleto, laddove si viene a creare un leggero disturbo del suolo. In queste aree iniziano a diffondersi anche specie arboree e arbustive che solitamente rimangono di piccole dimensioni: ginepro, leccio, lentisco, olivello spinoso, fillirea e tamerici.

HABITAT NATURA 2000: 2130* - Dune costiere fisse a vegetazione erbacea (dune grigie)

Praterie umide mediterranee*MOLINIO-ARRHENATHERETEA* Tx., 1937*HOLOSCHOENETALIA VULGARIS* Br.-Bl. ex Tchou, 1948***Imperato cylindricae-Erianthion ravennae*** Br.-Bl. & O. Bolòs 1958*Schoeno nigricantis-Erianthetum ravennae* Pignatti, 1953*Spartinetosum versicoloris* Bertacchi e Lombardi, 2014

Questa subassociazione si ritrova nelle fasce interdunali (Merloni *et al.*, 2015b). L'ambiente ha caratteristiche del tutto differenti rispetto alle dune vere e proprie: c'è un maggiore accumulo di sostanza organica (resti di piante o gusci di molluschi) che cade dalla cresta della duna ma anche di materiale più fine (limo e argilla). Queste condizioni rendono più facile la risalita d'acqua sotterranea per capillarità, i fattori di selezione diventano il grado d'inondazione e la salinità delle acque che subisce forti variazioni con la piovosità. Si trovano quindi piante con adattamenti più o meno mercati verso l'aloofilia, alofite obbligate o alo-tolleranti. Nelle depressioni più piccole e inondate in maniera temporanea predomina *Schoenus nigricans*, giunco nero comune. HABITAT NATURA 2000: 6420: Praterie umide mediterranee con piante erbacee alte del Molinio-Holoschoenion

Arbusteti retrodunali*RHAMNO PRUNETEA* Rivas-God. & Borja Carbonell ex Tüxen, 1962*PRUNETALIA SPINOSAE* R. Tüxen, 1952***Pruno-Rubion ulmifolii*** O. Bolòs, 1954*Junipero communis-Hippophaetum fluviatilis* Géhu & Scoppola in Géhu *et al.* 1984

Un aspetto particolarmente mesofilo, floristicamente ed ecologicamente ben differenziato dalle precedenti associazioni, si rinviene lungo il litorale dell'Adriatico settentrionale; si tratta del *Junipero communis-Hippophaetum fluviatilis*, associazione legata a un bioclimate temperato, caratterizzata da *J. communis* che qui vicaria *J. macrocarpa*, specie tipicamente mediterranea (Brullo *et al.*, 2001). Si tratta di comunità vegetali ormai rare e meritevoli di attenzione e protezione, in particolare *Hippophae rhamnoides* negli ultimi anni risulta abbastanza rarefatto. Significativa è la presenza di essenze mediterranee quali *Phillyrea angustifolia*, *Rhamnus alaternus*, *Clematis flammula*, *Ruscus aculeatus*,

La naturale evoluzione di questa associazione dovrebbe portare alla formazione dell'habitat 9340: "Foreste di *Quercus ilex* e *Quercus rotundifolia*" ma a causa della mancanza di tale associazione naturale potenziale, gli arbusteti risultano in contatto catenale con le pinete costiere su sabbia dell' Habitat 2270* "Dune con foreste di *Pinus pinea* e/o *Pinus pinaster*")

HABITAT NATURA 2000: 2160: Dune con presenza di *Hippophae rhamnoides*; 2250*: Dune costiere con *Juniperus* spp.

Querceti termofili

QUERCETEA ILICIS Br.-Bl. in Br.-Bl., Roussine & Nègre, 1952

QUERCETALIA ILICIS Br.-Bl. ex Molinier, 1934

Fraxino orni-Quercion ilicis Biondi, Casavecchia & Gigante, 2003

L'evoluzione della serie spaziale dei litorali sabbiosi dovrebbe raggiungere lo stadio di “climax”, situazione di massima complessità e stabilità, sulle dune più antiche e stabili con una vegetazione dominata dalle specie legnose che da arbusteti raggiungono la forma del bosco. In questo stadio la vegetazione risente ancora più fortemente dei fattori climatici locali. Nell'Alto Adriatico la formazione naturale, secondo il Prologo della Vegetazione Italiana, può essere descritta come segue: “Boschi a dominanza di sempreverdi sia termofili sia mesofili con optimum nel macroclima mediterraneo, dal piano termomediterraneo a quello supramediterraneo, su substrati di diversa natura e con un range altitudinale molto ampio, che va dal livello del mare fino a quote montane, condizionato da latitudine e longitudine; se facilitati da fattori morfologici ed edafici e mesoclimatici questi boschi si rinvergono in condizioni extrazonali anche in aree a macroclima temperato, fino al piano mesotemperato, permanendo con carattere relittuale di periodi caldi post-glaciali nell'area insubrica e nell'area prealpina presso Trento. I principali fattori limitanti sono costituiti dalla forte aridità estiva, che favorisce formazioni di macchia e gariga, e dal freddo invernale, che rende più competitive le specie caducifoglie”.

Nella maggior parte del territorio italiano le selve litoranee sono costituite invece da pinete artificiali, impiantate anticamente dall'uomo a protezione dei terreni dell'entroterra e a scopi produttivi. Le specie principali sono *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*. Attualmente le pinete sono gestite e mantenute anche per il valore paesaggistico e ricreativo “ma dal punto di vista ambientale sono piuttosto scadenti” (Pignatti, 2002). La loro posizione troppo avanzata determina il degrado delle piante stesse, bruciate dalla salsedine ed esposte ai freddi venti invernali poiché del tutto prive di una naturale difesa quale il mantello arbustivo. Nelle pinete il suolo è un tappeto unico di aghi di pino che soffoca le piante del sottobosco. La presenza del pino non potrebbe mantenersi a lungo senza una gestione antropica, infatti, la scarsa rinnovazione e lo stato di degrado lo rende meno competitivo di altre specie, che lo sostituiscono velocemente laddove si viene a creare dello spazio.

HABITAT NATURA 2000: 9340 - Foreste di *Quercus ilex* e *Quercus rotundifolia*

Infine, si ritiene opportuno in questo contesto fare un breve accenno ad alcune comunità non ben inquadrate dal punto di vista sintassonomico e quindi definite come *Aggregazioni*. Tale scelta, lungi dall'essere una valutazione di tipo sintassonomico, deriva dalla necessità di inquadrare questi raggruppamenti di specie che pur si manifestano. Le descrizioni delle seguenti comunità seguono Cazzin & Gamper, 2007 e AA.VV., 2013.

AMMOPHILETEA Br.-Bl. & Tüxen Ex Westhoff, Dijk & Passchier 1946

AMMOPHILETALIA AUSTRALIS Br.-Bl. 1933

Aggr. a *Cyperus kalli*

Cyperus kalli (=capitatus) (zigolo delle spiagge), geofita rizomatosa, è una specie tipica delle comunità di dune embrionali e mobili; può formare popolamenti puri e viene ritenuta dinamicamente collegata all'ammofileto. Secondo Cazzin & Gamper, 2007 è una comunità erbacea, perenne, discontinua, che occupa piccole aree in corrispondenza di accumuli di sabbia naturali o artificiali in prossimità del cakileto e dell'agropireto e con quest'ultimo sono molte le specie in comune, oltre a *Cyperus capitatus*, *Xanthium italicum*, *Elytrigia juncea*. Secondo AA.VV., 2013 invece tenderebbe a colonizzare in via preferenziale i settori del primo retroduna.

Comunità erbacee sinantropiche

CAKILETEA MARITIMAE Tüxen et Preising ex Br.-Bl. et Tüxen, 1952

EUPHORBIETALIA PEPLIS Tüxen, 1950

Euphorbion peplis Tüxen, 1950

Xanthio italicici-Cenchretum incerti Biondi, Brugiapaglia, Allegrezza et Ballelli, 1992

Vegetazione nitrofila e ruderale che si sviluppa nel primo settore dunale in condizioni di degrado. In Veneto la comunità sembra essere notevolmente diffusa (*Xanthio italicici-Cenchretum longispini*) a causa dell'attività di livellazione delle dune embrionali che permette la rapida diffusione di *Cenchrus longispinus* che come *Cenchrus incertus* (=spinifex) è una terofita, avventizia, invasiva, originaria dell'America. *Xanthium italicum* evidenzia il carattere nitrofilo dell'associazione.

Aggr. a *Oenothera stueckii*

Oenothera stueckii, specie neofita invasiva, forma popolamenti densi ed estesi, fino ad occupare interi settori dunali spesso a contatto con l'ammofileto e l'immediato retroduna, in situazioni di degrado legate ad impatto antropico (movimento sabbia e calpestio).

Aggr. ad *Ambrosia coronopifolia* (= *psilostachya*)

Ambrosia coronopifolia, geofita rizomatosa di origine Nord-americana, nel periodo tardo estivo ed autunnale tende ad assumere un carattere dominante. Occupa gli stessi spazi del *Sileno-Vulpieto*, con il quale potrebbe rappresentare due stadi temporali della stessa vegetazione.

Comunità arbustive sinantropiche***Boscaglia di *Amorpha fruticosa****

Amorpha fruticosa è una specie Nord-americana che solitamente colonizza i greti fluviali. Nell'ambiente dunale si diffonde sia nel settore iniziale che nel retroduna a formare boscaglie dense ma molto limitate spazialmente.

Filari e boscaglie di *Tamarix gallica*

L'areale della specie si estende lungo le coste dell'Atlantico e del Mediterraneo occidentale, compreso il Sud Italia. Nel Nord Italia è stata introdotta quale specie stabilizzatrice dei versanti dunosi erosi; in Veneto tende a diventare spontanea, spesso in associazione con *Eleagnus angustifolia*.

CAPITOLO 3.

VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DA MAREGGIATA.

3.1 INTRODUZIONE

L'area costiera ravennate è un'area particolarmente vulnerabile ai fenomeni di mareggiata, questo perché, come ampiamente descritto nel capitolo 2, tutto il territorio presenta elevazioni prossime allo zero o inferiori, una condizione aggravata dalla locale subsidenza particolarmente intensa in passato ed ancora in atto. Queste problematiche insistono poi su un territorio che ha conosciuto un'elevata espansione urbana e turistica, quindi oggi si presenta come un'area costiera densamente abitata, soprattutto in estate, con le prime strutture costruite a ridosso dell'arenile.

Queste condizioni determinano un rischio sostanzialmente costante durante l'inverno quando le mareggiate e le acque alte (*storm surge*) s'intensificano.

Il problema della definizione del rischio costiero è stato considerato a livello politico europeo mediante l'emanazione della Direttiva Europea Alluvioni (Direttiva 2007/60/EC), recepita in Italia con il Decreto Legislativo 49/2010. La direttiva impone che gli stati membri si dotino di una cartografia del rischio da alluvione entro il 2015, ma poco o nulla viene indicato su quali debbano essere le azioni da mettere in pratica per affrontare tale rischio, destinato oltretutto ad aumentare in futuro a causa di diversi fattori quali, l'innalzamento del livello medio marino e l'intensificazione dei fenomeni estremi (EEA, 2012), perdita sostanziale di suolo costiero per erosione e subsidenza.

I tre approcci principali per contrastare il pericolo da ingressione marina sono *protezione, adattamento e ritiro* (Klein *et al.*, 2001). Fino ad ora il primo approccio è stato l'unico largamente applicato, mediante l'utilizzo di opere di difesa di tipo *hard* per il contrasto fisico dell'evento, sebbene gli ultimi due siano migliori in un'ottica di preservazione e minimizzazione degli impatti. A tal riguardo, una possibilità d'implementazione di queste strategie può essere la definizione della cosiddetta *set-back line* (Nicholls & Klein, 2003).

Il concetto di *set-back line* o *set-back zone*, il limite verso mare oltre il quale non dovrebbero esserci costruzioni, può essere associato a diversi parametri come la linea d'alta marea, l'ingressione del surge o l'*highest winter waterline* (HWW), il livello raggiunto delle mareggiate più frequenti come indicato dal Protocollo Europeo sulla gestione integrata delle zone costiere nel Mediterraneo del 2009 (EU, 2009) che oltretutto dà una chiara indicazione sull'ampiezza minima della *set-back zone* e cioè non meno di 100 m dalla linea di costa.

In questa parte dello studio l'obiettivo è stato di definire la pericolosità (*Hazard*) determinata da fenomeni di mareggiata e *surge* per la costa ravennate, in termini di sopraelevazione totale della

superficie marina (STM) per diversi tempi di ritorno (Tr), quindi relativamente a scenari probabilistici.

Ben più complessa è l'analisi del rischio che comprende la valutazione delle relazioni tra le componenti marine che determinano appunto la pericolosità (run-up, surge, marea, innalzamento eustatico del livello marino) e quelle del territorio in esame (subsidenza, urbanizzazione, naturalità) che ne definiscono i diversi livelli di vulnerabilità. Questa complessità di scenari possibili possono essere computati e valutati mediante l'applicazione di modelli numerici 2D e 3D, alcuni esempi sono MIKE 21, la metodologia basata sul *Cost-Distance tool* di ArcGis (Perini *et al.*, 2015°), S-BEACH, X-BEACH, ma anche mediante indici di vulnerabilità più semplici come il *Dune Stability Factor* (DSF) (Armaroli *et al.*, 2012).

I livelli di STM calcolati sono applicabili, in un'ottica di modellizzazione dell'ingressione marina, esclusivamente a spiagge naturali o comunque prive di difese, poiché l'analisi non tiene in considerazione l'effetto di attenuazione di queste opere sull'impatto delle onde che ad ogni modo possono dare un senso di falsa sicurezza, come dimostrato in Armaroli *et al.*, 2009 per la costa di Rimini.

Nel calcolo della STM sono stati considerati tre elementi:

- il *wave runup*, definito come la massima quota raggiungibile dall'onda nella fase di risalita sulla spiaggia. L'utilizzo del runup nella definizione della pericolosità è fondamentale al fine di stimare dei livelli realistici (Armaroli *et al.*, 2009).
- il livello idrometrico marino considerato sia nella sua totalità che diviso nelle due componenti, astronomica (marea) e meteorologica (*storm surge*).

3.2 STIMA DEI VALORI ESTREMI - *Extreme value analysis, EVA.*

La Pericolosità - *Hazard* è la probabilità annuale del verificarsi di un evento potenziale dannoso e concettualmente è l'inverso del tempo di ritorno (**Tr**). Lo studio delle serie storiche dei parametri d'interesse quali ad esempio, livello e onde del mare, portate dei fiumi, sismicità, attraverso la branca della statistica degli eventi estremi, Figura 3.1, permette di stimare appunto le probabilità di accadimento di questi fenomeni e quindi di ottenere informazioni utili alla pianificazione del territorio.

Il primo studioso che teorizzò una distribuzione statistica per eventi estremi fu il matematico tedesco E.J. Gumbel nel 1954.

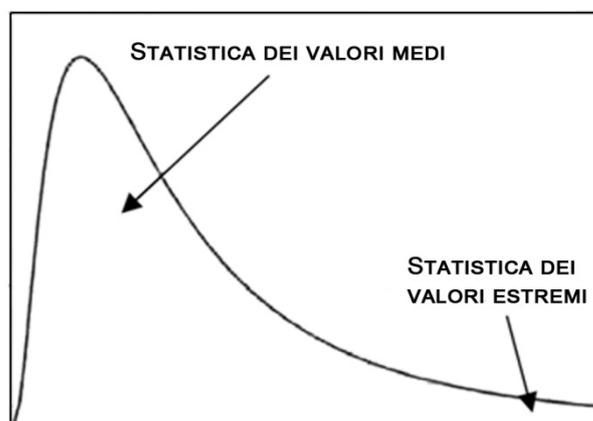


Figura 3. 1 - Rappresentazione della statistica dei valori estremi (modificato da Braga *et al.*, 2013a)

Lo scopo di questo tipo di analisi è quello di stimare il valore che viene superato mediamente una volta ogni T anni, anche con T molto superiore all'intervallo di tempo di osservazione. Come già accennato, P è la probabilità annuale di accadimento o *probabilità di eccedenza* mentre il suo inverso Tr è il Tempo di ritorno secondo le relazione:

$$P = 1/T \quad [9]$$

Ad esempio un evento con Tr =100 anni avrà una probabilità annuale di accadimento dell'1% ($P=1/100=0.01$).

3.2.1 Metodologia

Le elaborazioni statistiche che seguono sono state effettuate seguendo le *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici* (Braga *et al.*, 2013a) ed utilizzando il foglio Excel *Anabasi - ANALisi statistica di BAsse delle Serie storiche di dati Idrologici – versione beta 1.3 (Luglio 2015)* (Braga *et al.*, 2013b), una serie di “macro” implementate nel software MS Excel 2007 mediante il linguaggio *Visual Basic for Application* (VBA) a sostegno dell'utente nell'applicazione delle Linee Guida (Braga *et al.*, 2013a).

La prima operazione da effettuare in questo tipo di analisi è la selezione dei dati a partire dalle serie complete, cioè i valori sui quali verranno effettuate le analisi.

Le metodologie più comuni sono:

- *Block Maximum* (BM), ossia la scelta dei massimi valori del parametro estratti da intervalli regolari o blocchi che generalmente sono anni solari (*Annual Maximum*, AM).
- *Peack Over Treshold* (POT), selezione dei picchi oltre una certa soglia.

La scelta avviene per lo più in base ai dati disponibili, considerando che la modalità AM garantisce l'indipendenza degli eventi (caratteristica indispensabile per la validità delle stime) ma limita il numero di misure utilizzabili (una per anno) rendendo le stime più incerte; mentre con la modalità POT abbiamo la possibilità di selezione molti più dati e quindi effettuare stime più efficienti ma in questo caso il problema è legato proprio alla scelta della soglia che se scelta troppo bassa potrebbe non garantire l'indipendenza degli eventi e quindi la correttezza della stima.

La scelta della modalità di selezione del dato comporta indirettamente anche la scelta della distribuzione statistica che verrà utilizzata.

Le serie AM sono analizzate mediante la distribuzione di probabilità generalizzata del valore estremo (*Generalized Extreme Value distribution*, GEV):

$$F(x) = \exp(-[1+\xi(x-\mu)/\sigma]^{-1/\xi}) \quad [10]$$

in cui σ , μ ed ξ sono rispettivamente i cosiddetti parametri di scala, di posizione e di forma. In particolare il valore assunto dal parametro di forma ξ definisce il comportamento della coda e la famiglia della distribuzione:

$\xi=0$: la distribuzione (di Gumbel o EV1)

$\xi>0$: la distribuzione (di Fréchet o EV2)

$\xi<0$: la distribuzione (di Weibull o EV3)

La stima dei parametri viene effettuata nel foglio Anabasi con i tre metodi classici:

- metodo dei momenti (*Method of Moments*, MoM)
- metodo dei momenti pesati in probabilità o L-momenti (*Probability Weighted Moment*, PWM o L-Moments, LM)
- metodo della massima verosimiglianza (*Maximum Likelihood*, ML)

In generale, come anche riportato nelle “*Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*” (WMO, 2009), il metodo ML è preferibile quando il campione dei valori estremi è sufficientemente numeroso (>500) e quando la serie può presentare una non-stazionarietà; il metodo ML, infatti, può tenere conto della non-stazionarietà. Il metodo degli PWM o L-Moment è invece preferibile quando il campione è limi-

tato (< 500 come accade nella gran parte dei casi). Il più noto metodo MoM invece non è raccomandabile poiché tende sottostimare i valori per elevati periodi di ritorno.

Le serie *POT* sono analizzate mediante la distribuzione di probabilità generalizzata di Pareto (*Generalized Pareto Distribution GPD*):

$$F(x) = 1 - (1 + \xi (x - \mu) / \sigma)^{-1 / \xi} \quad [11]$$

Anche in questo caso, la stima dei parametri può essere effettuata con uno dei tre metodi classici appena descritti :MoM, PWM o LM. In generale, il metodo ML costituisce il metodo migliore (più efficiente non distorto) per un elevato numero di dati mentre per piccoli set di dati ($n < 100$) invece il metodo PWM è più efficiente.

Gli approcci sopraelencati, ai fini dell'applicazione dei teoremi dell'EVA, dovrebbero garantire essenzialmente le seguenti due ipotesi:

- 1) indipendenza statistica del campione di variabili estratte: dei massimi di ciascun blocco o dei picchi soprasoglia
- 2) medesima distribuzione di probabilità per le variabili estratte

Prima di effettuare le analisi dei valori estremi dovrebbero essere valutate una serie di caratteristiche intrinseche al dataset, tutte valutabili mediante apposite funzioni sviluppate nell foglio Anabasi:

- **Autocorrelazione**

L'autocorrelazione definisce il grado di dipendenza lineare tra i dati di una serie. Si esprime attraverso una funzione, detta appunto di autocorrelazione (*ACF – Auto Correlation Function*).

- **Normalità**

Poiché molte delle procedure statistiche sono derivate dall'ipotesi di normalità dei dati è utile verificare se i dati siano effettivamente distribuiti significativamente secondo la legge normale. In realtà, come è noto, i dati idrologici non sono quasi mai distribuiti secondo la legge normale ma anzi presentano caratteristiche come l'asimmetria, talvolta anche molto accentuata, che li allontanano dalla "normalità". Tuttavia, mediante opportune trasformazioni (e.g., Box e Cox, lognormale, quantile normale) possono distribuirsi secondo una normale.

- **Stazionarietà**

Gran parte delle analisi statistiche in ambito idrologico sono basate sull'assunzione della stazionarietà della serie dei dati. Molteplici possono essere le cause di non stazionarietà e le modalità con cui esse si manifestano. Ad esempio, la non stazionarietà può interessare il valor medio e/o la varianza e/o i valori estremi con modalità che possono essere essenzialmente di tipo graduale (*trend*), repentino (*change point*), stagionale (*seasonal*), ciclico non stagionale (*cyclic not seasonal*), combinazione dei precedenti.

Nel primo caso, le cause potrebbero essere legate a fenomeni di cambiamenti climatici o fenomeni evolutivi quali urbanizzazione o deforestazione oppure i trend potrebbero essere determinati da derive dello strumento di misura. Le seconde potrebbero dipendere da interventi antropici di grossa portata ma anche in questo caso possono essere date dalla modifica dello strumento. Quando l'ipotesi di stazionarietà non è verificata sarebbe necessario operare correzioni, talvolta anche molto complesse ma per ora tali funzioni non sono implementate nel foglio Anabasi (Braga et al., 2013a).

Tempi di ritorno d'interesse (Tr)

Sono stati considerati diversi Tr, in particolare Tr_{30} , Tr_{200} e Tr_{500} sono i valori indicati dalla Direttiva Alluvioni. Questi valori indicano rispettivamente probabilità alte, medie e basse di accadimento dell'evento:

- $Tr = 30$ anni $P = 0.033$ evento frequente (3.3% P in un anno)
- $Tr = 200$ anni $P = 0.005$ evento poco frequente (0.5% P in un anno)
- $Tr = 500$ anni $P = 0.002$ evento raro (0.2% P in un anno)

Secondo il EU, 2009 l'*Highest Winter Waterline* (HWW), il più alto livello marino invernale, è un ottimo indicatore per il posizionamento della *Set-back zone* e può essere definito in base alle caratteristiche d'onda delle mareggiata più frequenti, ad esempio quelle con tempo di ritorno di 5 anni (Maremed project, 2013):

- $Tr = 5$ anni $P = 0.2$ evento molto frequente (20% P in un anno).

Infine, fondamentale è il riferimento alla Cartografia della pericolosità da mareggiata della regione Emilia-Romagna, denominata In_Risk⁶, considera i seguenti scenari:

- P3 $Tr = 10$ anni $P = 0.1$ evento frequente (10% P in un anno)
- P2 $Tr = 100$ anni $P = 0.01$ evento poco frequente (1% P in un anno)
- P1 $Tr = >>100$ anni $P = << 0.01$ evento raro (<<1% P in un anno)

⁶ http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/costa/in_risk

3.2.2 Livello idrometrico marino (LIV)

Il livello marino non è affatto un parametro di semplice interpretazione. In un dato momento è determinato da più variabili più o meno indipendenti fra loro: livello marea astronomica, storm surge (impilamento acqua sottocosta da venti di Scirocco + effetto barometrico inverso), sesse. Inoltre al momento della lettura da parte del mareografo si presuppone che lo strumento sia perfettamente livellato con la topografia reale e questo aspetto non sempre è garantito, soprattutto in zone con elevati trend di subsidenza come la costa ravennate.

I dati utilizzati in quest'analisi sono quelli registrati dal mareografo di Porto Corsini Ravenna per il periodo 1986-2015 (aggiornato al 01/03/15).

In questo caso, potendo disporre di 30 anni di dati, per la selezione del dato è stata applicata la modalità *Annual Maximum*. Questa scelta garantisce l'indipendenza dei dati ed il numero di osservazioni è sufficiente a garantire una relativa sicurezza dell'analisi, la stima dei parametri è stata effettuata secondo il metodo ML, *Maximum Likelihood*.

La Tabella 3.1 riporta i dati AM selezionati che sono stati preliminarmente analizzati mostrando che:

- la serie presenta autocorrelazione (ACF) per 2/2 test
- la serie presenta distribuzione normale per 2/2 test
- la serie presenta un *change point* in corrispondenza del 2000 (2/2 test),
- la serie presenta un trend monotono per 3/3 test

Bisogna premettere che a causa del *change point* e del trend lineare riscontrati nei dati la stima potrebbe risentire della NON-Stazionarietà della serie che andrebbe quindi corretta in tal senso (*detrendizzata*) o analizzata tramite metodologie statistiche di altro tipo, nonostante l'assunzione che il metodo ML per il calcolo per i parametri tiene conto della non-stazionarietà dei dati.

Di seguito, in Figura 3.2, i risultati nell'analisi in Anabasi.

Quantili corrispondenti a probabilità e tempi di ritorno notevoli								
P ($X \leq x_T$)	0.900	0.950	0.967	0.980	0.990	0.995	0.997	0.998
Tr (anni)	10	20	30	50	100	200	300	500
x_T	1.08	1.14	1.16	1.19	1.22	1.24	1.26	1.27
(s.e.)	0.085	0.107	0.120	0.135	0.155	0.172	0.182	0.192
Tempo di ritorno e probabilità del valore massimo e del valore medio								
	x_T	Tr (anni)	P($X \leq x$)					
Valore max	1.21	78.0	0.987					
Valore medio	0.86	2.0	0.492					

Figura 3.2 – Risultati dell'EVA sui valori AM di LIV

Secondo queste stime, ad esempio, la violenta mareggiata che si è abbattuta sulla costa ravennate il 05/02/2015 con un livello marino di 1.21 m avrebbe un Tr nell'ordine degli 80 anni.

Tabella 3. 1 - Massimi Anni del livello idrometrico marino

DATA	LIV MAX [m]
03/11/1986 11:00	0.70
24/11/1987 11:00	0.87
30/03/1988 22:00	0.61
04/04/1989 22:00	0.65
14/02/1990 13:00	0.55
19/11/1991 08:00	0.78
04/10/1992 06:00	0.78
21/02/1993 21:00	0.87
12/04/1994 23:00	0.47
01/01/1995 00:00	-
10/12/1996 09:00	0.79
04/01/1997 06:00	0.73
08/10/1998 11:00	0.76
21/11/1999 06:10	0.99
08/05/2000 14:20	0.97
14/11/2001 08:10	0.94
16/11/2002 06:50	0.96
07/01/2003 02:00	0.85
27/12/2004 08:20	0.94
26/01/2005 08:30	0.82
24/10/2006 09:00	0.72
08/12/2007 06:50	0.74
01/12/2008 08:30	0.97
23/12/2009 00:50	1.01
23/12/2010 23:50	1.10
06/11/2011 06:50	0.86
31/10/2012 22:30	1.16
11/02/2013 23:00	1.10
03/12/2014 06:00	0.93
05/02/2015 23:40	1.21

Si è ritenuto opportuno riportare i risultati di studi simili presenti in letteratura per la costa ravennate. Bisogna specificare che ogni lavoro prende in considerazione dati diversi, sia come fonte che come periodi ma anche metodologie sono molto diverse. I dati della Tabella 3.2 devono intendersi come livello idrometrico marino nel suo complesso, senza distinzioni tra componente meteo e mareale.

Tabella 3. 2 - Comparazione dei risultati dell'EVA sul LIV[m] totale (marea e meteo) con altri lavori.

Tr [anni]	LIV_{TOT}	LIV_{TOT} IDROSER, 1996	LIV_{TOT} Archetti, 2014	LIV_{TOT} Masina & Ciavola, 2011
1			0.68	
2	0.86	0.85	0.79	0.85
5	0.99	0.91	0.89	0.97
10	1.08	0.97	0.95	1.05
20	1.14		1.02	1.12
30	1.16		1.05	
50	1.19	1.09	1.10	1.21
100	1.22	1.14	1.16	1.28
200	1.24		1.22	
500	1.27			

Considerando le problematiche emerse nell'analisi dei dati si è valutato di filtrare i dati originali sia dalla componente mareale che dall'errore di subsidenza, ottenendo un dato relativo esclusivamente alla componente meteo e, per quanto possibile, privo di errori.

La componente mareale è stata calcolata con il software *TotalTide*, fornito dall'*United Kingdom Hydrographic Office* (UKHO) insieme alle *Admiralty Tide Tables* (UKHO, 2000). Il software permette il calcolo del livello di marea per un dato sito d'interesse, in automatico oppure inserendo le specifiche costanti armoniche; in questo caso sono state utilizzate le sette costanti indicate in Polli, 1960 (Figura 3.3).

	lat N	long E	ampiezza H / cm							fase g / gradi						
			M ₂	S ₂	N ₂	K ₂	K ₁	O ₁	P ₁	M ₂	S ₂	N ₂	K ₂	K ₁	O ₁	P ₁
Brindisi	40° 39'	17° 18'	8.7	4.8	1.6	1.3	4.7	1.7	1.7	108	116	102	87	73	51	60
Vieste	41° 53'	16° 10'	9.4	6.0	1.6	1.6	5.1	1.6	1.7	105	115	104	115	91	66	91
Ancona	43° 37'	13° 30'	6.6	3.5	1.2	1.0	13.2	4.1	4.4	352	347	326	347	88	74	88
Pesaro	43° 55'	12° 55'	12.8	6.8	3.2	1.8	15.4	4.2	5.1	311	313	279	313	84	56	84
Porto Corsini	44° 30'	12° 17'	15.6	9.2	3.1	2.5	15.9	5.0	5.3	303	310	295	310	81	67	81
Chioggia Diga Sud	45° 14'	12° 19'	23.3	14.1	3.7	3.7	18.2	6.0	6.0	287	295	274	295	74	70	74
Malamocco	45° 20'	12° 21'	23.5	14.0	4.1	4.0	18.3	5.3	5.8	296	305	295	299	82	65	70
Venezia Lido	45° 25'	12° 26'	23.4	13.8	3.8	5.3	16.0	5.2	4.3	288	293	299	281	79	70	56
Porto Piave Vecchia	45° 29'	12° 35'	22.3	13.5	4.1	3.7	20.1	3.3	6.6	286	294	291	294	75	65	75
Falconera	45° 37'	12° 54'	24.0	14.1	4.7	3.8	18.3	5.5	6.1	289	297	287	297	79	72	79
TRIESTE	45° 39'	13° 46'	26.7	15.9	4.5	4.8	18.0	5.3	6.0	277	285	276	280	71	61	67
Rovigno	45° 5'	13° 38'	19.3	11.2	3.5	3.0	16.1	4.9	5.3	27	277	266	277	71	56	71
Pola	44° 52'	13° 51'	15.1	8.7	2.3	2.5	15.5	5.0	4.9	265	273	272	271	69	62	70
Fiume	45° 20'	14° 26'	10.4	5.7	1.9	1.7	14.0	4.0	4.2	249	250	240	243	65	54	64
Zara	44° 8'	15° 12'	6.4	3.4	1.2	1.0	12.7	4.7	4.2	239	236	249	236	65	60	65
Sebenico	43° 44'	15° 52'	6.3	4.4		1.4	9.3	3.0		135	132		127	57	42	
Comissa	43° 3'	16° 5'	7.4	5.2	1.3	1.4	7.8	2.5	2.4	108	119	109	116	57	40	51
S. Andrea	42° 39'	17° 57'	6.8	4.4	0.9	1.2	7.2	2.5	2.3	122	125	61	125	69	50	70
Ragusa	42° 40'	18° 5'	9.3	5.8	1.5	1.7	5.1	2.1	1.7	103	108	90	104	59	44	55
Meglina	42° 27'	18° 34'	9.1	5.9		2.1	5.0	1.8		99	103		107	52	39	
Pelagosa	42° 24'	16° 15'	10.0	5.9	3.0	3.0	6.0	3.0	3.0	103	115	104	103	71	58	48
Antivari	42° 5'	19° 4'	9.2	5.6	1.3	1.7	4.8	1.4	1.9	105	110	114	108	57	33	63
S. Giovanni Medua	41° 49'	19° 35'	9.3	5.1	1.5	1.4	5.3	0.4	1.7	108	106	144	106	42	352	42
Durazzo	41° 19'	19° 27'	9.3	5.5	0.6	1.5	5.0	1.4	1.6	102	104	123	104	27	48	105

Figura 3.3 - Costanti armoniche per il Mar Adriatico (Polli, 1960)

La seconda correzione è quella relativa all'errore del mareografo a causa della subsidenza.

Infatti, come riportato da ISPRA⁷, le misure di livello del mare fornite dalla stazione mareografica di Porto Corsini/Marina di Ravenna fino al 12/09/13 sono riferite al caposaldo IGM 0016#_D01_012#, situato in prossimità della porta di ingresso del Faro di Molo Dalmazia; tale caposaldo è stato quotato per l'ultima volta dall'IGM nel 1990 rispetto al livello medio mare di Genova 1942 (Datum altimetrico nazionale). In occasione del rifacimento della Stazione Mareografica, si è deciso l'aggiornamento della quota di riferimento del caposaldo e da tale nuovo collegamento si è ottenuta la quota aggiornata del caposaldo H CS 000630 = +0.6273 m, di conseguenza la quota attuale risulta più bassa, nel riferimento IGM, di 10.84 cm.

“Da quanto riportato si è evidenziato un "delta" rispetto a quanto dichiarato ufficialmente dall'IGM e si è deciso con l'inizio della nuova serie di dati del 12 settembre 2013 di tarare il sistema di misura di livello secondo i valori ottenuti con la nuova livellazione.”

Il caposaldo si è abbassato di circa 4.5 mm/anno dal 1990 al 2013.

⁷ <http://www.mareografico.it/SPECIAL/RAVENNA2013.pdf>

Si è proceduto quindi alla sottrazione delle due componenti, marea e subsidenza, come indicato nella Tabella 3.3. Sui nuovi dati sono state effettuate le stesse analisi del dataset precedente, mostrano che :

- la serie non presenta Autocorrelazione (ACF) per 2/2 test
- la serie presenta distribuzione normale per 2/2 test
- la serie presenta un *change point* in corrispondenza del 2000 ma solo per 1/2 test
- la serie presenta un trend monotono per 2/3 test

Sul significato del change point e del trend individuati, che rimangono anche dopo le correzioni dei dati, possono essere fatte diverse considerazioni. In particolare, considerando che l'utilizzo di dati orari può condurre per le aree costiere del Nord Adriatico ad una sottostima dell'effettivo valore degli estremi (Tsimplis et al., 2009 in Masina & Ciavola, 2011), è probabile che queste caratteristiche della serie di dati siano da imputare al cambio della frequenza di misurazione da orario a ogni 10', avvenuta nel 1999; oltretutto, sempre fino al 1999 le serie annuali riportano percentuali molto alte di dati mancanti mentre dal 2000 in poi le serie sono molto costanti.

Tabella 3. 3 – Correzioni per il livello marino.

DATA	LIV MAX originale [m]	MAREA teorica (TOTALTIDE) [m]	ERR. Subsidenza [-4.5 mm/anno]	LIV corretto [m]
03/11/1986 11:00	0.70	0.2		0.50
24/11/1987 11:00	0.87	0.2		0.67
30/03/1988 22:00	0.61	0.2		0.41
04/04/1989 22:00	0.65	0.3		0.35
14/02/1990 13:00	0.55	0		0.55
19/11/1991 08:00	0.78	0.3	0.0045	0.48
04/10/1992 06:00	0.78	0.1	0.009	0.67
21/02/1993 21:00	0.87	0.2	0.0135	0.66
12/04/1994 23:00	0.47	0.2	0.018	0.25
01/01/1995 00:00	-	-	0.0225	-
10/12/1996 09:00	0.79	0.3	0.027	0.46
04/01/1997 06:00	0.73	0.2	0.0315	0.50
08/10/1998 11:00	0.76	0.3	0.036	0.42
21/11/1999 06:10	0.99	0.3	0.0405	0.65
08/05/2000 14:20	0.97	0.1	0.045	0.83
14/11/2001 08:10	0.94	0.4	0.0495	0.49
16/11/2002 06:50	0.96	0.3	0.054	0.61
07/01/2003 02:00	0.85	0.2	0.0585	0.59
27/12/2004 08:20	0.94	0.3	0.063	0.58
26/01/2005 08:30	0.82	0.2	0.0675	0.55
24/10/2006 09:00	0.72	0.3	0.072	0.35
08/12/2007 06:50	0.74	0.3	0.0765	0.36
01/12/2008 08:30	0.97	0.2	0.081	0.69
23/12/2009 00:50	1.01	0.2	0.0855	0.72
23/12/2010 23:50	1.10	0.3	0.09	0.71
06/11/2011 06:50	0.86	0.3	0.0945	0.47
31/10/2012 22:30	1.16	0.1	0.099	0.96
11/02/2013 23:00	1.10	0.3	0.1035	0.70
03/12/2014 06:00	0.93	0.3		0.63
05/02/2015 23:40	1.21	0.2		1.01

Di seguito, in Figura 3.4, i risultati delle analisi EVA.

Quantili corrispondenti a probabilità e tempi di ritorno notevoli								
P ($X \leq x_T$)	0.900	0.950	0.967	0.980	0.990	0.995	0.997	0.998
Tr (anni)	10	20	30	50	100	200	300	500
x_T	0.81	0.89	0.93	0.98	1.04	1.09	1.12	1.16
(s.e.)	0.087	0.118	0.137	0.162	0.198	0.235	0.257	0.286
Tempo di ritorno e probabilità del valore massimo e del valore medio								
	x_T	Tr (anni)	P($X \leq x$)					
Valore max	1.01	72.1	0.986					
Valore medio	0.58	2.2	0.536					

Figura 3.4 - Risultati dell'EVA sui valori AM di LIV corretti rispetto a marea e subsidenza.

Anche per questi valori si è ritenuto opportuno fornire alcuni esempi di studi simili, in cui il livello marino è stato analizzato come residuo meteorologico.

Tabella 3.4 - Comparazione

Tr [anni]	LIV _{MET}	LIV _{MET} - YU et al., 1998	LIV _{MET} - Masina & Ciavola, 2011
1		0.85	
2	0.58		0.61
5	0.70		0.72
10	0.81	1.04	0.79
20	0.89		0.86
30	0.93		
50	0.98		0.95
100	1.04	1.28	1.02
200	1.09		
500	1.16		

dei risultati dell'EVA sul LIV [m] come residuo meteo, con altri lavori.

Entrambe le analisi sono significative ed i *Probability Plot*, nelle Figura 3.5 e 3.6 di seguito, mostrano in entrambi i casi un buon fit; di conseguenza poco e nulla si può dire su quale delle due stime sia la più corretta, se non in merito alle migliori caratteristiche, rispetto ai parametri di base, del secondo dataset corretto.

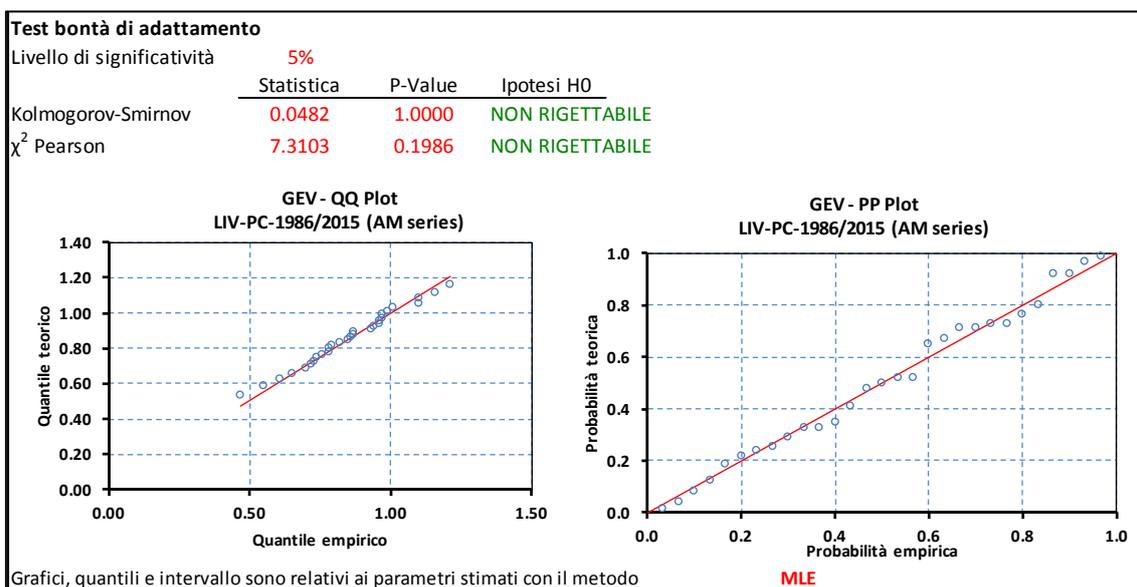


Figura 3.5 - Test di bontà di adattamento e Probability Plot per l'EVA sul LIV totale

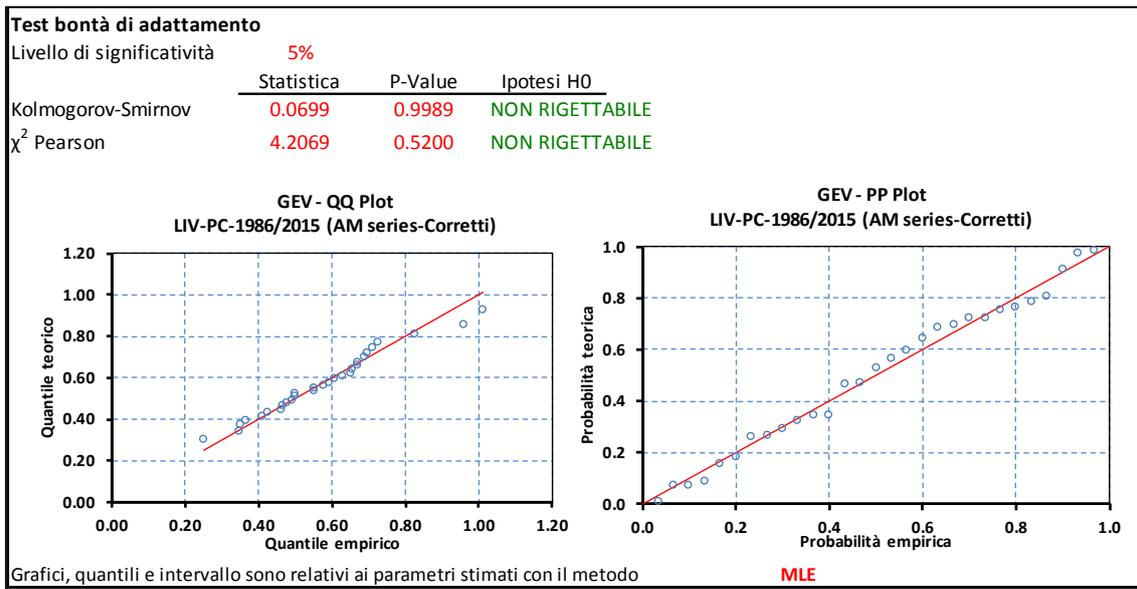


Figura 3. 6 - Test di bontà di adattamento e Probability Plot per l'EVA sul LIV , come residuo meteo

3.2.3. Altezza d'onda significativa (Hs) e periodo di picco (Tp)

In questa seconda analisi sono stati utilizzati i dati della boa ondometrica Nausicaa, situata 8 Km a largo di Cesenatico (fondale 10 m di profondità) per il periodo maggio 2007-2014, mentre per il 2015 (fino al 01/03/2015) sono stati utilizzati i dati registrati sulla piattaforma eni Angelina, posta a 2 Km circa dalla costa di Lido di Dante e su un fondale di circa 10 m di profondità.

La metodologia di selezione adottata è quella dei POT, poiché l'analisi AM sarebbe stata già di per se incerta con solo 9 anni di misure. In particolare, l'analisi è stata svolta considerando le Hs massime di ogni evento di mareggiata, definito come al paragrafo 2.3.5, in modo da garantire l'indipendenza degli eventi. In Tabella 3.5 sono riportati i risultati.

Durante la mareggiata del 05/02/2015 la piattaforma Angelina ha segnato un'Hs massima di 4.85 m che secondo queste stime coincide con un'onda con Tr nell'ordine dei 60 anni, Figura 3.7.

Quantili corrispondenti a probabilità e tempi di ritorno notevoli								
P ($X \leq x_T$)	0.9871	0.9936	0.9957	0.9974	0.9987	0.9994	0.9996	0.9997
Tr (anni)	10	20	30	50	100	200	300	500
x_T	4.33	4.55	4.67	4.81	4.98	5.13	5.20	5.29
(s.e.)	0.27	0.33	0.37	0.43	0.50	0.58	0.63	0.68
Tempo di ritorno e probabilità del valore massimo e del valore medio								
	<u>x_T</u>	<u>Tr (anni)</u>	<u>P ($X \leq x$)</u>					
Valore max	4.85	58.6	0.998					
Valore medio	2.66	0.3	0.602					

Figura 3. 7 - Risultati dell'EVA sui valori POT di Hs.

Di seguito, in Figura 3.8 e Tabella 3.5, i risultati delle stesse analisi effettuate sul periodo di picco (Tp)

Quantili corrispondenti a probabilità e tempi di ritorno notevoli								
P ($X \leq x_T$)	0.9899	0.9949	0.9966	0.9980	0.9990	0.9995	0.9997	0.9998
T (anni)	10	20	30	50	100	200	300	500
x_T	10.61	10.83	10.93	11.04	11.15	11.24	11.28	11.33
(s.e.)	0.23	0.24	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.34
Tempo di ritorno e probabilità del valore massimo e del valore medio								
	<u>x_T</u>	<u>Tr (anni)</u>	<u>P ($X \leq x$)</u>					
Valore max	11.11	76.0	0.999					
Valore medio	7.60	0.2	0.584					

Figura 3. 8 - Risultati dell'EVA sui valori POT di T.

Anche in questo caso vengono riportati i risultati di studi simili presenti in letteratura, per la costa ravennate, che come nel caso precedente prendono in considerazione dati e distribuzioni statistiche diverse.

Tabella 3. 5 - Comparazione dei risultati dell'EVA con altri lavori, a sinistra le altezze d'onda [m] e a destra i periodi [s].

Tr [anni]	Hs	Hs – IDROSER, 1996	Hs - Archetti, 2014	Tr [anni]	T	T - IDROSER, 1996
1		3.3	3.17	1		7.7
2				2		
5	4.08		3.93	5	10.33	
10	4.33	4.7	4.25	10	10.61	8.9
20	4.55			20	10.83	
30	4.67			30	10.93	
50	4.81		5.00	50	11.04	
100	4.98	5.9	5.32	100	11.15	9.9
200	5.13			200	11.24	
500	5.29			500	11.33	

In questo caso l'analisi procede con il calcolo runup che in questo studio è stata effettuata secondo la parametrizzazione empirica di Stockdon *et al.*, 2006. Gli autori propongono due formule per il calcolo del runup estremo (R_2), il valore di runup raggiunto o superato dal 2% dei valori di runup osservati, su spiagge naturali; le due parametrizzazioni sono una generale e l'altra per spiagge di tipo dissipativo (in questo caso la pendenza della spiaggia non viene considerata in quanto troppo bassa per avere influenza sul runup).

Analisi condotte in questo studio (paragrafo 2.4.1) dimostrano come le spiagge in questione, almeno da un punto di vista modale, siano di tipo dissipativo per cui a ragione verrà utilizzata la formula breve:

$$R_2 = 0.043 (H_0 L_0)^{1/2} \quad [11]$$

dove H_0 è l'altezza d'onda a largo per i diversi Tr, come precedentemente calcolato e L_0 è la lunghezza d'onda a largo, calcolata secondo l'equazione [7] paragrafo 2.4.1.

Di seguito i risultati, Tabella 3.6.

Tabella 3. 6 - Calcolo del Runup in base a Hs e T per diversi Tr.

Tr [anni]	Hs [m]	T [s]	L_0 [m]	SET UP [m]	RUN UP [m]
5	4.06	10.20	162.30	0.41	1.10
10	4.31	10.60	175.28	0.44	1.18
20	4.53	10.94	186.71	0.47	1.25
30	4.65	11.11	192.55	0.48	1.29
50	4.79	11.31	199.55	0.49	1.33
100	4.96	11.55	208.11	0.51	1.38
200	5.11	11.75	215.38	0.53	1.43
500	5.28	11.97	223.52	0.55	1.48

3.2.4 Sopraelevazione totale del livello marino (STM)

Dai dati fin qui elaborati si può quindi provare ad ipotizzare scenari di sopraelevazione totale del livello marino (STM), sommando le quote di runup con il livello marino. Per quest'ultimo parametro sono stati considerati entrambi i casi precedentemente esposti, ossia considerato nella sua totalità (marea e surge), LIV_{TOT} , e separatamente LIV_{MET} e LIV_{MAREA} , rispettivamente Tabella 3.7. e 3.8.

È fondamentale premettere che i tre fenomeni sono indipendenti per cui stiamo ipotizzando lo scenario peggiore possibile, cioè il caso in cui si verificano contemporaneamente.

Tabella 3. 7 - Valori di massima sopraelevazione marina (STM) per i diversi Tr; il parametro LIV è considerato nella sua totalità (meteo e marea)

Tr [anni]	Hs [m]	T [s]	RUN UP [m]	LIV_{TOT} [m]	STM [m]
5	4.06	10.20	1.10	1.00	2.10
10	4.31	10.60	1.18	1.08	2.26
20	4.53	10.94	1.25	1.14	2.39
30	4.65	11.11	1.29	1.16	2.45
50	4.79	11.31	1.33	1.19	2.52
100	4.96	11.55	1.38	1.22	2.60
200	5.11	11.75	1.43	1.24	2.67
500	5.28	11.97	1.48	1.28	2.76

Tabella 3. 8 - Valori di sopraelevazione totale per i diversi Tr; il parametro LIV è considerato separatamente nelle due componenti, meteo e marea.

Tr [anni]	Hs [m]	T [s]	RUN UP [m]	LIV_{MET} [m]	LIV_{MAREA} [m]	STM [m]
5	4.06	10.20	1.10	0.69	0.45	2.24
10	4.31	10.60	1.18	0.81	0.45	2.44
20	4.53	10.94	1.25	0.89	0.45	2.59
30	4.65	11.11	1.29	0.93	0.45	2.67
50	4.79	11.31	1.33	0.98	0.45	2.76
100	4.96	11.55	1.38	1.04	0.45	2.87
200	5.11	11.75	1.43	1.09	0.45	2.97
500	5.28	11.97	1.48	1.16	0.45	3.09

Anche in questo caso di è ritenuto interessante riportare i valori calcolati in altri studi per un confronto. L'analisi di IDROSER, 1982 individua in 2.5 m la sopraelevazione totale del livello marino con Tr di 100 anni utilizzando i dati di marea, surge e setup, dei mareografi di Porto Corsini e Rimini e della piattaforma PCB.

Più recente è l'analisi, già citata, effettuata dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (SGSS) per la Regione Emilia-Romagna per la definizione di mappe di pericolosità da mareggiata (Perini *et al.*, 2015b) che considerando, anche in questo caso, livelli di marea , surge e setup trovano i seguenti valori di sopraelevazione totale, Tabella 3.9.

Tabella 3. 9 – Livelli di sopraelevazione totale del livello marino calcolati per le mappe di pericolosità da ingressione marina dalla regione Emilia-Romagna (Perini *et al.*, 2015b).

SCENARIO	TEMPI DI RITORNO	ELEVAZIONE TOTALE MARINA
P3 - FREQUENTE	10	1.49 m
P2 – POCO FREQUENTE	100	1.81 m
P1 - RARO	>100	2.50 m

3.3 CONCLUSIONI

In questa parte dello studio, relativa alle forzanti meteomarine, si è voluto dare un contributo in merito alle stime di sopraelevazione totale del livello marino, determinato da marea, surge e runup. Tale analisi è stata svolta in un'ottica probabilistica volta alla definizione di scenari di pericolosità, in termini di sopraelevazione marina, per diversi tempi di ritorno (Tr).

La metodologia si avvale del fondamentale supporto del software Anabasi v1.3, una macro sviluppata da ISPRA per il supporto nell'analisi delle serie storiche di dati idrologici che, tra le numerose funzioni disponibili, contempla anche l'analisi dei valori estremi (EVA) permettendo oltretutto la scelta tra diverse metodologie (funzioni e parametri) in modo da adattare l'analisi allo specifico dataset.

Sono stati quindi calcolati i valori estremi per i due fenomeni: acque alte e mareggiate.

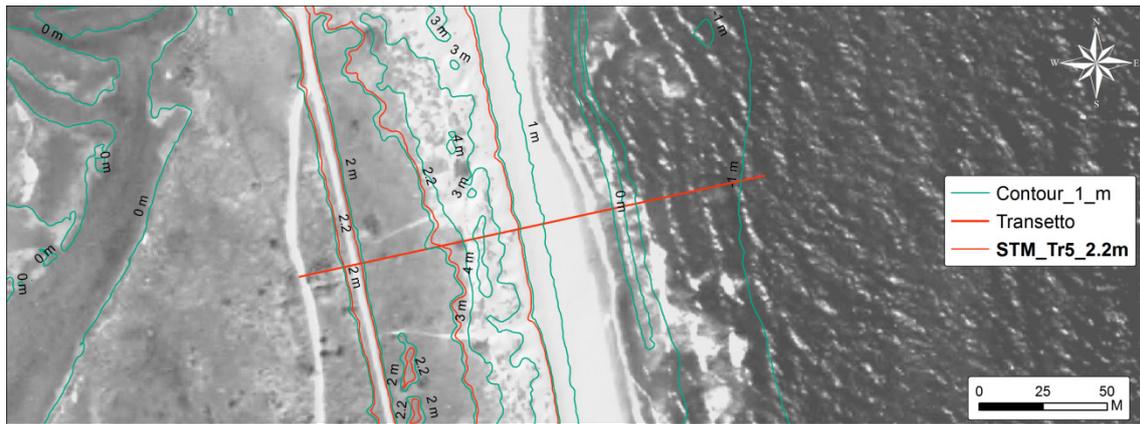
Per il primo parametro, livello idrometrico marino, sono state effettuate due stime. La prima considerando i valori massimi annuali (AM) su un periodo di 30 anni e la seconda considerando gli stessi dati ma corretti sottraendo il valore di marea teorica (*TotalTide* software) ed il valore di errore dello strumento determinato negli anni dalla subsidenza (-4.5 mm/anno), ad ottenere un valore di livello marino inteso come residuo meteorologico. Entrambi i dataset mostrano un trend lineare di aumento della frequenza degli eventi ma a causa di problemi strumentali di varia natura non è possibile definire se una parte di questo trend sia di origine climatica. Allo stesso modo è difficile definire quale delle due serie di valori estremi sia più realistica anche se indubbiamente la seconda serie, quella corretta, si presenta migliore dal punto di vista di alcuni parametri basilari (autocorrelazione, normalità e stazionarietà). Entrambe le serie infine trovano accordo con i valori indicati in altri lavori, in particolare con Masina & Ciavola, 2011 nonostante dataset e metodologie siano diversi. Il discostamento maggiore si ha invece rispetto ai dati di IDROSER, 1996 e Yu *et al.*, 1998 che nonostante una certa datazione vengono ancora comunemente prese a riferimento in ragione della loro validità. In generale l'analisi può ritenersi solida, basandosi su un dataset di 30 anni ma molti dubbi rimangono sulla correttezza dei valori fino al 1998 che riportando numerosi gap di dati mancanti, oltretutto campionati a frequenza oraria cosa che ne determina una consistente sottostima.

La seconda analisi riguarda i parametri d'onda, altezza e periodo. Queste stime partono da un dataset di soli 8 anni cosa che le rende meno solide della precedente, ciò nonostante grazie al metodo POT implementato in Anabasi è possibile effettuare l'analisi su più eventi indipendenti in modo da diminuire l'errore legato alle stime. Anche in questo caso confrontando i dati ottenuti con altri lavori simili, i valori trovano accordo con i lavori più recenti (Archetti, 2014) e si discostano anche notevolmente dai lavori più datati (IDROSER, 1996), nonostante anche qui dati di partenza e metodologie siano diversi.

Infine, dai valori estremi d'altezza e periodo d'onda è stato calcolato il runup che a sua volta è stato sommato con il livello marino, ottenendo ancora una volta due stime della sopraelevazione

totale marina. La prima considera il livello marino come componente unica e la seconda come componenti separate, marea e surge. Su tali stime è più arduo il confronto con altri lavori, in particolare con quello ufficialmente adottato dalla Regione Emilia-Romagna (Perini *et al.*, 2015b) che utilizza per i parametri d'onda il setup (e non il runup) ottenendo di conseguenza valori minori rispetto a quelli calcolati in questo studio. Ad ogni modo l'utilizzo del runup e non del setup è consigliato dagli stessi autori per l'ottenimento di livelli di sopraelevazione marina realistici a parità di altri fattori (Perini *et al.*, 2015a).

Come già delineato, tale studio si è limitato a valutare delle stime di sopraelevazione marina senza spingersi verso una valutazione di vulnerabilità e quindi di rischio. Ad ogni modo già a questo livello d'analisi possono essere fatte alcune interessanti valutazioni in materia di gestione. Infatti, come indicato nel Protocollo sulla GIZC del Mediterraneo del 2009 una strategia di più immediata applicabilità, per affrontare il crescente rischio da mareggiata sul medio e lungo periodo ed in un'ottica globale e non locale, è l'applicazione del concetto di *set-back zone*, una fascia di rispetto della costa a tutela sia dell'ambiente rispetto allo sfruttamento antropico che per la sicurezza degli insediamenti abitati costieri. Un metodo per individuare tale confine è la definizione dell'*highest winter waterline*, considerando ad esempio le mareggiate nell'ordine di 5 anni di Tr e quindi il 20% di possibilità di accadimento in un anno. In questo studio tale valore coincide con un sopraelevazione di 1.1 m per fenomeni di sola ondazione che diventa 2.2 m considerando anche marea e surge. Un tale livello marino, se in una zona naturale con un cordone dunoso ben sviluppato può significare una mareggiata dall'impatto relativamente modesto o comunque non distruttivo, Figura 3.9, in una zona antropizzata invece può andare già a determinare l'allagamento delle strutture, Figura 3.10, soprattutto in zone con un'esigua ampiezza della spiaggia. Diventa quindi fondamentale ripensare la gestione di questa fascia in un'ottica strategica e di lungo periodo e non solo di gestione delle emergenze.



TRANSETTO AREA BEVANO SUD-SPIAGGIA NATURALE

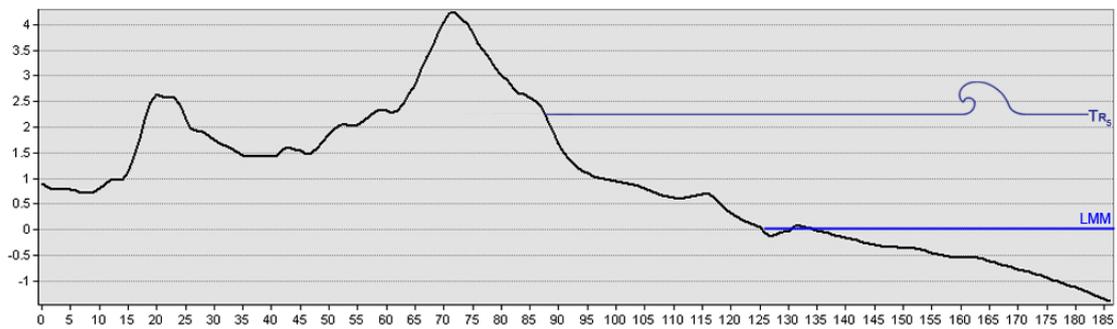
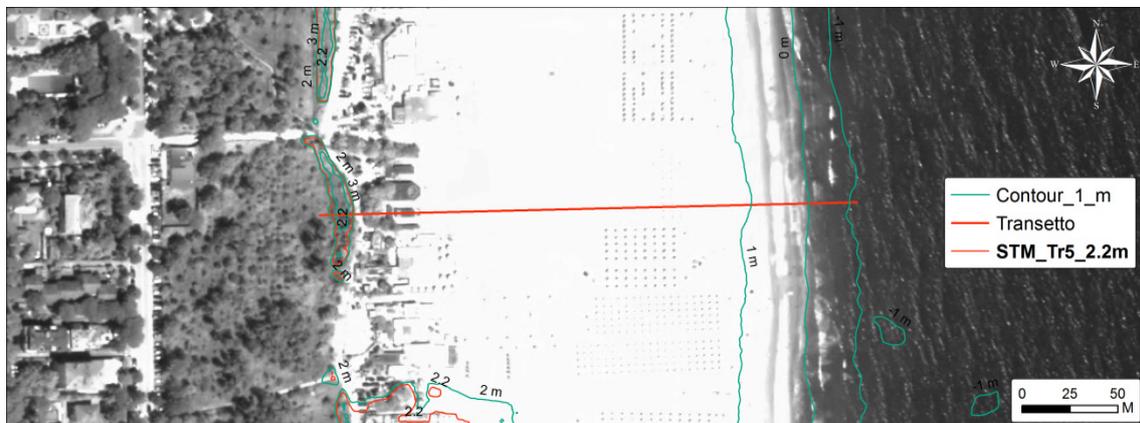


Figura 3. 9 - Mappa e sezione di un transetto di spiaggia naturale. Bevano Sud. Elevazioni da Lidar 2012 (1m x 1m).



TRANSETTO AREA MARINA DI RAVENNA - SPIAGGIA ANTROPIZZATA

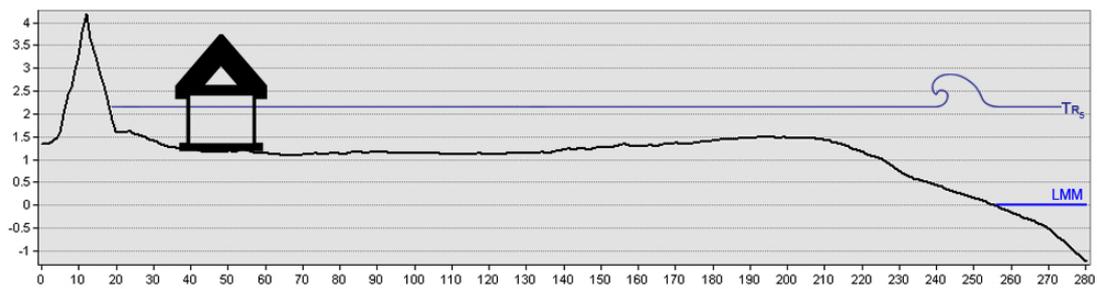


Figura 3. 10 – Mappa e sezione di un transetto di spiaggia antropizzata. Marina di Ravenna. Elevazioni da Lidar 2012 (1m x 1m)

CAPITOLO 4.

CARATTERIZZAZIONE DELLA VEGETAZIONE COSTIERA

4.1 INTRODUZIONE

Quello costiero è un ambiente ristretto a forte selettività, dove le specie sono divenute fortemente specializzate, *psammofilia*, attraverso numerosi adattamenti morfologici, anatomici e fisiologici (Pirone, 2014) tra i quali succulenza, pelosità, sclerofillia, rizomi molto estesi.

Questa elevata specializzazione si manifesta anche, dal punto di vista dell'aggregazione delle specie in comunità, attraverso una marcata *azonalità* molto evidente nelle prime fasce che va poi a diminuire in quelle più interne; qui, i fattori macroclimatici determinano differenze più importanti nella composizione specifica delle comunità sia in senso est-ovest (Adriatico-Tirreno) che in senso nord-sud (Nord-Sud Italia).

I fattori di stress in ambiente costiero sono diversi e tutti legati in qualche modo al vento come forzante primaria che agisce su di un substrato: seppellimento da parte della sabbia, aerosol salino, irradiazione solare e disseccamento, scarso apporto di nutrienti.

Secondo Maun 2004, 2009 lo stress più importante è determinato dal seppellimento da parte della sabbia che può agire in due modi, a seconda del raggiungimento o meno della soglia di tollerabilità specifica per ogni pianta; nel primo caso sarà un fattore di selezione sulla comunità eliminando le specie che non sono in grado di contrastarlo, nel secondo sarà uno stimolo per la crescita determinando una maggiore disponibilità di suolo e nutrienti, una maggiore attività delle micorrize e stimolando la pianta alla mobilità delle sue risorse ("*multifactor hypothesis*").

A seconda di tale capacità, ma non solo, le piante si aggregano in comunità contigue che si susseguono dalla spiaggia al retroduna a formare una precisa successione spaziale (modello sincronico) dove ogni comunità è uno stadio di una serie dinamica progressiva che va dal cakileto (stadio iniziale) al bosco termofilo (climax o stadio finale).

Tale serie oggi giorno si realizza di rado a causa dei diversi impatti antropici, più o meno diretti, che hanno portato a compressione, mixing, perdita d'identità e scomparsa di alcune comunità (Pirone, 2014).

Per queste ragioni la valutazione dell'integrità delle comunità e l'analisi dei pattern spaziali con cui queste si dispongono sul territorio costiero possono essere impiegati quali indici di qualità e conservazione (Acosta *et al.*, 2000; Carboni *et al.*, 2009; Garcia-mora *et al.*, 2000) e non solo; Ciccarelli *et al.* 2012 trovano in Toscana una chiara connessione tra la composizione specifica e la dinamica costiera in atto; Fenu *et al.*, 2012 trovano in Sardegna che le principali variabili abiotiche (morfologiche, sedimentologiche e geo- pedologiche) determinano una variabilità micro-topografica che influenza la presenza di vari microhabitat.

L'ambiente dunale è un ecosistema fortemente selettivo caratterizzato dalla stretta interazione tra fattori biotici e abiotici, una miriade di relazioni, sia dinamiche che di contatto, sintetizzate nel concetto proprio dell'ecologia del paesaggio di *Geosygetum* o Geoserie della vegetazione, più serie che si sviluppano in contatto tra loro in funzione del variare di un gradiente ecologico (umidità, salinità, topografia, etc.); nel caso in questione geosigmeto psammofilo (Blasi, 2010⁸) Questa parte dello studio esamina la vegetazione costiera ravennate a partire da una caratterizzazione generale delle specie rinvenute e poi valutando, da un punto di vista qualitativo, lo sviluppo spaziale delle diverse comunità psammofile intese appunto come serie. A tal fine si è proceduto all'individuazione di transetti perpendicolari a costa considerando la caratteristica configurazione del paesaggio costiero dove, in assenza di disturbo antropico, le comunità si sviluppano in fasce parallele alla costa dalla spiaggia alla pineta, con rapporti dinamici e spaziali (Bufa *et al.*, 2007). Gli stessi transetti sono stati tracciati mediante DGPS-RTK ad ottenere dei profili topografici di precisione. Dai tali profili sono state quindi estrapolate quattro variabili morfo-topografiche (altezza l.m.m.; pendenza media; distanza da riva; dinamica evolutiva geomorfologica recente) i cui valori sono stati comparati con la presenza delle specie.

4.2 AREA DI STUDIO

Per questa parte dello studio sono stati scelti sei siti costieri, all'interno dell'area ampia di riferimento, dove vi fossero dei residui dunosi. Partendo da nord: Casal Borsetti, Porto Corsini, Marina di Ravenna, Bevano Nord, Bevano Sud e Milano Marittima.

Casal Borsetti è la località più a nord, in generale il sistema costiero si presenta altamente artificializzato con presenza di opere di difesa trasversali e longitudinali che mantengono la spiaggia stabile. Due residui dunosi rimangono a nord e a sud dell'abitato ed in quest'ultimo sono stati impostati i transetti, Figura 4.1.

La duna di Porto Corsini si estende per circa 400 metri su un tratto di spiaggia in forte avanzamento grazie alla presenza del molo del porto che intercetta il sedimento proveniente da nord. L'avanzamento della spiaggia si ripercuote positivamente sulla duna che di pari passo amplia la propria superficie ma allo stesso tempo non mostra un particolare sviluppo in elevazione, probabilmente a causa della scarsa presenza di *Ammofila arenaria*; viene a formarsi quindi un'ampia zona tabulare di dune embrionali. A tal riguardo, in questa zona i rilievi sono stati eseguiti solo attraverso la duna embrionale e la prima duna semi-stabile, Figura 4.1.

Anche Marina di Ravenna è una zona in cui la spiaggia è stabile o avanza debolmente grazie all'intercettazione del *drift* litoraneo da parte del molo sud del porto. L'area dunosa, identificata come Duna Giacobazzi, si presenta divisa in due porzioni separate da un ampio accesso alla

⁸da <http://www.prodromo-vegetazione-italia.org/>

spiaggia, Figura 4.1. I transetti sono stati impostati su ognuna delle due parti. Qui le maggiori pressioni sono legate alla presenza antropica: spiaggia libera ad elevata frequentazione e presenza di capanni privati nel retroduna, entrambe cause della formazione di numerosi sentieri all'interno del corpo dunoso e di blowouts. Degno di nota è che nel 2015 l'area è stata dotata di una rete di percorsi di passerelle sopraelevate che dovrebbero quantomeno evitarne un ulteriore deterioramento.

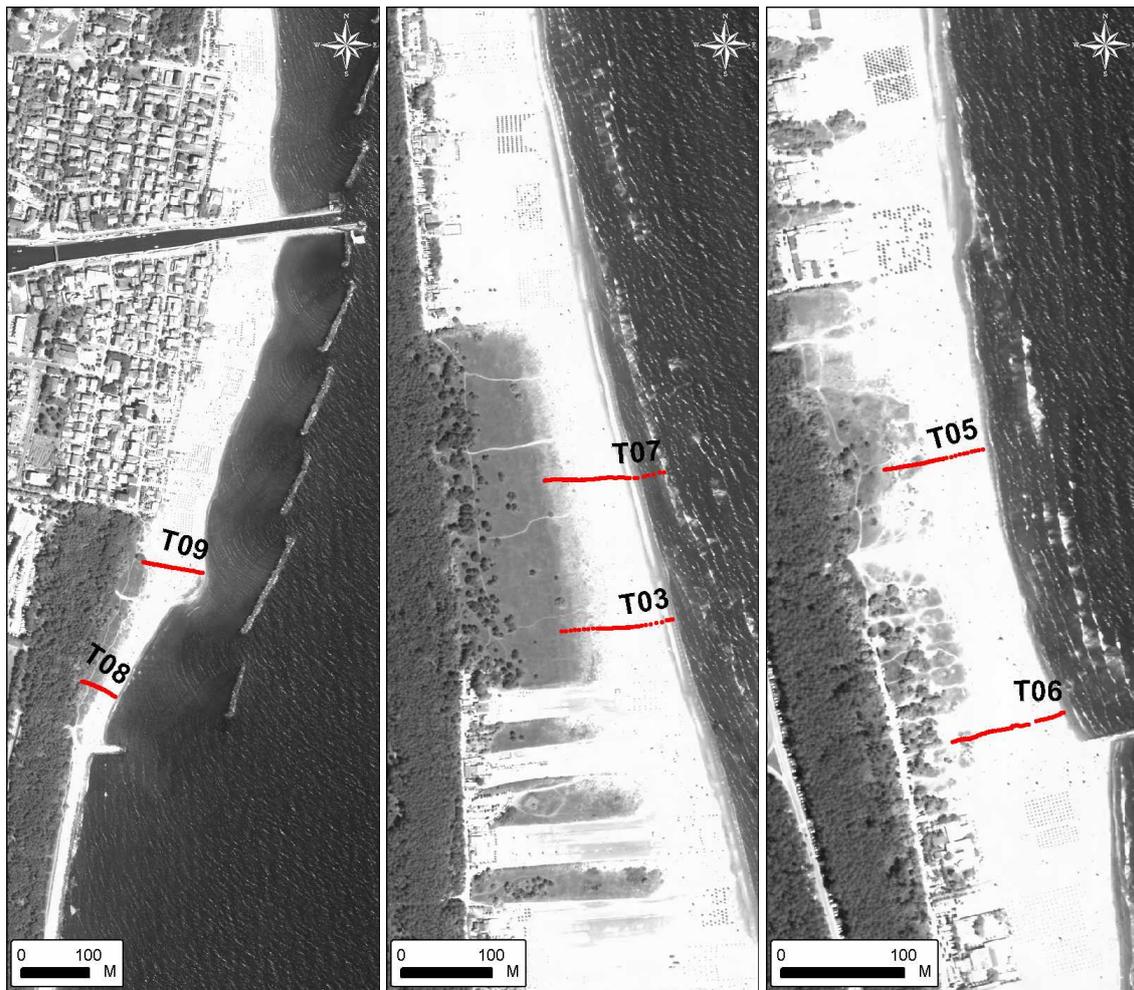


Figura 4. 1 – Posizione dei transetti in località, da sinistra a destra, Casal Borsetti, Porto Corsini e Marina di Ravenna.

L'area del Bevano è un'area di notevole pregio naturalistico dove rimane, seppur con ampi tratti di criticità, un cordone dunoso di circa 6 km interrotto solo dalla foce del torrente Bevano, Figura 4.2. La porzione di cordone settentrionale, dalla foce all'abitato di Lido di Dante, è quella più critica a causa dell'erosione che insite sulla spiaggia e rende più vulnerabili le dune alle mareggiate. I transetti sono stati effettuati in corrispondenza del tratto centrale dell'area dalla morfologia tipica di avanduna che qui si presenta con un fronte eroso a falesia verticale ed in corrispondenza della duna ricostruita artificialmente, nell'ambito di un lavoro di ricollocazione della foce per problemi idraulici nel 2006.

La parte meridionale del cordone dunoso è la zona a più elevata naturalità. Subito a sud della foce vi è la presenza di uno spit litoraneo, Figura 4.2, in continua evoluzione sotto l'azione del fiume e del mare; qui è stato impostato il primo transetto per l'area, la spiaggia è ampia ma la duna non raggiunge particolari elevazioni e gradualmente sfuma in una prateria con specie vegetali dai tratti più alofili. Il secondo ed il terzo transetto sono in corrispondenza del vero e proprio cordone dunoso. In questo sito sono stati effettuati tre transetti data l'elevata naturalità e la diversità delle morfologie.

La duna di Milano marittima, il sito più a sud, è collocata su una spiaggia a forte presenza antropica ed in stato di erosione; il tratto è protetto dalla presenza di una barriera sommersa in sacchi di sabbia e soggetto a ripascimento negli anni precedenti. Il residuo dunoso è una porzione di circa 200 metri di estensione, sofferente per l'elevata frequentazione della spiaggia dove sono ubicati capanni privati e rimesse di attrezzatura sportiva al limite del piede dunale che oltretutto all'inizio di ogni stagione estiva viene riprofilato con mezzi meccanici; una situazione completamente bloccata dal punto di vista dell'evoluzione naturale, Figura 4.2.

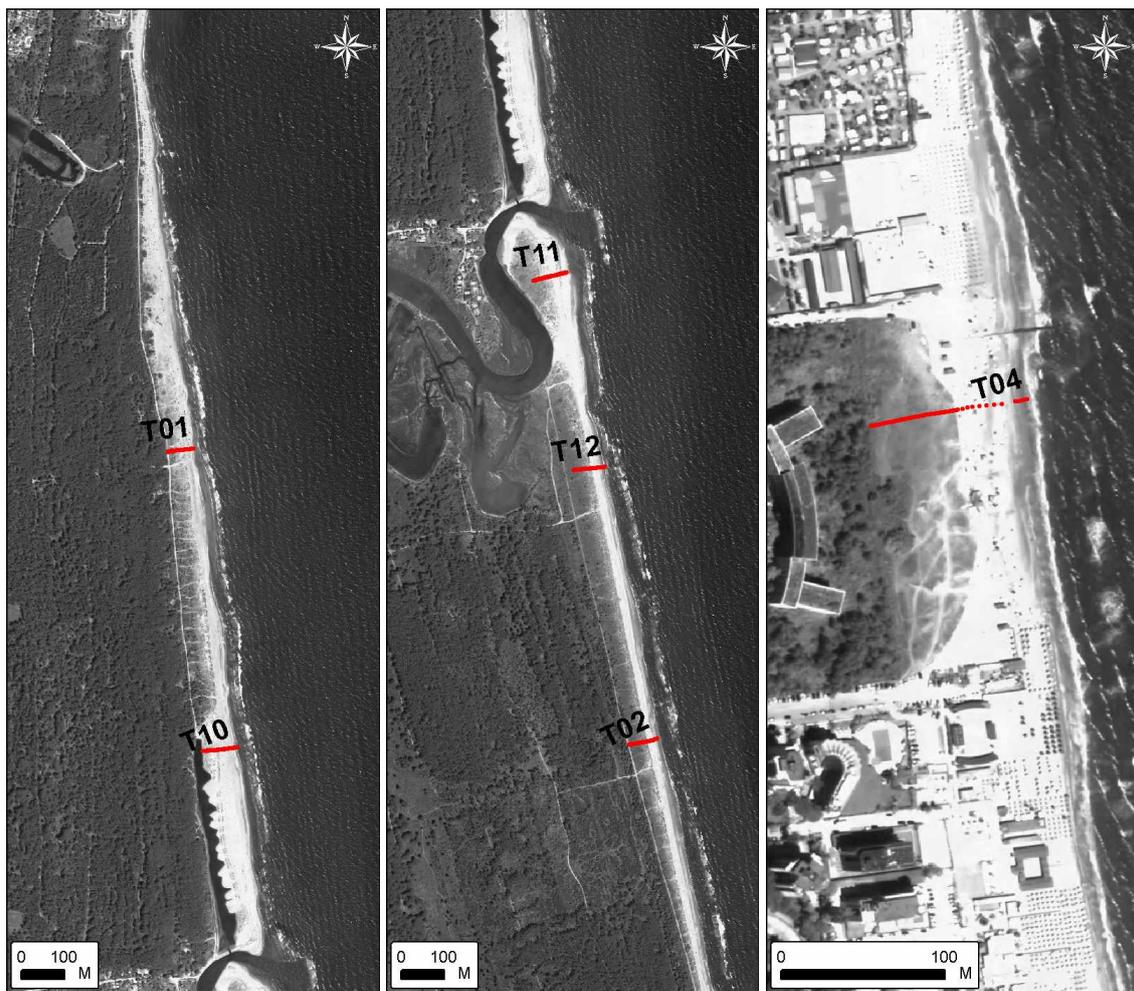


Figura 4. 2 - Posizione dei transetti in località, da sinistra a destra, Bevano Nord, Bevano Sud e Milano marittima.

4.3 METODOLOGIE

Rilievo

Sono stati effettuati in tutto 12 transetti a partire dalla riva fino al retroduna, al limite con il sentiero o la pineta; ogni transetto è stato rilevato un'unica volta, tra maggio e settembre 2013.

Il rilievo è stato eseguito secondo la metodologia del *belt transect*, così come rappresentato nello schema in Figura 4.3 e nelle foto in Figura 4.4, che prevede l'impostazione di un transetto e lo svolgimento di più rilievi della vegetazione all'interno di aree quadrate (*plots*). Solitamente i plots sono posti ad una certa distanza tra loro ma in questo caso si è deciso di tenerli contigui, considerando i repentini mutamenti delle morfologie e delle comunità vegetali tipici dell'ambiente dunoso e a maggior ragione sulle coste ravennati dove l'erosione e la precarietà dei sistemi rendono la naturale successione vegetazionale sempre più compressa spazialmente, con una notevole sovrapposizione in particolare delle prime comunità.

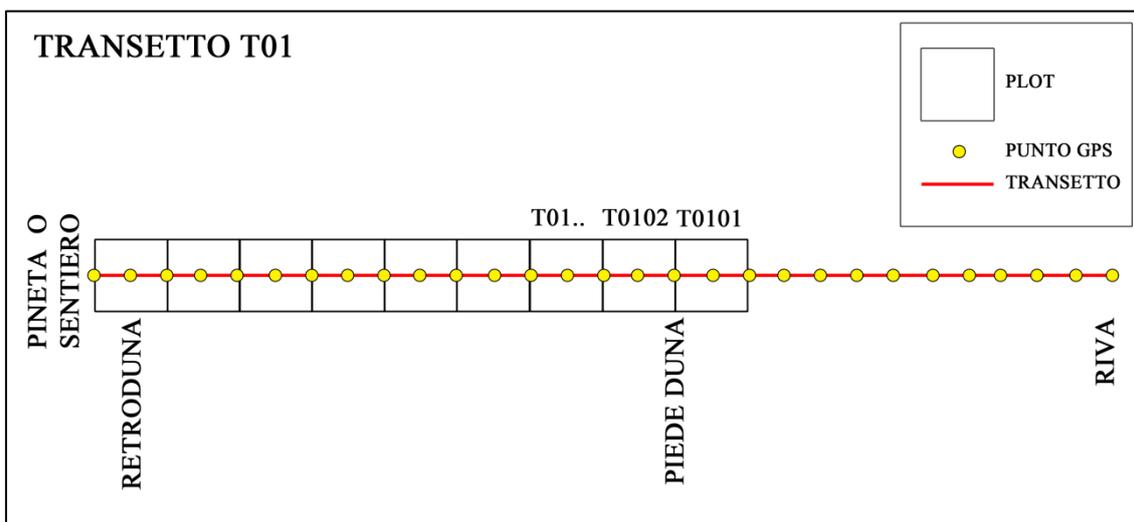


Figura 4.3 – Schema *belt transect*

Le specie rinvenute sono state identificate secondo la nomenclatura di Conti *et al.*, 2005 così come riportato nell'IPFI⁹ (*Index Plantarum Florae Italicae*) mentre la copertura di ogni specie è stata stimata utilizzando la scala degli Indici di abbondanza/dominanza di Braun-Blanquet, 1932 modificata da Pignatti, 1952. In totale, sono stati condotti 259 rilievi distribuiti su 12 transetti, individuando un totale di 59 specie.

Contestualmente al rilievo della vegetazione è stato eseguito anche il rilievo della topografia, mediante DGPS- RTK, partendo dalla linea di riva e registrando un punto ogni metro, Figura 4.3.

⁹ <http://www.actaplantarum.org/flora/flora.php>



Figura 4. 4 – Transetto a Casal Borsetti (a sinistra) e Bevano Sud (a destra)

Da questi dati topografici è stato possibile caratterizzare genericamente i transetti, Tabella 4.1, e calcolare le variabili morfo-topografiche d'interesse:

- distanza da riva (DIS), calcolata tra il punto centrale di ogni plot consecutivo e lo zero topografico (interpolato linearmente quando non intercettato fisicamente nel rilievo topografico)
- altezza l.m.m (ALT), riferita al punto centrale del plot
- pendenza (PEN), tra gli estremi del plot
- evoluzione geomorfologica recente (TEN), ossia la differenza di quota al centro del plot calcolata tra il rilievo topografico effettuato in questo studio (2013) ed il rilievo Lidar 2005; una misura negativa indica erosione, una misura compresa tra ± 10 cm indica stabilità, una misura positiva indica deposizione.

Tabella 4. 1 – Caratteristiche principali dei transetti

TRANSETTO	SITO	LUNHEZZA TOT [m]	LUNGHEZZA SPIAGGIA [m]	RANGE Z [m]	N° PLOT	N° SPECIE
T01	BN	62	25	0.2 - 3.4	20	21
T02	BS	70	20	0.2 - 3.5	25	33
T03	PC	125	44	0.3 - 2.9	19	10
T04	MM	98	46	-0.4 - 3.5	25	21
T05	MR	83	33	0.4 - 5.4	23	11
T06	MR	96	59	0.3 - 5.7	16	14
T07	PC	135	69	-0.2 - 3.3	23	18
T08	CB	55	20	0.4 - 4.1	14	23
T09	CB	91	55	0.3 - 5.3	16	16
T10	BN	85	30	0.0 - 2.3	27	21
T11	BS	82	32	0.5 - 2.6	25	18
T12	BS	75	25	0.4 - 4.0	25	36

Analisi Statistiche: Cluster Analysis, PCA, RDA

Prima di procedere con le opportune analisi statistiche, i dati sono stati filtrati eliminando i plots e le specie considerati *outliers* per i seguenti motivi:

- otto plot con copertura nulla, 0%: T0101-T0401-T0501-T0701-T0801-T0901-T1001-T1101
- un plot T0118 con piantumazione di tamerice
- un plot T0814 costituito per metà della superficie da sentiero
- un plot T0211 costituito al 100% da un cespuglio dell'alloctona *Amorpha fruticosa*
- otto specie comparse solo una volta nel totale di tutti i rilievi: *Atriplex prostrata*, *Echium vulgare*, *Eleagnus angustifolia*, *Glaucium flavum*, *Plantago coronopus*, *Salicornia patula*, *Stachys maritima*, *Tamari sp.*

Dopo queste operazioni, la matrice finale dei dati è risultata di “248 siti x 51 specie”.

Le analisi di tipo statistico sono state svolte attraverso l'utilizzo del software *open source* R 3.1.1 - *vegan package* (Oksanen *et al.*, 2013, Oksanen, 2013) e seguendo le metodologie indicate in Bocard *et al.*, 2011.

La *cluster analysis* è un metodo analitico, largamente utilizzato in ecologia, per l'individuazione di subsets discontinui in un ambiente talvolta discreto ma più spesso percepito come continuo (Bocard *et al.* 2011). Le metodologie di *clustering* sono numerose ed in questo studio ne è stata adottata una di tipo *hierarchical*, basata sulla dissimilarità media tra gli oggetti (*average agglomerative*); tale scelta è avvenuta sulla base della *Cophenetic Correlation*, associata ai risultati di alcune prove preliminari, che è risultata sempre maggiore per questo metodo di analisi rispetto agli altri, designandolo come migliore in questo caso.

La matrice dei dati originali è stata trasformata in una matrice di dissimilarità, utilizzando la distanza euclidea quale indice di dissimilarità sui valori standardizzati (trasformazione della corda). Quindi, la matrice di dissimilarità è stata sottoposta ad analisi cluster il cui output, in forma di dendrogramma, ha reso possibile l'identificazione dei principali tipi di vegetazione.

Il secondo tipo di analisi utilizzato è la *Principal component analysis* (PCA), una tecnica di ordinamento anche questa ampiamente utilizzata in statistica multivariata. In generale le tecniche di ordinamento permettono di rappresentare la grande variabilità multi-dimensionale dell'ambiente (dove ogni variabile è una dimensione) in uno spazio ridotto, solitamente a due dimensioni, di più facile e immediata interpretazione ad evidenziare eventuali relazioni. In particolare, la PCA fonde le variabili tra loro correlate in *componenti* non correlate, supponendo che un insieme più piccolo di variabili derivate possa mantenere costante la maggior parte dell'informazione (Montanari, 2012). Ogni componente ha una certa importanza, cioè contribuisce con un certo grado alla correlazione tra variabili, espressa tramite gli *Eigenvalue* che a loro volta possono essere espressi come *Proportion explained*, ossia la proporzione di variabilità

spiegata da quella componente rispetto alla totale. La variabilità totale o *Inertia* è la somma delle varianze delle variabili o delle correlazioni delle variabili con se stesse, a seconda dei casi.

PC1 e PC2 sono le componenti con *eigenvalue* maggiori, quindi spiegano la maggior proporzione di variabilità sul totale, e di conseguenza sono le due componenti che vengono scelte per la rappresentazione grafica (biplot) e per l'interpretazione delle relazioni (componenti principali)..

Nel biplot gli *oggetti* (specie, rilievi, etc..) sono rappresentati da punti e le *variabili* da vettori.

Ad ogni modo va considerato che la PCA è una tecnica *unconstrained*, cioè è una tecnica di tipo esclusivamente descrittivo/esplorativo poiché non vi è associato un test statistico che vagli la significatività della struttura identificata (Bocard *et al.*, 2011).

Al contrario della precedente la *Redundancy Analysis* (RDA), combinazione di regressione multipla e PCA, è una tecnica di ordinamento canonico (*constrained*), che si realizza quando l'ordinamento dei dati è eseguito su due o più datasets interdipendenti. L'RDA è inoltre una tecnica asimmetrica poiché le matrici di dati non sono indifferenti ma orientate in un sistema di causa-effetto; avremo quindi una matrice di variabili dipendenti (matrice-effetto, Y) ed una o più matrici di variabili indipendenti o esplicative (matrice-causa, X). La variabilità evidenziata dal modello può essere stimata mediante il coefficiente di determinazione R^2 che quantifica la percentuale della variabilità di Y dovuta alle variabili esplicative X; la stima della bontà del modello è indicata dal valore di R^2 , variabile tra 0 e 1, rispettivamente 0% e 100% di variabilità spiegata. Per avere una stima corretta è importante utilizzare l' $R^2_{adjusted}$ che tiene conto del numero di variabili.

Infine, è possibile sottoporre il modello ad un vero e proprio test statistico. Nel maggior numero di casi i dati di tipo ecologico non seguono distribuzioni normali per cui non è possibile utilizzare test parametrici. Un'alternativa, secondo Bocard *et al.*, 2001 è il Test delle Permutazioni, che si basa sul principio della ripetizione di un determinato test statico un numero molto elevato di volte su campioni del dataset originario scelti casualmente; l'ipotesi nulla (non esiste alcuna relazione) viene scartata se *p-value* è uguale o minore del predefinito livello di significatività α (0.05). Il test statistico vero e proprio si basa sul confronto delle varianze ed è chiamato *pseudo-F*, inoltre con questo test possono essere testati sia il modello generale che i singoli assi e le singole variabili.

4.4 RISULTATI

4.4.1 Caratterizzazione generale della vegetazione psammofila ravennate

In totale sono state rinvenute 59 specie vegetali, di cui 58 specie di piante vascolari ed una briofita.

Dal punto di vista tassonomico, le 58 specie sono risultate appartenenti a 25 famiglie diverse di cui la più rappresentata è quella della *Poaceae* (11), comuni sono anche le *Asteraceae* (7).

Per quanto riguarda gli adattamenti alle condizioni ambientali le specie rinvenute sono state classificate secondo forma biologica (Raunkiaer, 1934), corotipo (IPFI¹⁰), indici ecologici di Ellenberg (Ellenberg *et al.*, 1991) modificati da Pignatti (Pignatti, 1996) ed autoctonia/esoticità (IPFI¹¹).

La forma biologica, secondo Raunkiaer, 1934, si riferisce alla modalità di superamento della stagione avversa con particolare riferimento alla protezione delle gemme; a seconda di tale caratteristica si distinguono diverse forme biologiche che considerate come percentuale relativa alla flora totale definiscono il cosiddetto *Spettro biologico* della flora del territorio considerato.

In questo studio è stata evidenziata la presenza di cinque diverse forme biologiche, di cui la predominante è quella delle Terofite (45%), piante annuali che superano la stagione fredda sotto forma di seme, Figura 4.5. La prevalenza delle terofite, come evidenziato da Lazzari *et al.*, 2012, indica condizioni termofile caratteristiche del clima mediterraneo o submediterraneo a mancata aridità estiva; inoltre, le terofite indicano condizioni di disturbo perlopiù legato ad attività antropiche o condizioni di stress naturale ed in questo caso entrambe le condizioni sono presenti.

Altro aspetto molto importante per la caratterizzazione della vegetazione è la corologia, ossia la classificazione delle specie in base al loro areale naturale di distribuzione.

Le specie rinvenute in questo studio si suddividono in sette corotipi, di cui il più rappresentato (47%) è l'Euri-mediterraneo, specie con areale centrato sulle coste mediterranee ma prolungantesi verso nord e verso est (area della Vite), Figura 4.6.

Sono stati considerati gli Indici ecologici di Ellenberg-Pignatti (Pignatti, 1996) caratteristici di tutte le specie, la media di tali indici costituisce l'Ecogramma, in Figura 4.7, e relative descrizioni in Tabella 4.2.

¹⁰ <http://www.actaplantarum.org/flora/flora.php>

¹¹ <http://www.actaplantarum.org/flora/flora.php>

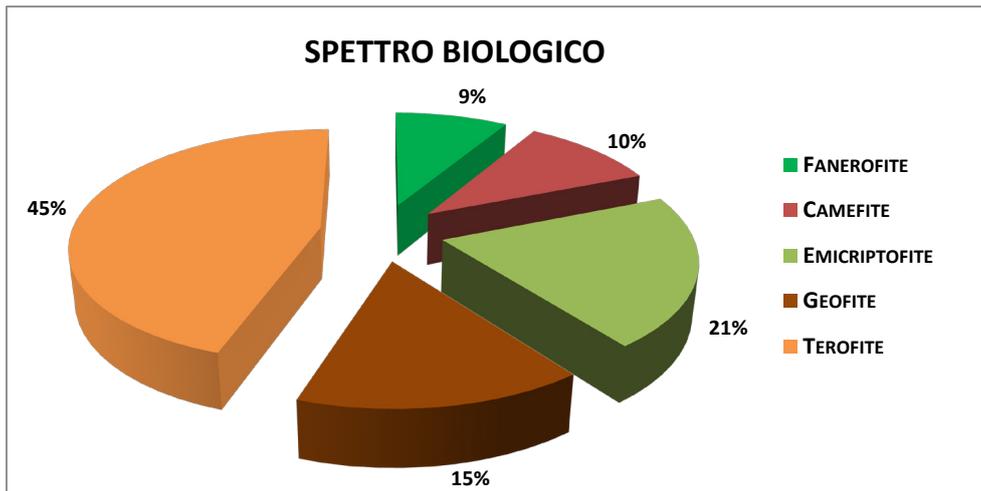


Figura 4. 5 - Spettro biologico delle specie rinvenute

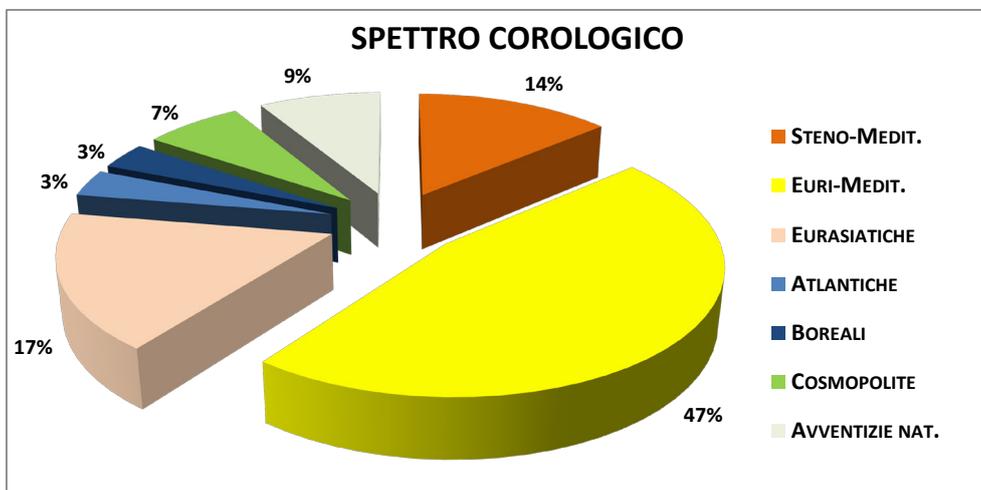


Figura 4. 6 – Spettro corologico delle specie rinvenute

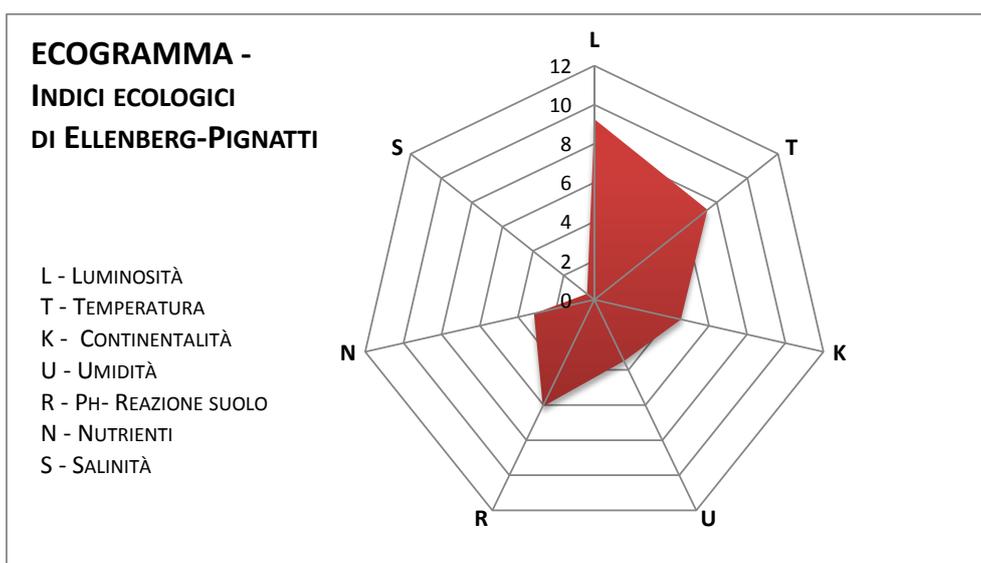


Figura 4. 7 - Ecogramma delle specie

Tabella 4. 2 – Indici ecologici di Ellenberg-Pignatti per la vegetazione dunale, valore medio e descrizione.

INDICE	RANGE	VAL. MEDIO	DESCRIZIONE
L	1-12	9	Esposizione al pieno sole in clima temperato con nebulosità frequente
T	1-12	7	Nella Pianura Padana oppure ambienti mediterraneo - montani aridi: Euri-mediterranee
K	1-9	5	Condizioni medie della flora di clima temperato
U	1-12	3	Indicatori di aridità, più frequenti nei luoghi secchi che in quelli con falda superficiale; assenti da suoli umidi
R	1-9	6	Condizioni intermedie tra specie mesofile o di ambienti blandamente basici o neutro-basofili
N	1-9	3	Specie di suoli poveri di nutrienti
S	1-3	1	Tollerano una bassa concentrazione di sali, ma crescono meglio in ambiente che ne è privo

Infine, un ultimo aspetto molto importante è l'individuazione delle specie aliene, anche dette esotiche o alloctone, cioè specie che si trovano al di fuori del proprio areale di diffusione per cause antropiche. Le modalità di tale diffusione possono essere molto diverse ed infatti le specie alloctone possono essere distinte in Archeofite e Neofite, a seconda che l'introduzione si avvenuta prima o dopo il 1500; le cause possono essere individuate principalmente nel rilascio volontario in natura, diffusione da giardini, trasporto involontario, formazione di corridoi (e.g. Canale di Suez) e diffusione spontanea; infine, in relazione alla capacità di colonizzare le nuove aree possono essere distinte in casuali, naturalizzate, invasive e localmente invasive.

In questo studio, sono state individuate 7 specie neofite, quindi di recente introduzione, di cui una sola specie neofita casuale e sei neofite invasive, le prime non si riproducono autonomamente ma hanno bisogno dell'apporto di nuovi propaguli dalle aree di origine mentre le seconde sono specie naturalizzate che formano popolamenti stabili ed in grado si diffondersi molto velocemente: *Elaeagnus angustifolia*, *Amorpha fruticosa*, *Ambrosia psilostachya* (= *Ambrosia coronopifolia*), *Cenchrus spinifex*, *Erigeron canadensis*, *Oenothera stucchii*, *Xanthium orientale* subsp. *italicum*.

Cluster Analysis e patterns spaziali

Il dendrogramma in Figura 4.8, risultato della cluster analysis sulla matrice delle coperture vegetali “248 siti x 51 specie”, ha permesso l’identificazione di sette gruppi; di questi, sei sono riferibili a comunità vegetali ben definite ed elencate in Tabella 4.3 (e descritte al paragrafo 2.5) mentre il settimo gruppo, denominato “Disturbo”, è un gruppo artefatto poiché comprende sottogruppi a dominanza di specie alloctone quali *Oenothera stucchii*, *Ambrosia psilostachya*, *Amorpha fruticosa*, per i quali è stato impossibile definire un’appartenenza appropriata dal punto di vista sintassonomico.

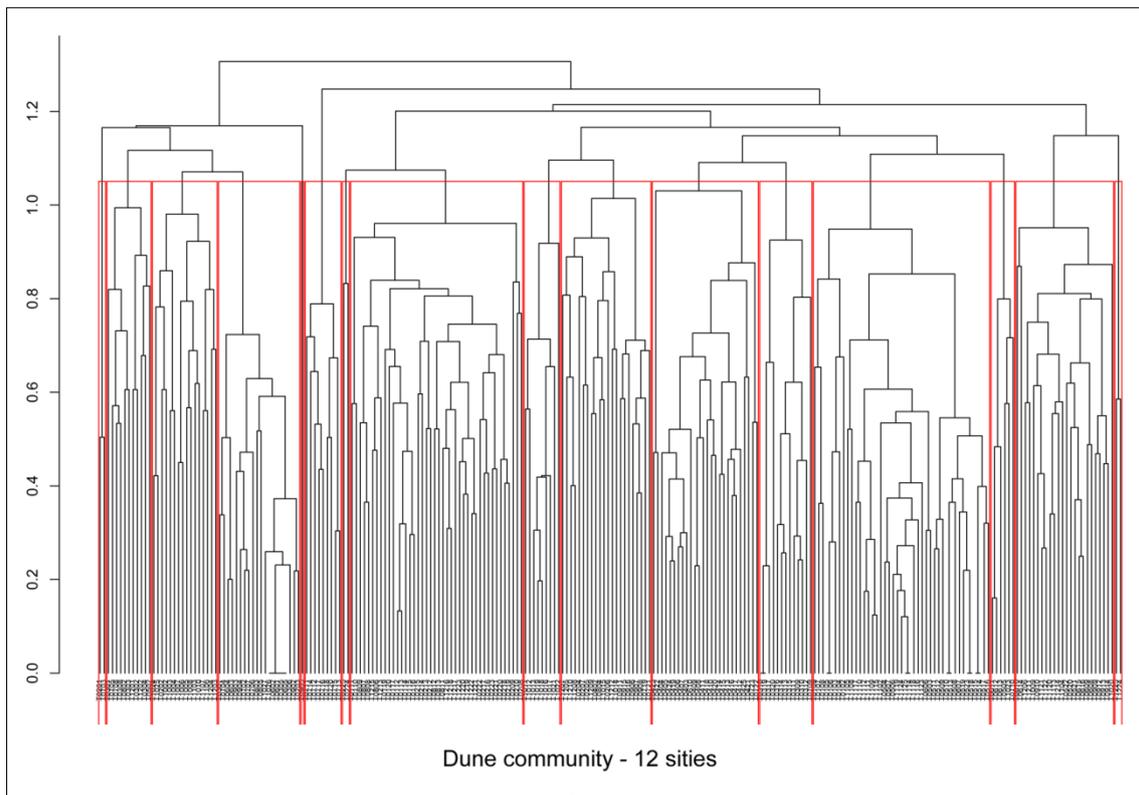


Figura 4. 8 - Dendrogramma dei rilievi effettuati lungo i 12 transetti.

Tabella 4. 3 - Associazioni per la classificazione dei rilievi della vegetazione.

COMUNITÀ	COD. HABITAT RETE NATURA 2000
<i>Salsolo kali -Cakiletum maritimae</i>	1210 - Vegetazione annua delle linee di deposito marine
<i>Echinophoro spinasae-Elymetum farcti</i>	2110 - Dune embrionali mobili
<i>Echinophoro spinasae-Ammophiletum arenariae</i>	2120 - Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i>
<i>Aggr. a Cyperus kalli</i>	2120 - Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i>
<i>Sileno coloratae-Vulpietum membranaceae</i>	2230 - Dune con prati dei <i>Malcolmietalia</i>
<i>Tortulo- Scabiosetum</i>	2130* - Dune costiere fisse a vegetazione erbacea

L’identificazione delle associazioni e la relativa mappatura in ambiente GIS ha permesso di evidenziare i patterns spaziali di sviluppo della vegetazione psammofila in questi siti.

A tal riguardo bisogna specificare che in ambiente GIS sono state mappate le seguenti categorie: CAKILETO, AGROPIRETO, AMMOFILETO, CIPERETO, SILENO-VULPIETO, TORTULETO, DISTURBO, TAMARIX, di cui le prime sei sono le stesse di Tabella 4.3, “Disturbo” è riferita alla dominanza di specie alloctone, “Tamarix” è riferita alla piantumazione di tamerice. Di seguito la mappatura dei singoli transetti e relativo profilo topografico, raggruppati per sito e ordinati da nord a sud.

Casal Borsetti

In questo sito sono stati eseguiti i transetti T09 e T08, Figura 4.9 e 4.10.

T09, il più a nord, è impostato su una duna dall'elevazione notevole con un fronte a pendenza elevata ma naturale che si raccorda alla spiaggia antistante, molto ampia e sede di uno stabilimento balneare/spiaggia per cani. In generale, il transetto si caratterizza per una condizione di generale disturbo; i plots iniziali presentando una buona copertura di *Elytrigia juncea* con *Cenchrus spinifex* (specie alloctona invasiva) costante e a tratti molto abbondante. Tale disturbo diventa via via più evidente nei plots più interni dove si alternano zone con presenza anche abbondante di *Ammophila arenaria* a zone ricoperte di *Ambrosia psilostachya* con poche altre piante. Probabilmente la così elevata diffusione delle specie alloctone è da mettere in relazione alle condizioni di elevata nitrofilia provocata dall'abbandono di feci canine in zona.

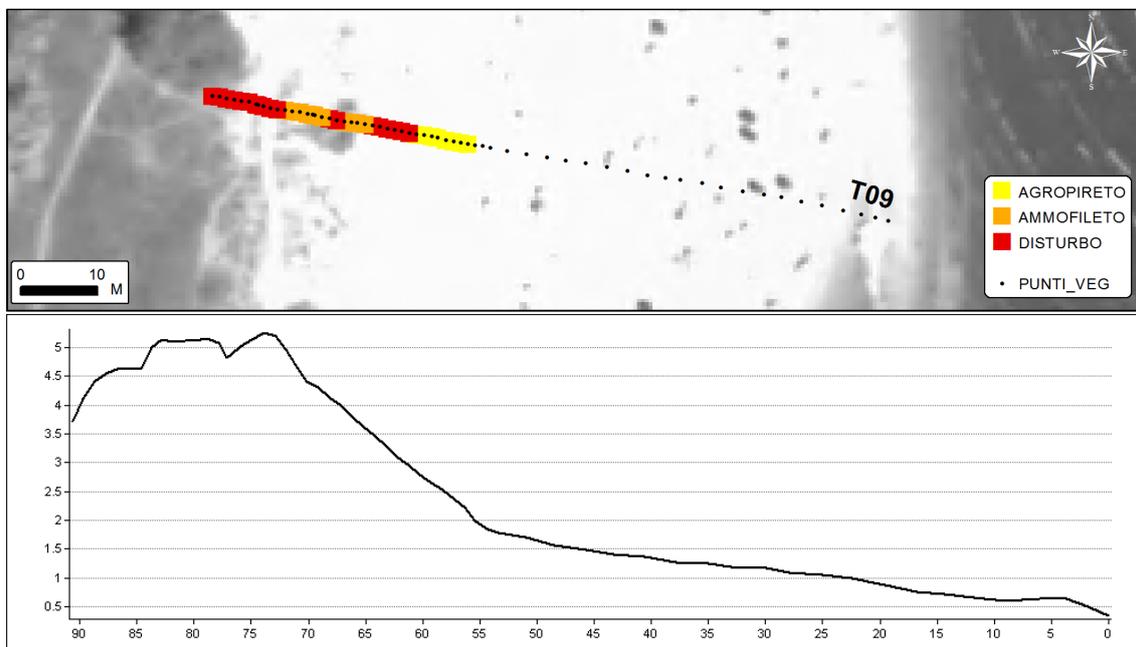


Figura 4. 9 - Casal Borsetti - T09. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

T08 presenta una situazione completamente diversa, con un corpo dunoso prevalentemente tabulare perlopiù ricoperto da vegetazione del tortuleto. I plots iniziali in corrispondenza di una

piccola scarpata denotano una condizione di mix tra cakileto, agropireto e cipereto, anche qui con costante presenza di *Ambrosia psilostachya* che però non è dominante sulle altre specie.

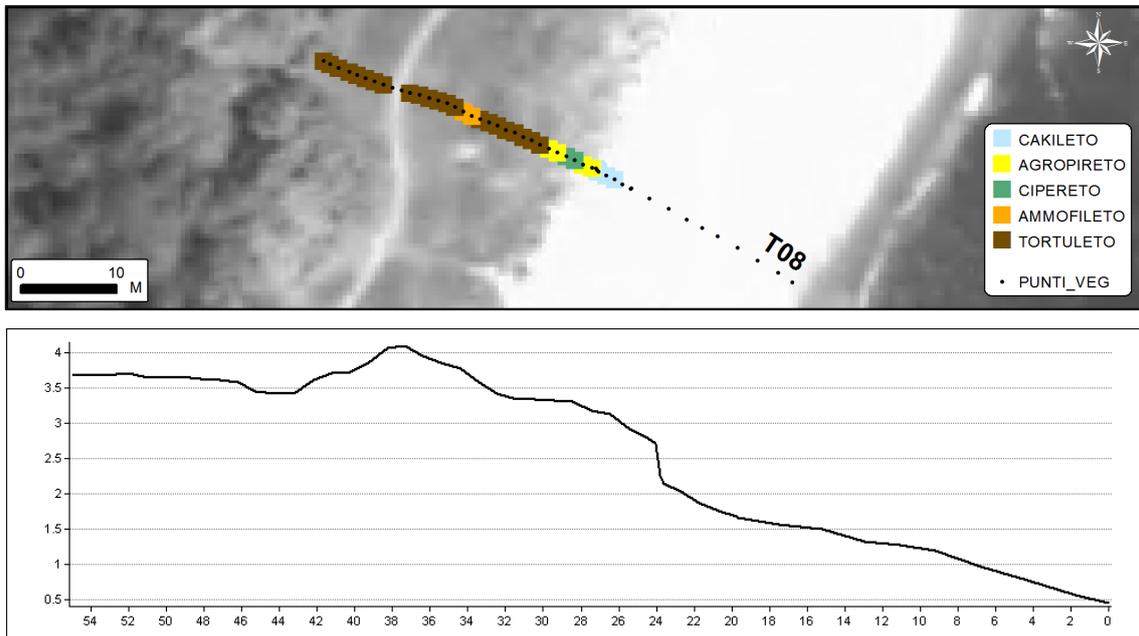


Figura 4. 10 - Casal Borsetti – T08. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

Il grafico di Figura 4.11 mostra il N° di specie per ogni plot consecutivo accompagnato dal coefficiente di determinazione (R^2) della retta di regressione lineare specifica per ogni transetto. In questo caso viene evidenziata una buona correlazione positiva in T08 mentre in T09 la stessa relazione risulta più lieve e in generale T09 mostra una ricchezza specifica molto minore rispetto a T08, rispettivamente 16 e 23 specie.

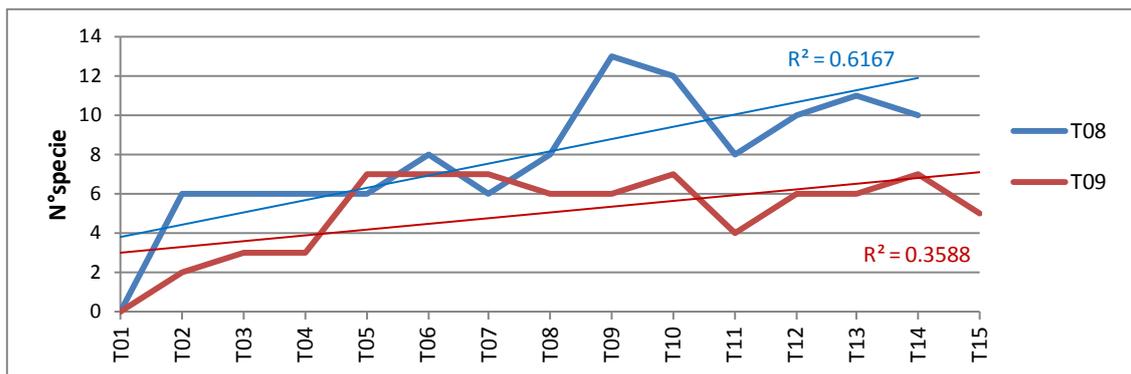


Figura 4. 11 - Relazione N°specie/plot per i transetti T09 e T08, sito Casal Borsetti.

Porto Corsini

In questo caso i transetti, T07 e T03, sono stati limitati alla copertura della duna embrionale e della prima duna semi-stabile, data la notevole estensione trasversale del corpo dunoso dove sono riconoscibili più morfologie di cresta ormai stabilizzate.

T07, Figura 4.12, presenta nei plots iniziali una composizione floristica riconducibile sostanzialmente all'agropireto anche se non mancano le specie della cakileto; più all'interno, a parte la sporadica apparizione di specie dell'ammofileto come *Echinophora spinosa*, la vegetazione muta verso una condizione di disturbo per la completa dominanza di *Oenothera stucchii*, alloctona invasiva (Figura 4.15). Dopo questa fascia, peraltro molto ampia, segue una vegetazione caratterizzata dalle terofite *Vulpia fasciculata*. e *Phleum arenarium* con basse coperture di *Tortula ruraliformis* nei plots finali.

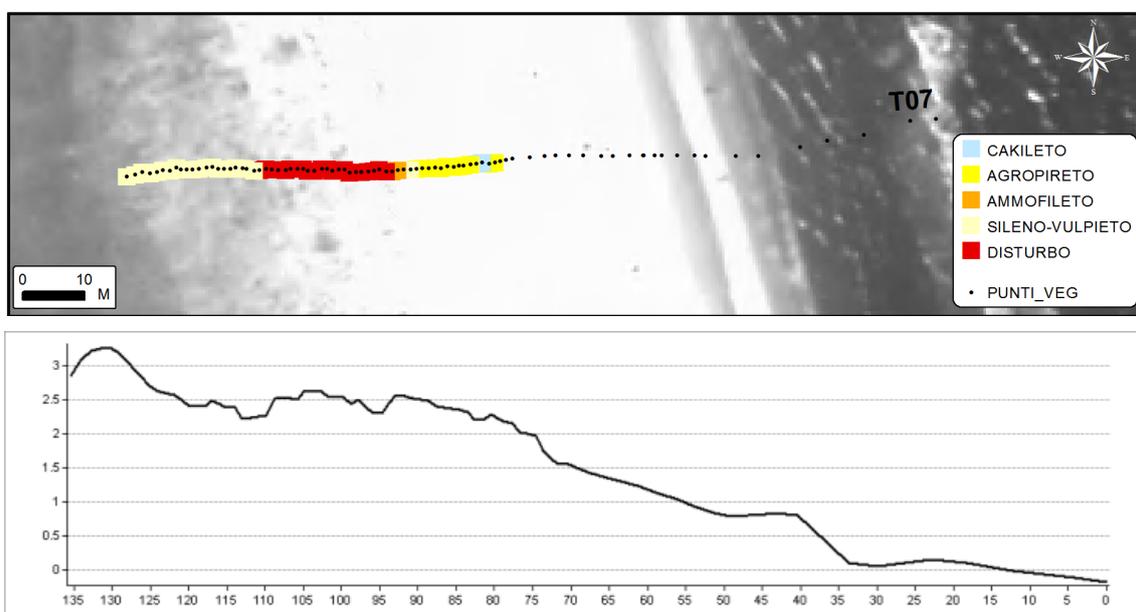


Figura 4. 12 - P. Corsini - T07. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

T03 Figura 4.13, presenta una morfologia molto simile a T07 ma con l'area di duna embrionale molto più ampia, caratterizzata da una vegetazione che gradualmente passa dal cakileto all'agropireto ma mantenendo sempre una composizione floristica a cavallo tra le due associazioni. Nei plots più interni la comunità vegetazionale è quella dei pratelli terofitici del sileno-vulpieto, dove però non mancano locali presenze di *Elytrigia juncea* e di *Oenothera stucchii* che però non è dominante sulle altre specie.

In generale entrambi i transetti mostrano una bassa ricchezza specifica, sia in totale (10 e 18 specie) che in media (4 specie/plot), ma ciò è da mettere in relazione anche alla limitata estensione dei transetti relativamente all'estensione totale della duna che quindi non arrivano ad intercettare le porzioni più interne e più ricche floristicamente; la relazione specie/plot è positiva in entrambi i casi.

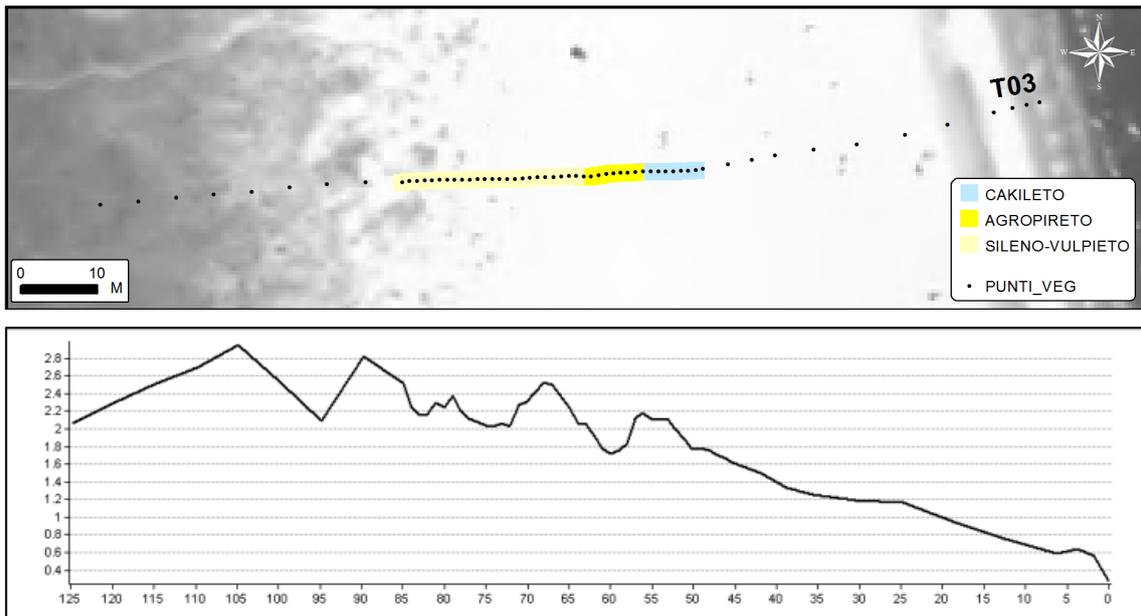


Figura 4. 13 – P. Corsini - T03 . Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

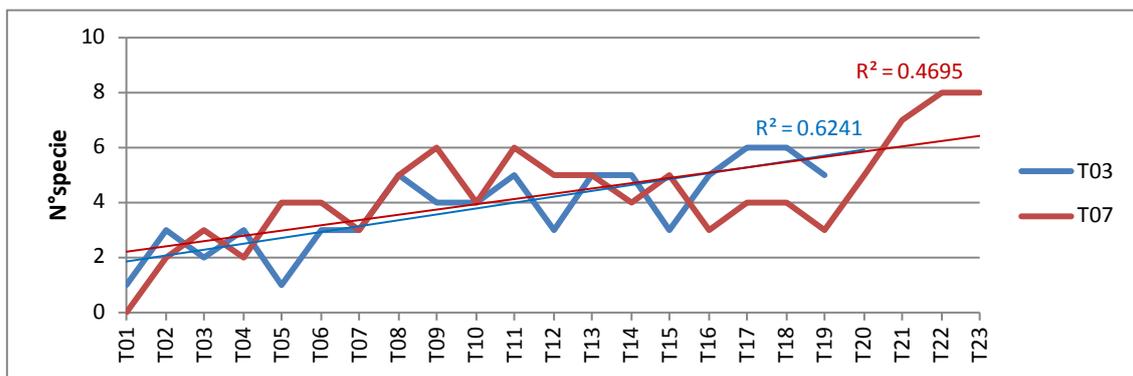


Figura 4. 14 - Relazione N°specie/plot per i transetti T07 e T03, sito Porto Corsini.



Figura 4. 15 – Fascia a dominanza di *Oenothera stuechi* a Porto Corsini, T07.

Marina di Ravenna

La duna Giacobazzi si presenta come un residuo dunoso dalle elevazioni significative, il fronte duna presenta soprattutto nel lobo a nord numerose morfologie erosive dovute al calpestio e nel retroduna dovute alla presenza di capanni, la cui frequentazione determina la scomparsa locale della vegetazione, Figura 4.16. Anche in questo caso, i transetti intercettano solo la porzione di avanduna e s'interrompono per la presenza di ampie superfici d'erosione prive di vegetazione.



Figura 4. 16 – Blowouts della duna Giacobazzi.

T05 si caratterizza per la presenza indubbiamente dominante del *Cyperus capitatus* per tutta la lunghezza del transetto. Nella parte iniziale un accumulo sabbioso, residuo di un argine artificiale invernale, simula il comportamento di una duna embrionale ma probabilmente la copertura continua del *Cyperus capitatus* non permette una maggiore diffusione dell'*Elytrigia j.* che appare sporadicamente insieme a poche plantule del cakileto. Nei plot intermedi il *Cyperus capitatus*

è accompagnato dalla terofite del sileno-vulpieto e solo nelle porzioni più elevate s'impone *Ammophila arenaria*, Figura 4.17.

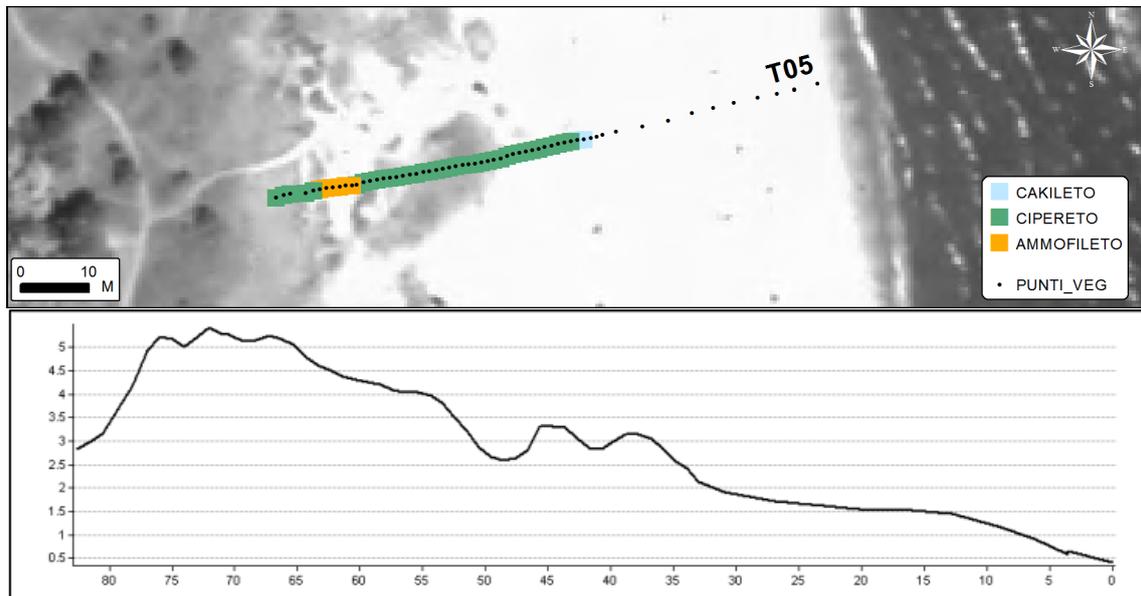


Figura 4. 17 – Ma. di Ravenna - T05. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

T06, Figura 4.18, nel lobo sud della duna, presenta una vegetazione leggermente più variegata e la serie dinamica assume una conformazione più simile alla naturale. Al piede dunale, con la formazione attiva di una piccola duna embrionale, predomina l'*Elytrigia juncea* e anche qui nelle porzioni più elevate avviene il passaggio all'ammofileto con presenza consistente di *Ammophila arenaria* e *Echinophora spinosa*.

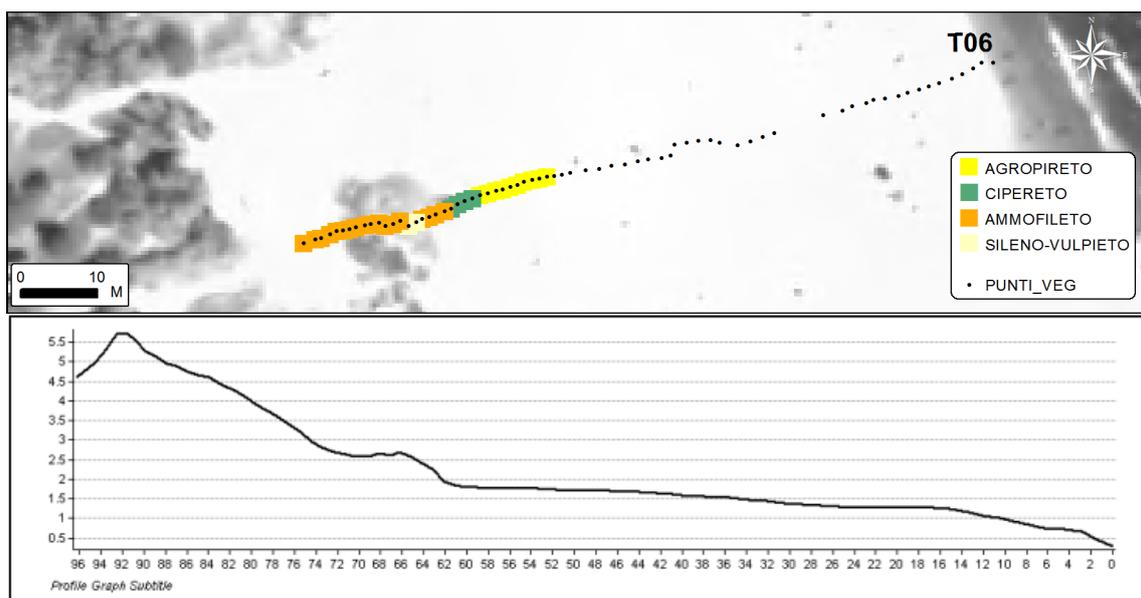


Figura 4. 18 – Ma. di Ravenna - T06. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

Anche questi due transetti, come per Porto Corsini, presentano una scarsa ricchezza specifica non intercettando il retroduna; T06 presenta una buona relazione positiva tra il n° di specie e la posizione del plot.

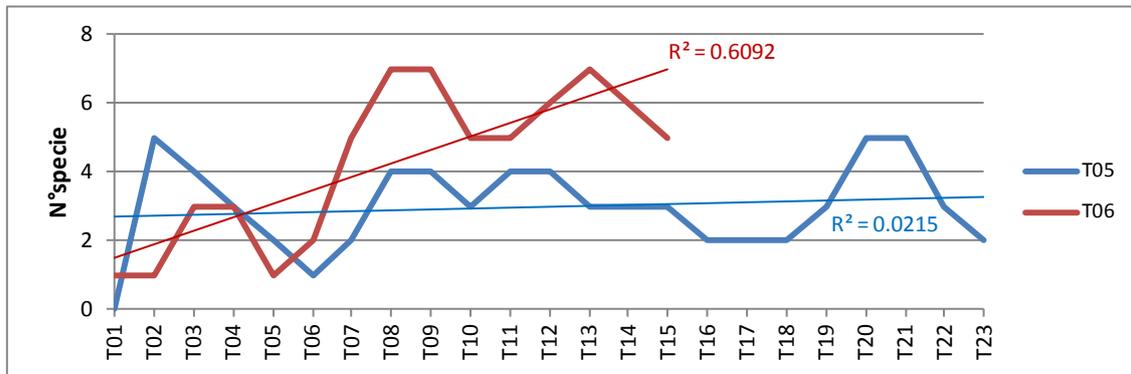


Figura 4. 19 - Relazione N°specie/plot per i transetti T05 e T06, sito Marina di Ravenna.

Bevano Nord

Nel sito Bevano Nord sono stati eseguiti i transetti T01 e T10, Figura 4.20 e 4.21.

T01, con un totale di 21 specie, mostra una prevalenza dell'aggregazione a *Cyperus capitatus* (zigolo delle spiagge) sul tratto d'avanduna, una specie questa che sebbene tipica anche dell'agropireto e dell'ammofiletto, spesso si ritrova al posto di queste ultime a formare delle aggregazioni a copertura elevata, quasi monospecifica, che lascia poco spazio alle altre specie.

Più all'interno la duna diventa stabile con coperture elevate di *Tortula r.* interrotta solo da una fascia di piantumazione di tamerice.

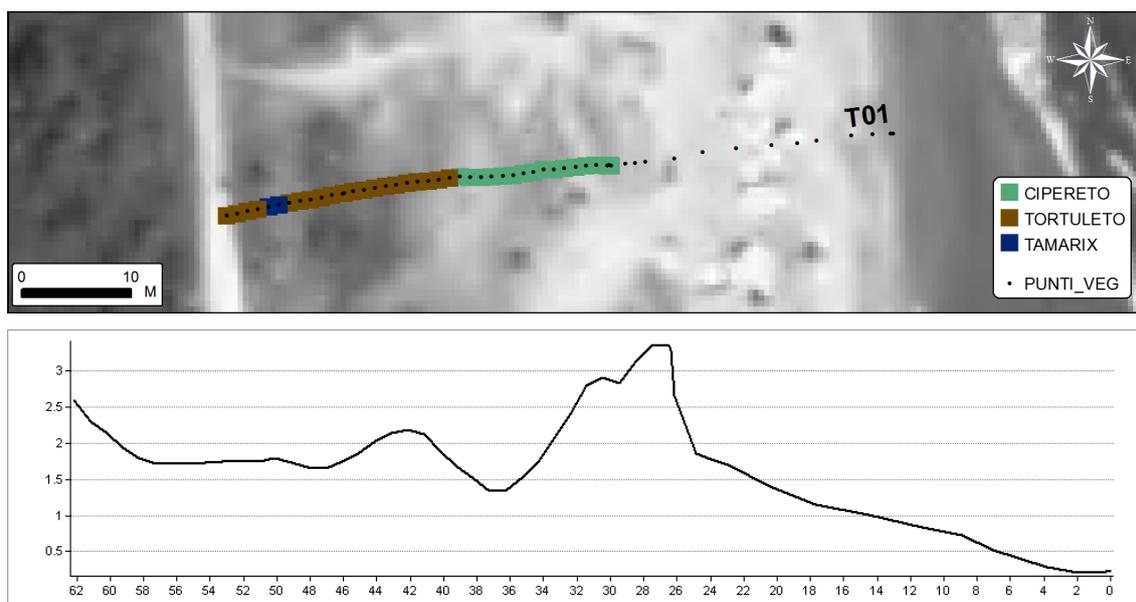


Figura 4. 20 –Bevano Nord - T01. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia.

T10, con un totale di 21 specie, si trova in ambiente del tutto peculiare, poiché quello che dovrebbe essere il retroduna si ritrova nuovamente a contatto con l'acqua, quindi la periodica inondazione e la salinità, per la presenza del tratto relitto del fiume che oggi forma uno stagno costiero; ciò comporta una sorta di regressione verso l'agropireto, se consideriamo la consueta successione vegetazionale. Nella porzione centrale del transetto si alternano a mosaico le comunità di duna bianca, con la prevalenza alternata o di ammofila o dello zigolo. Bisogna qui ricordare che la zona è stata oggetto di piantumazione nel 2006, piante che tuttora resistono sulla duna nonostante il continuo disturbo delle mareggiate.

La relazione N°specie/plot, Figura 4.22, mostra una lieve relazione positiva per T01, sottostimata a causa del plot T0118 corrispondente ad una recente piantumazione di tamerice, quindi con una sola specie. T10 non mostra alcuna relazione e ciò è in linea con le valutazioni appena fatte sulla particolare dinamica di quest'area.

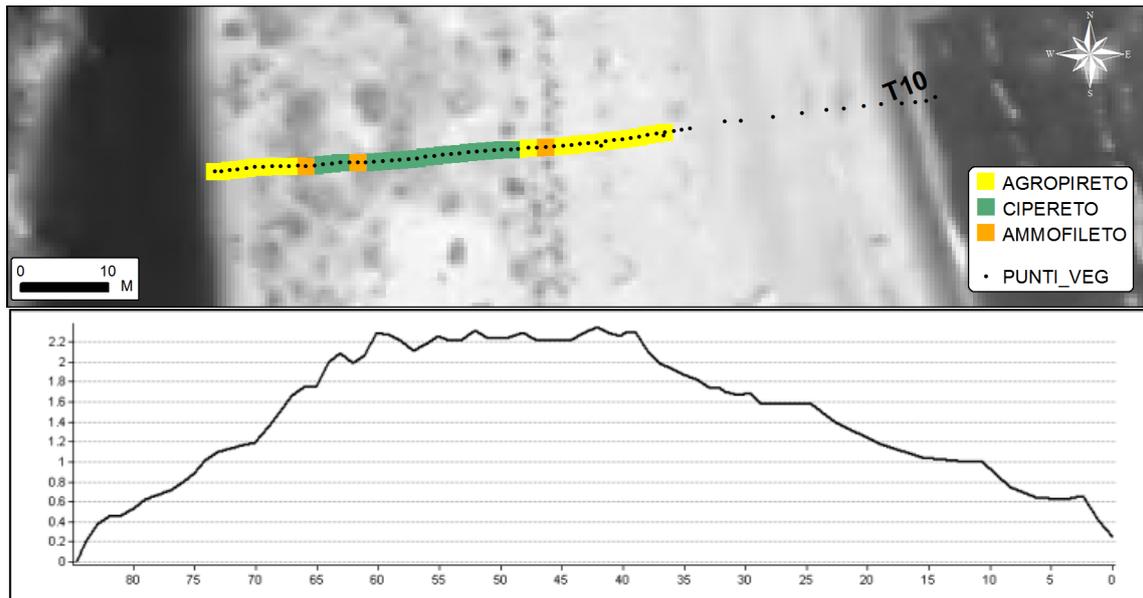


Figura 4. 21 - Bevano Nord – T10 . Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

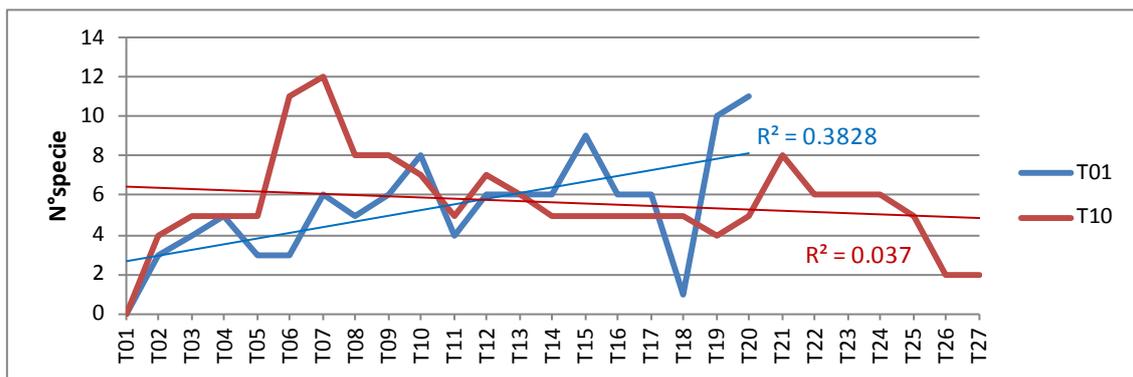


Figura 4. 22 – Relazione N°specie/plot per i transetti T01 e T10, sito Bevano Nord.

Bevano Sud

I transetti nell'area a sud della foce sono T11, T12 e T02, ordinati da nord a sud.

T11, Figura 4.23, è impostato in corrispondenza dello spit litoraneo, in presenza di un'ampia spiaggia antistante e l'area fluviale al retro dove la vegetazione assume dei tratti più marcatamente alofili.

La vegetazione presenta un pattern più a mosaico che di successione trasversale, dove si alternano locali prevalenze delle specie di agropireto, cipereto ed ammofileto. Degno di nota è che dove prevale l'agropireto la ricchezza specifica è alta (10 specie) mentre la prevalenza dello zigolo determina una composizione quasi mono-specifica con al massimo 4 specie, ciò determina una relazione N°specie/plot nulla, Figura 4.26. La presenza di *Ammophila arenaria* è perlopiù puntuale e non molto estesa.

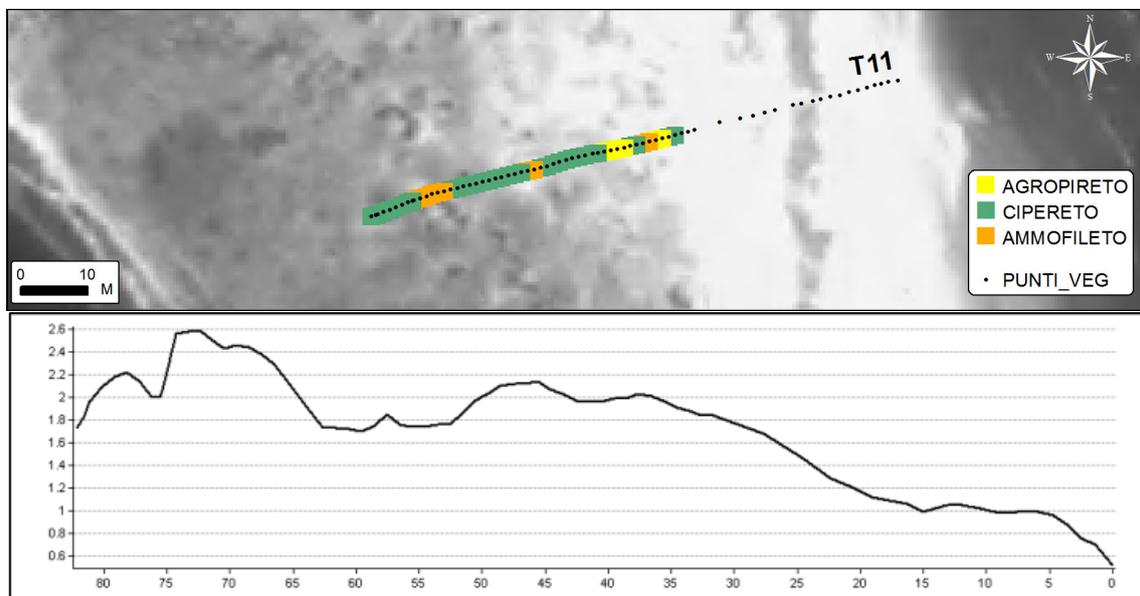


Figura 4. 23 - Bevano Sud – T11 . Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

T12, Figura 4.24, è impostato su un tratto di cordone dunoso vero e proprio. In questo transetto è stato rinvenuto il numero massimo di specie, 36, con un numero medio di specie /plot di 10.

Tendenzialmente il numero di specie aumenta nei plot interni ma molte sono state rinvenute anche nei plot iniziali di agropireto. Nelle porzioni più elevate predomina l'ammofileto con locali aggruppamenti di *Cyperus capitatus*, e presenza abbondante di *Ambrosia psilostachya*; all'interno, al diminuire delle altezze si sviluppa il tortuleto.

Anche T02, Figura 4.25, mostra un'elevata ricchezza specifica che si manifesta sia nel tortuleto che nell'agropireto; la successione rispecchia la naturale evoluzione della vegetazione in relazione alle morfologie; il plot "Disturbo" in questo caso coincide con un arbusto molto esteso ma isolato dell'alloctona *Amorpha fruticosa*.

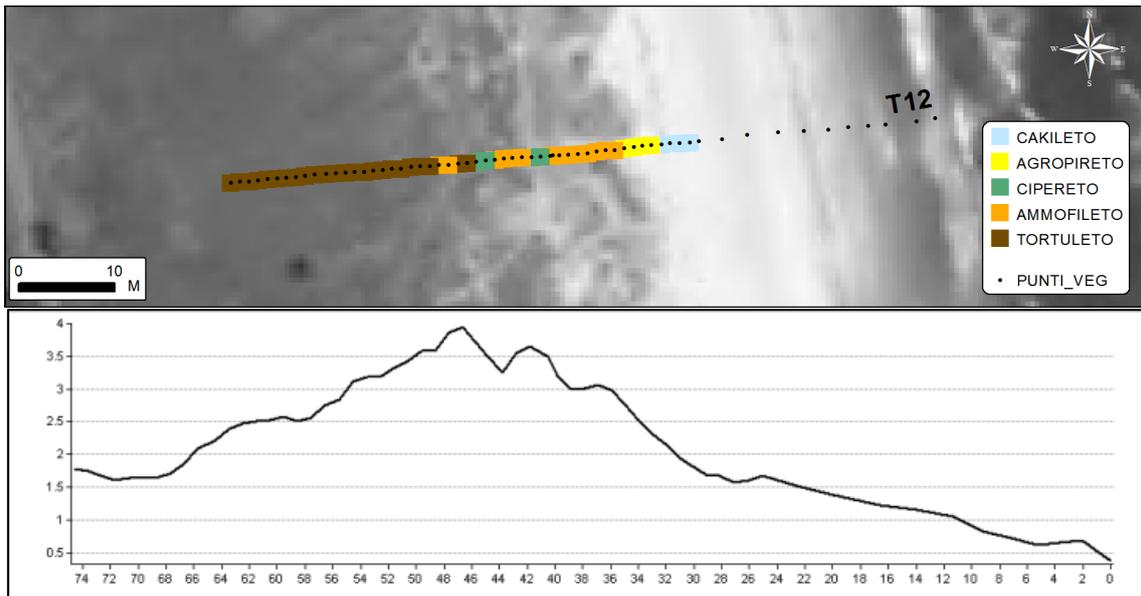


Figura 4. 24 - Bevano Sud – T12 . Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

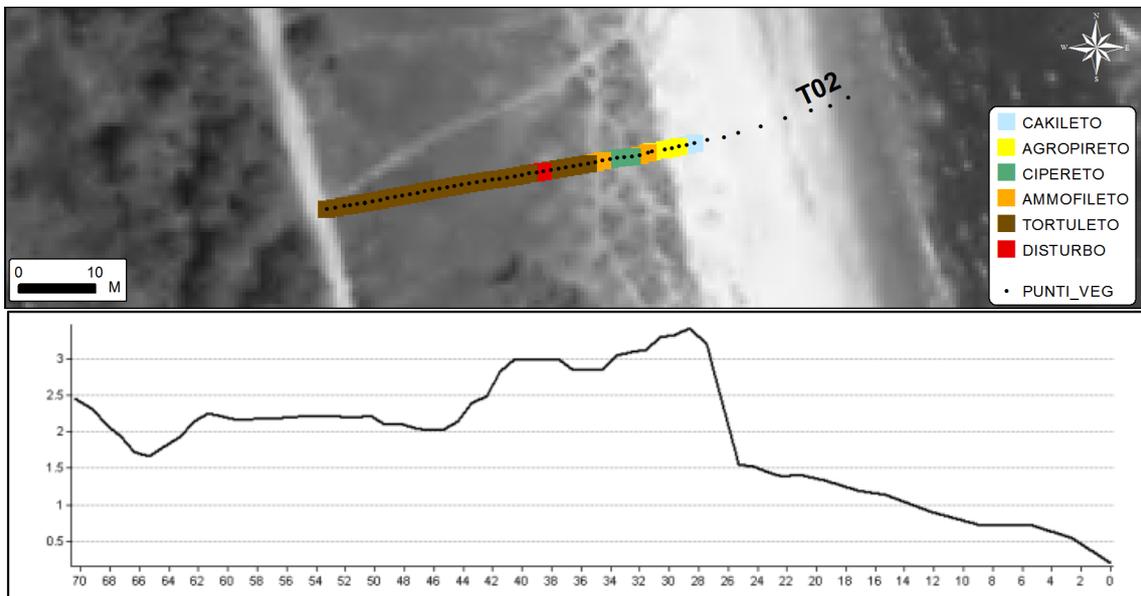


Figura 4. 25 - Bevano Sud - T02. Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia

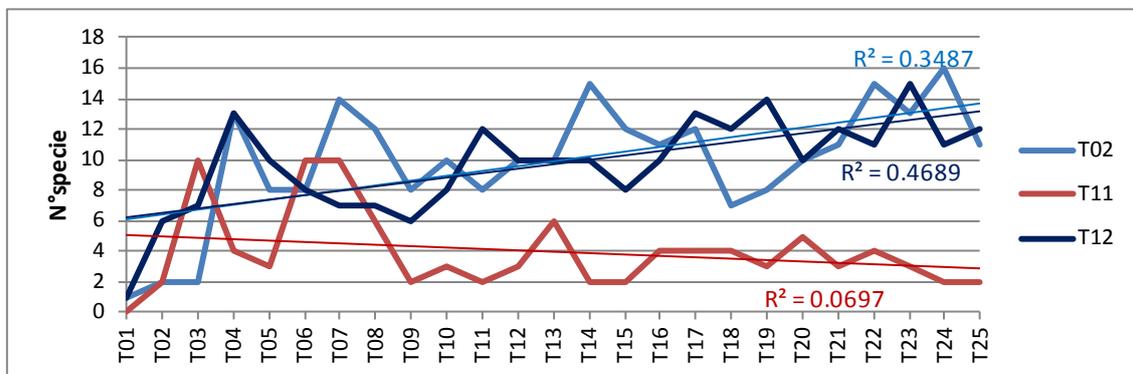


Figura 4. 26 - Relazione N°specie/plot per i transetti T11, T12 e T02, sito Bevano Sud.

Milano Marittima

A Milano Marittima è stato effettuato un solo transetto, Figura 4.27, poiché il sito di modeste dimensioni non presenta molta variabilità della morfologia. In generale la duna si presenta come una duna stabile sostanzialmente priva della parte frontale mobile a causa di una dinamica sedimentaria non presente o interrotta, sia per la presenza di capanni e rimesse al piede dunale e sia per la riprofilatura con mezzi meccanici che ogni primavera elimina qualsiasi nuova morfologia. Il transetto mostra come il corpo dunoso sia un mosaico delle associazioni di tortuleto e sileno- vulpieto; nei plots iniziali, sebbene l'ambiente non sia d'avanduna dal punto di vista geomorfologico, probabilmente la vegetazione risente della maggiore mobilità del sedimento per cui s'instaura ugualmente una cenosi di duna mobile, in questo caso il cipereto.

Per quanto concerne la numerosità specifica, il grafico in Figura 4.28, mostra una certa variabilità che comunque non denota alcun trend particolare.

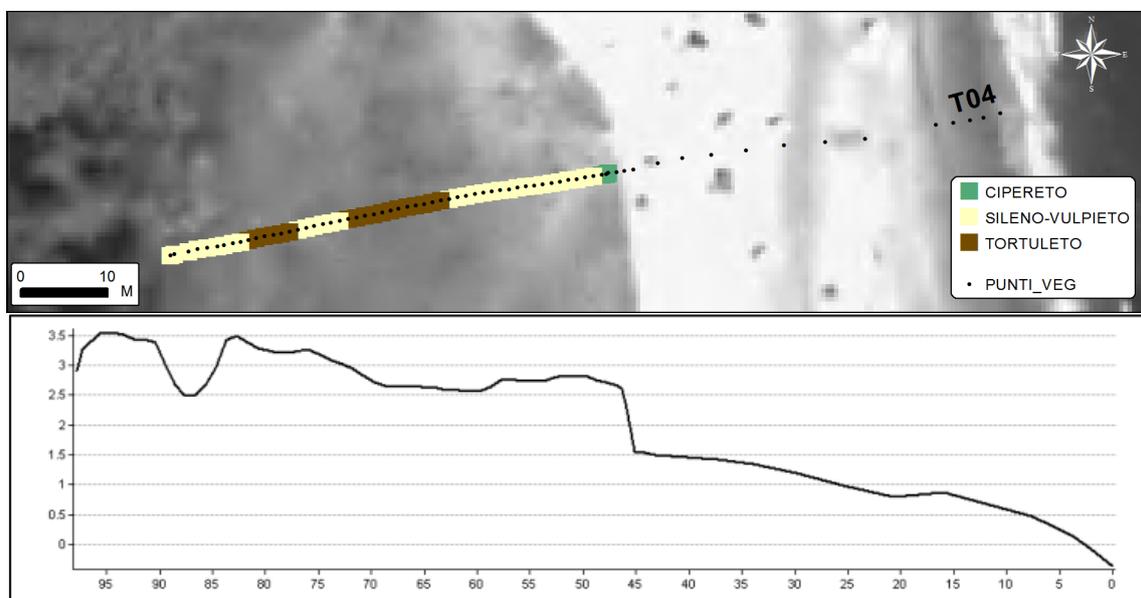


Figura 4. 27 – Milano Marittima - T04 . Transetto con relative comunità vegetazionali e topografia.

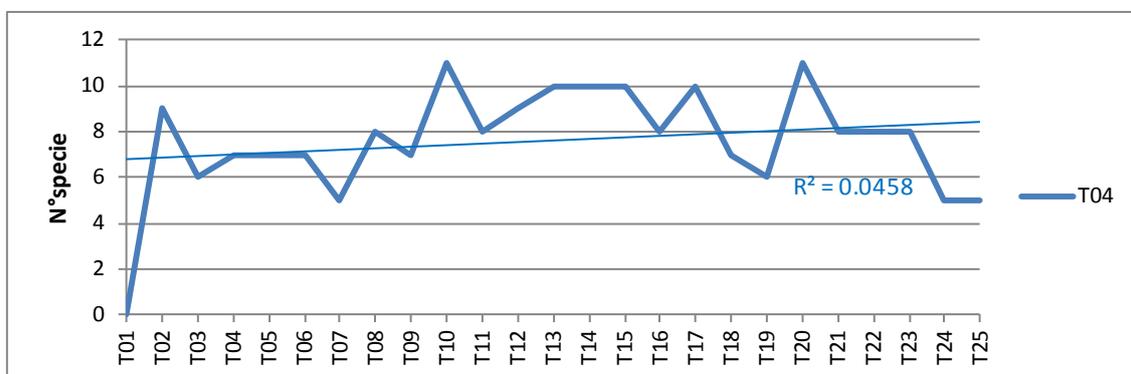


Figura 4. 28 - Relazione N°specie/plot per i transetti T04, sito Milano Marittima.

4.4.2 Relazioni vegetazione-geomorfologia

In questa fase l'obiettivo è stato l'individuazione di relazioni tra le variabili morfologiche della duna e la distribuzione della vegetazione. Le variabili ambientali, registrate o calcolate, sono appunto variabili morfologiche e topografiche e si riferiscono alla duna ed alla spiaggia, come descritto la paragrafo 4.3: distanza da riva, **DIS**; altezza l.m.m, **ALT**; pendenza media, **PEN**; evoluzione geomorfologica, **TEN**.

Una prima analisi ha riguardato la sola matrice delle variabili ambientali "248 siti x 4 var".

La variabilità spiegata dalle prime due componenti (PC1 + PC2) rispetto alla variabilità totale, *cumulative proportion*, è del 66.19%, Tabella 4.4.

Tabella 4. 4 –Importanza delle componenti- matrice delle variabili morfo-topografiche.

	PC1	PC2	PC3	PC4
<i>Eigenvalue</i>	1.4936	1.1539	0.6900	0.6624
<i>Proportion Explained</i>	0.3734	0.2885	0.1725	0.1656
<i>Cumulative Proportion</i>	0.3734	0.6619	0.8344	1.0000

Nel biplot, Figura 4.29, il cerchio denominato "*circle of equilibrium contribution*" indica la lunghezza dei vettori che contribuiscono in egual modo a tutte le dimensioni della PCA, quindi i vettori con maggior lunghezza forniscono un contributo più elevato della media e possono essere interpretati con elevata confidenza (Borcard *et al.*, 2011); in questo caso tali caratteristiche sono da attribuire ai vettori di PEN e DIS, mentre quelli di ALT e TEN contribuiscono in modo minore alla varianza totale del dataset e la loro interpretazione risulta meno sicura. Le variabili PEN e DIS mostrano un'accentuata correlazione inversa, quindi le pendenze sono più elevate nei plots verso mare rispetto a quelli più interni; ALT e TEN mostrano una correlazione diretta, cioè i plots ad elevazione maggiore corrisponderebbero ad aree di recente accumulo, tra il 2005 ed il 2013, una relazione questa che obiettivamente suscita qualche perplessità poiché se è vero che le porzioni più elevate di cresta possono essere di recente formazione è anche vero che non tutti i siti presentano una tale conformazione ed inoltre le aree di duna embrionale che non hanno grandi elevazioni sono anch'esse aree di deposizione. Probabilmente tale relazione esula da un'interpretazione lineare poiché vi è in giogo anche l'erosione delle porzioni frontali che complica notevolmente il quadro complessivo.

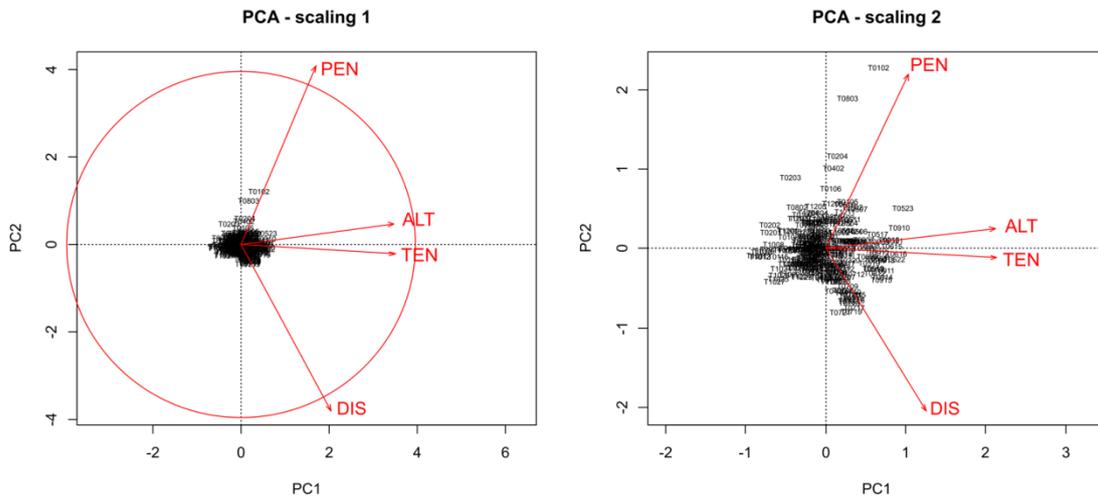


Figura 4. 29 - Biplot dell'analisi PCA sulla matrice delle variabili morfo- topografiche

Una seconda analisi PCA è stata eseguita sulla matrice delle coperture vegetali “248 siti x 51 specie”. In questo caso, le prime due componenti (PC1 + PC2) spiegano il 28.61 % della variabilità totale, Tabella 4.5. Il biplot, Figura 4.30, evidenzia che sono sette le specie che possono essere interpretate con elevata confidenza e le loro relazioni trovano conferma nel naturale raggruppamento. Di particolare interesse la correlazione inversa, seppur debole, tra ELYJUN e CYPCAP (rispettivamente *Elytrigia j.* e *Cyperus c.*), relazione che più volte è stata sottolineata nell'analisi generale dei pattern spaziali nel precedente paragrafo

Tabella 4. 5 - Importanza delle componenti - matrice delle coperture vegetazionali.

	PC1	PC2	PC3	PC4
<i>Eigenvalue</i>	0.1241	0.07604	0.06488	0.05288
<i>Proportion Explained</i>	0.1774	0.10868	0.09272	0.07558
<i>Cumulative Proportion</i>	0.1774	0.28605	0.37877	0.45435

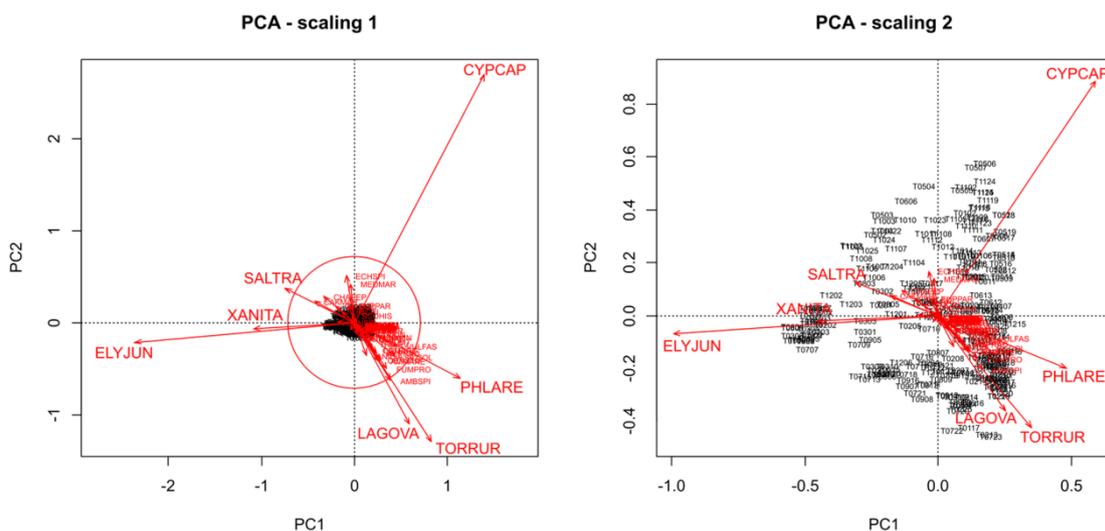


Figura 4. 30- Biplot dell'analisi PCA sulla matrice delle coperture vegetali.

Infine, una terza analisi è stata condotta considerando entrambe le precedenti matrici mediante RDA. Nello specifico la matrice delle coperture vegetazionali è la matrice Y delle variabili risposta e quella delle variabili ambientali è la matrice X delle variabili esplicative.

I risultati mostrano una variabilità spiegata dal modello abbastanza bassa (8%) ed una quota molto elevata di significatività nei residui (61%), cioè la maggior parte della varianza è data da variabili che non sono state considerate in questo modello. Il test di permutazione conferma la significatività dei risultati dell'RDA, Tabella 4.6.

Tabella 4. 6 – RDA. R2 adjusted, Partizione della varianza e Test delle permutazioni.

ADJUSTED R²		0.103914			
PARTITIONING OF VARIANCE:					
	Inertia	Proportion			
Total	0.6997	1			
Constrained	0.08286	0.1184			
Unconstrained	0.61684	0.8816			
PERMUTATION TEST FOR RDA:					
	Df	Variance	F	Pr(>F)	
Model	4	0.08286	8.1608	0.001	***
Residual	243	0.61684			
RDA1	1	0.04758	18.7418	0.001	***
RDA2	1	0.02221	8.7498	0.001	***
RDA3	1	0.01105	4.3513	0.001	***
RDA4	1	0.00203	0.8002	0.685	
Residual	243	0.61684			
Signif. codes:	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

Interessanti risultano alcune specifiche relazioni variabile-specie, Figura 4.31, come il caso di ALT-AMMARE, relazione che conferma le particolari esigenze di *Ammophila arenaria*, fondamentale per l'ecosistema dunoso, che si sviluppa in siti posti ad una certa altezza sul livello del mare. Sempre la variabile ALT mostra poi relazioni inverse con diverse specie del cakileto quali SALTRA, CAKMAR, CHAPEP.

Per quanto riguarda DIS (distanza dal mare) vengono evidenziate solo relazioni inverse, anche in questo caso con le specie del cakileto che rispetto alle altre crescono indubbiamente a distanze minori da riva. In questo caso ci si sarebbe aspettato di ottenere anche delle relazioni dirette significative ma probabilmente, fatta eccezione per le specie del cakileto, tale relazione non è così lineare come ci si aspetterebbe.

La variabile PEN (pendenza media) non mostra alcuna relazione.

La variabile TEN (evoluzione topografica recente, 2005-2013) invece mostra una significativa relazione con OENSTU, specie alloctona invasiva, che plausibilmente riesce ad insediarsi nei tratti di duna di recente formazione o dove comunque c'è stato un recente accumulo e la colonizzazione da parte delle autoctone è meno serrata, la stessa valutazione vale per XANITA.

di ordine diverso sono le considerazioni per la relazione TEN-ELYJUN poiché in questo caso siamo di fronte alla naturale colonizzazione e ad ogni modo il grado di correlazione è meno im-

portante rispetto alle precedenti. Meno chiare risultano le relazioni inverse di tale variabile con le specie CYPCAP, TORRUR, CALSOL, MEDMAR.

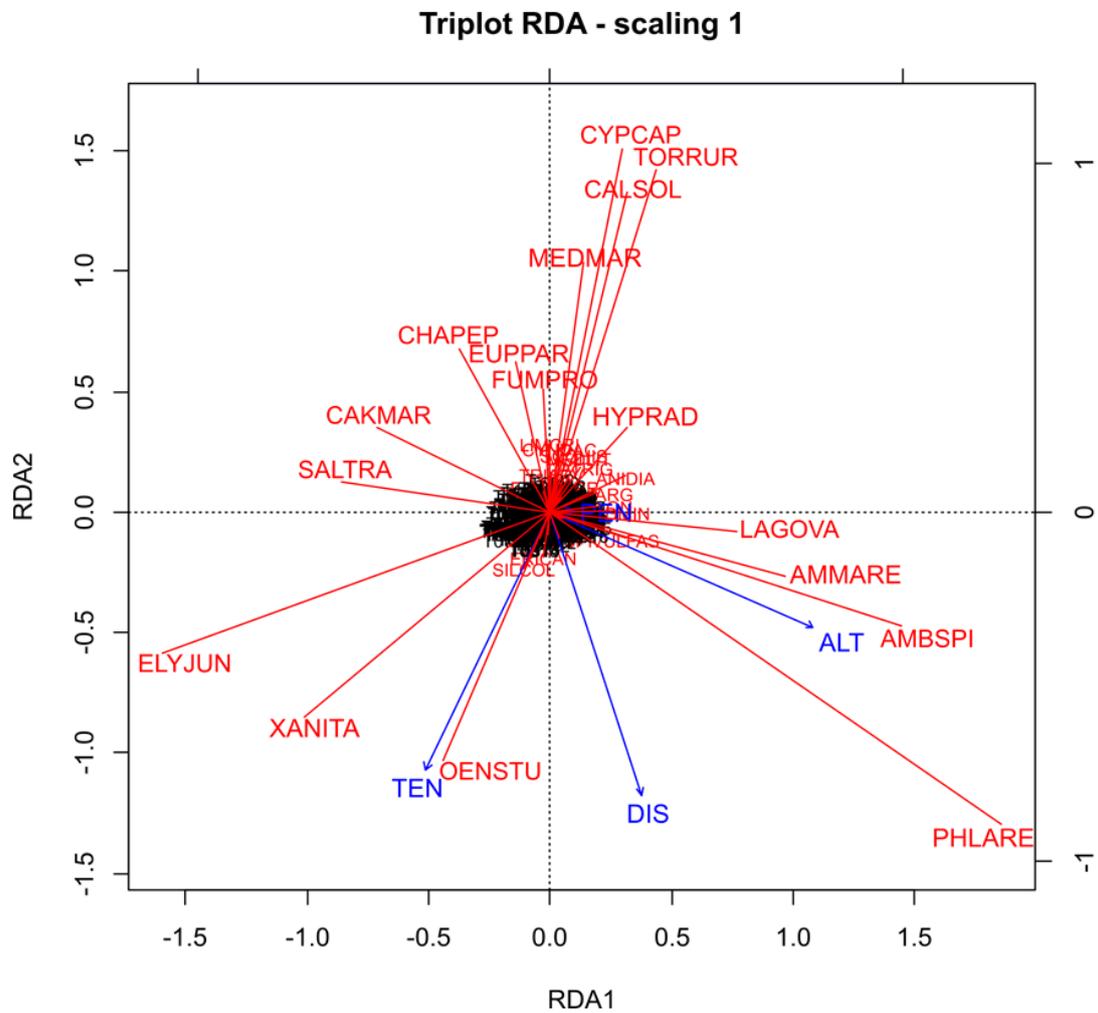


Figura 4. 31 - Triplot dell'analisi RDA tra la matrice delle variabili topografiche e quella delle coperture vegetali.

4.5 CONCLUSIONI

In questa parte dello studio si è voluto porre l'accento sulle modalità di sviluppo della successione vegetazionale sulla costa ravennate, anche in relazione ad alcune importanti variabili morfo-topografiche. Con questo obiettivo sono stati studiati 12 transetti perpendicolari alla costa, in sei diverse località, effettuando i rilievi della vegetazione e della topografia.

Nelle sei località sono riscontrabili sei condizioni molto diverse tra loro, si va zone naturali dalle criticità più o meno marcate, come Bevano Nord e Bevano Sud, a contesti di spiagge a vari livelli d'impatto antropico. Paradossalmente l'erosione è più intensa nei tratti naturali che privi di difese costiere pagano il prezzo della protezione dei tratti contigui, mentre le spiagge antropizzate prese in esame sono in condizioni di stabilità/accrescimento della spiaggia trovandosi in corrispondenza di tratti costieri dove il drift litoraneo è bloccato dalle opere di difesa o dai moli. Nonostante ciò la valutazione della struttura spaziale della vegetazione, dell'aggregazione specifica e della numerosità specifica evidenzia un quadro in cui solo nei siti naturali la vegetazione assume una distribuzione vicina a quella potenziale: cenosi distribuite in relazione alla stabilità della duna; ricchezza specifica in generale più elevata e che aumenta verso le fasce più interne; specie alloctone non dominanti.

In particolare, ciò si realizza al meglio nei transetti T12 e T02 di Bevano Sud dove, seppur in presenza di specie alloctone, si rinvengono tutte le associazioni tipiche ed i contatti dinamici tra di esse sono quelli naturali. Unica eccezione ha riguardato il transetto effettuato sullo spit della foce, T11, dove la dinamica è differente ma per la presenza del torrente al retro che determina una condizione ambientale del tutto diversa e non paragonabile. Proprio in questo transetto è lampante una condizione nuova e non del tutto chiara che riguarda l'Aggr. a *Cyperus capitatus*. La specie è ampiamente riconosciuta come specie psammofila (paragrafo 2.5) dell'agropireto e dell'ammofileto, ciò nonostante molto spesso assume una fisionomia di aggregazione quasi monospecifica sostituendo le piante caratteristiche delle due associazioni. Tale supposizione viene anche confermata dal punto di vista statistico, in Figura 4.31 *Elytrigia j.*, *Ammophila a.* e *Cyperus c.* mostrano correlazioni inverse, seppur non nette. Di tale fenomeno, riscontrato in numerose occasioni e in diversi transetti, non vi è traccia in letteratura, probabilmente proprio per la naturale presenza della specie sulle dune ravennate. Pur se vicariante, in un certo senso, delle graminacee citate, il contributo dello zigolo delle sabbie all'accrescimento dei sistemi dunosi è tuttavia molto diverso: lo sviluppo di un apparato radicale molto esteso orizzontalmente indubbiamente contribuisce alla stabilità della duna; allo stesso tempo però questa specie presenta una conformazione del fusto aereo completamente diversa dai cespi intricati delle due graminacee, caratteristica quest'ultima che le rende fondamentali nella funzione di edificazione della duna. In conclusione, in un contesto come quello odierno di elevata precarietà dei sistemi dunosi le estensioni di popolamenti monospecifici di *Cyperus capitatus* al posto dei fitti cespugli delle piante edificatrici, potrebbero rappresentare un'ulteriore causa di deficit deposizionale.

Tra i siti naturali, T01 a Bevano Nord, mostra una condizione sì naturale ma pesantemente intaccata dall'erosione che scalza il fronte dunoso sub-verticale, qui la vegetazione riesce a crescere solo sopra la parete perché al piede dunale i ripetuti crolli non ne permettono l'attecchimento; anche T10 mostra una condizione alterata ma, come nel caso precedente di T11, la causa è da ricercarsi in una diversa conformazione ambientale, ossia per la presenza al posto del retroduna di uno stagno costiero che determina una regressione della naturale dinamica.

In riferimento ai siti antropizzati, in generale, l'intera successione vegetazionale non riesce mai a svilupparsi e le cause sono diverse. In T05-T06 (Marina di Ravenna) l'impatto più forte è senz'altro costituito dal calpestio che negli anni ha provocato la formazione di imponenti blowouts dove la vegetazione non cresce più. A Porto Corsini vi è una dinamica sedimentaria molto attiva grazie alla quale si è sviluppata un'ampia fascia di dune embrionali; oltre questa fascia manca una vera e propria avanduna attiva, a causa dell'assenza quasi totale dell'ammofiletto al posto della quale s'insedia vistosamente l'alloctona *Oenothera s.*. A Casal Borsetti, in particolare T09, la successione è intensamente dominata da piante alloctone invasive, *Cenchrus s.* nelle dune embrionali e *Ambrosia c.* nelle fasce più elevate, probabilmente a causa delle condizioni di nitrofilia.

Infine, correlando l'informazione sulle coperture delle specie con le caratteristiche morfotopografiche, viene confermata la già nota relazione tra *Ammophila arenaria* ed elevazione sul livello medio del mare. È proprio l'altezza della vegetazione che maggiormente influenza la morfologia delle dune (Van Dijk *et al.*, 1999); nello specifico i densi e alti cespi di *Ammophila arenaria* favoriscono lo sviluppo di una formazione dunosa che si sviluppa soprattutto in elevazione dalla morfologia a punta; la pianta a sua volta trae un beneficio dalla distanza dalla falda salata.

Concludendo, tali valutazioni vogliono essere sì un contributo, seppur minimo, alla conoscenza della dinamica della vegetazione costiera ravennate, ma anche e soprattutto delle indicazioni per le future ed auspicabili azioni di conservazione delle aree dunose, che come già ampiamente evidenziato nel capitolo 2, sono destinate a scomparire del tutto senza una politica attiva di gestione, e con queste scomparirebbe anche un esclusivo ed ormai rarefatto patrimonio di biodiversità.

CAPITOLO 5. FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE DUNE EMBRIONALI

5.1 INTRODUZIONE

La scelta di focalizzare il lavoro sulle dune embrionali deriva dalla considerazione che tali formazioni sono tra le porzioni più attive e dinamiche del sistema, prestandosi quindi ad un studio nel breve periodo. La loro formazione inizia quando la sabbia trasportata dal vento impatta contro un ostacolo, tipicamente una pianta, e da luogo alla formazione di piccoli ed isolati cumuli eolici alti nell'ordine dei decimetri. Questo processo può essere molto repentino ma al tempo stesso le formazioni rimangono estremamente precarie, a forte rischio di scomparsa a causa di una mareggiata (Hesp, 2002; Olivier & Garland, 2003; Suanez *et al.*, 2012) ma anche a causa del calpestio che distrugge le piante. La loro eventuale crescita in altezza e larghezza, laddove vi sia sufficiente apporto eolico di sedimento ed una continua colonizzazione da parte della vegetazione, determina una maggiore resistenza alle forzanti meteomarine portando nel tempo alla formazione di un'avanduna stabile (Hesp, 2002); in questo caso anche la copertura vegetale evolve passando dalle associazioni vegetali tipiche dello stadio embrionale, come il cakileto e agropireto (che spesso compaiono sovrapposte a causa della contrattura spaziale dell'ecosistema) all'ammofileto. Le prime due sono costituite perlopiù da specie annuali e pioniere, le coperture sono generalmente molto basse come anche la ricchezza specifica.

Molte sono le variabili che determinano l'eventuale sviluppo della duna embrionale; la variabilità dell'apporto eolico dipende dalle caratteristiche del vento in relazione a quelle della spiaggia, dall'umidità del suolo, (Davidson-Arnott *et al.*, 2008; Baur *et al.*, 2009), dalla copertura della vegetazione (Hesp, 1983), dall'incidenza delle mareggiate; a causa di questa dinamicità la transizione da duna embrionale a stabile può impiegare molto tempo, nell'ordine di decenni (McLean & Shen, 2006, Mathew *et al.*, 2010).

In questo studio sono stati monitorati i fattori che contribuiscono allo sviluppo delle dune embrionali nell'area di Foce Bevano, per circa un anno. Il monitoraggio è stato eseguito mediante tecniche di fotogrammetria digitale terrestre. Le aree indagate hanno mostrato patterns di crescita/erosione complessi e molto variabili; una variabilità da attribuire sia alla copertura vegetazionale che alle forzanti meteomarine.

5.2 AREA DI STUDIO

L'area di studio è situata tra gli abitati di Lido di Dante a nord e Lido di Classe a Sud, nel territorio del comune di Ravenna. Il sito fa parte della Riserva Naturale orientata della *Duna Costiera Ravennate e della Foce del Torrente Bevano*, Figura 5.1, che comprende un tratto di spiaggia di circa sei chilometri bordata da un cordone dunoso perlopiù continuo, le porzioni di pineta costiera denominate *Ramazzotti* e *Pineta di Classe* e il tratto finale del torrente Bevano la cui foce si presenta eccezionalmente come una foce naturale non regimata. L'area fa parte della più grande Zona Umida *Ortazzo, Ortazzino, Foce del Torrente Bevano*, zona protetta a livello internazionale come SIC, ZPS, ZU nonché come Parco del Delta del Po.

La spiaggia ha un'orientazione NNW-SSE e si presenta di forma leggermente arcuata, a testimonianza del processo di progressiva rettificazione della costa, Figura 5.2, che ha visto forti tassi di avanzamento della spiaggia e quindi delle dune nell'area della foce e tassi di crescita via via minori fino a nulli verso nord e verso sud. Tale processo ha avuto la sua fase più importante nella prima metà del '900, andando a diminuire e poi cessare nelle ultime decadi. Già nelle ortofoto del 1972 è possibile notare, ad una valutazione speditiva, che la fase di veloce avanzamento del tratto centrale dell'area è finito e la spiaggia si mantiene perlopiù costante; agli estremi dell'area, vicino i centri urbani, inizia una forte fase di arretramento della spiaggia soprattutto nella parte nord. Come già ampiamente descritto nel paragrafo 2.2 la formazione del cordone dunoso inizia circa negli '50 del XX secolo e la sua evoluzione geomorfologica procede con l'avanzamento della spiaggia appena descritto. Attualmente il cordone dunoso del Bevano si presenta come cordone perlopiù continuo ma eroso frontalmente dalle mareggiate invernali, con pareti verticali o sub-verticali anche molto alte e soggette a crolli.

La dinamica sedimentaria è attiva, grazie sia all'assenza di pressioni antropiche dirette che all'apporto di sedimenti del torrente Bevano, testimoniato dall'accrescimento continuo dello spit litorale in prossimità della foce e dalle numerose barre sottomarine intertidali che orlano la costa. Altra testimonianza della presenza di un sistema attivo e resiliente è la formazione, anche molto repentina, di dune embrionali al piede dell'avanduna erosa. Questa fascia di dune ha sostanzialmente un ciclo annuale, di formazione e distruzione, e di conseguenza non sempre riesce a proteggere la duna, stabile o in consolidamento, dall'erosione.

Ad ogni modo l'elevata naturalità dell'area ed il divieto di accesso ai bagnanti, garantiscono che la naturale formazione delle dune embrionali avvenga relativamente al sicuro rispetto alle interferenze antropiche come calpestio, pulizia della spiaggia e vandalismo. Caratteristiche assolutamente necessarie allo svolgimento dello studio e che quindi hanno reso l'area ottimale ai fini dello studio.



Figura 5. 1 - Riserva Naturale della Duna Costiera Ravennate ed el Torrente Bevano (a sinistra) ed ubicazione delle aree di studio nei pressi della foce (a destra). Ortofoto AGEA 2014.



Figura 5. 2 - Linee di costa successive nel tempo per l'area del cordone dunoso di Foce Bevano. Le linee sono state tracciate mediante fotointerpretazione delle relative cartografie IGM o ortofoto.

5.3 METODOLOGIE

Lo studio è stato impostato sul monitoraggio di sei aree di duna embrionale, Figura 5.1, di seguito denominate anche *plots*; le aree sono state selezionate in modo da garantire, per quanto possibile, una certa differenziazione rispetto alla vegetazione (specie e copertura iniziale) ed alla distanza dalla battigia. I sei plots sono ubicati tre a nord e tre a sud della foce e misurano circa 6 m² (Tabella 5.1). Le aree di studio sono state delimitate con quattro paletti di legno di 1 m, impiantati nella sabbia per circa 70 cm, Figura 5.3. Ad ogni paletto di delimitazione dell'area è stato quindi applicato un target di riferimento, ossia un quadrato di 10 cm di lato stampato su un supporto plastico, fondamentale nelle fasi di post-processing, Figura 5.4.

Tabella 5. 1 - Superfici delle aree di studio

PLOT (P)	AREA P [m ²]
BN1	6.11
BN2	6.64
BN3	5.90
BS1	4.88
BS2	6.22
BS3	5.98



Figura 5. 3 - Infissione dei paletti nella sabbia



Figura 5. 4 - Area di studio BNL con paletti e targets (sopra) e dettaglio dei targets con relativa denominazione (sotto)

I rilievi sono stati eseguiti a partire dal 05 Maggio 2014 circa ogni venti giorni (in alcuni casi a causa di problemi logistici o dovuti alle condizioni meteo avverse questo periodo è stato più lungo), con l'obiettivo iniziale di proseguire lo studio per un anno solare. I rilievi sono però terminati in anticipo, l'ultimo (R12) è stato eseguito il 02 Febbraio 2015, a causa della mareggiata del 5-6 Febbraio 2015 che ha distrutto quasi tutte le aree di studio (cinque su sei), asportando i paletti e spianando le dune; a seguito di questo evento eccezionale si è quindi deciso d'interrompere la fase di monitoraggio (Figura 5.5). In totale sono stati condotti dodici rilievi, documentando ogni volta l'evoluzione geomorfologica delle sei aree mediante tecniche di fotogrammetria terrestre; contestualmente sono stati svolti il rilievo della vegetazione, il rilievo topografico ed il prelievo di un campione di sabbia.

L'area BS3, unica sopravvissuta alla mareggiata, è stata rilevata altre due volte ma tali dati non sono stati inseriti nelle analisi e nelle comparazioni, sia perché l'impatto della mareggiata ha discostato i paletti dalla posizione originale inducendo pesanti errori nelle valutazioni e sia per mantenere una struttura del lavoro coerente per tutte le aree monitorate.



Figura 5. 5 – Foto dell’area BS1 circa due settimane dopo la mareggiata del 5-6 febbraio 2015. In alto, foto dell’area con livello topografico indicativo della spiaggia pre-mareggiata; il tronco visibile nella foto era completamente seppellito prima della mareggiata, come anche lo steccato che spuntava di circa 20 cm. In basso, legname piaggiato tra il quale è visibile uno dei paletti impiegati nello studio completamente divolto.

5.3.1 Applicazione della fotogrammetria *Structure from Motion (SfM)* per il monitoraggio geomorfologico

La fotogrammetria digitale permette di rilevare aree di territorio più o meno grandi, a seconda del mezzo di supporto, in modo semplice e veloce attraverso lo scatto di foto dell'area indagata seguendo alcune regole di sovrapposizione delle immagini (stereoscopia) e delle fotografia generica. Il rilievo in campo è stato condotto utilizzando una fotocamera digitale reflex Canon 350D (lunghezza focale 55 mm, ISO 100, f/5.6-f/6.3, autofocus, modalità scatto Av) munita di scatto a distanza ed un monopiede fotografico telescopico, in modo da poter rilevare l'area dall'alto. Per ogni area sono state scattate circa 250 foto.

I set di foto sono stati quindi elaborati con il software di grafica 3D *Agisoft Photoscan Pro 1.0.3*, che restituisce la tridimensionalità dell'area indagata sotto forma di nuvola di punti o *point cloud (PC)*, un sistema di punti localizzati da coordinate locali (x, y, z) e caratterizzati eventualmente da altre informazioni come il colore. Questa elaborazione viene svolta mediante l'applicazione dell'approccio *Structure from Motions (SfM)*.

La SfM (Snavely *et al.*, 2008) è una tecnica di *Image-based modelling* per la ricostruzione di modelli 3D a partire da immagini bidimensionali; creata nell'ambito della *computer vision*, negli ultimi anni diversi sono stati gli usi di tale tecnica nell'ambito delle geoscienze (Mancini *et al.*, 2013; Fonstad *et al.*, 2013; Pikelj *et al.*, 2015; Westobi, 2012).

La procedura, implementata in diversi software, prevede prima di tutto il riconoscimento nelle foto di *keypoints* o *features points*, mediante un algoritmo per il riconoscimento degli oggetti (SIFT), per l'allineamento delle foto. In ogni immagine solitamente ci sono molti keypoint, quelli che combaciano in più immagini vengono utilizzati per la creazione di *track* che connettono le immagini l'una all'altra, quindi tramite un approccio incrementale viene considerata la coppia di immagini con il massimo punti di keypoint corrispondenti e a questa vengono aggiunte le altre foto una per volta (Snavely *et al.*, 2006). La ricostruzione della posizione della camera rispetto ai punti, tramite algoritmi di ri-proiezione e minimizzazione dell'errore, attraverso il sistema del *Bundle Adjustment*, permette infine la ricostruzione della nuvola di punti sparsa (Szeliski, 2010).

L'intera procedura può richiedere da alcune ore a giorni a seconda del numero di foto.

La fase successiva è quella dell'ottimizzazione, ossia l'immissione di misure reali (*scale bar*) misurate in campo; solitamente queste misure sono immesse indirettamente attraverso le coordinate dei *ground control points (GCP)* ma in questo caso specifico si è deciso di non procedere in tal modo poiché sarebbe stato introdotto già in partenza un errore di 2-3 cm (errore medio sulla quota di un punto misurato con tecnica DGPS-RTK) quindi sono state utilizzate le misure di distanza tra i centri dei target di riferimento, misurate in campo con un metro. Una volta ottimizzata la nuvola sulle misure reali è possibile aumentare la densità dei punti costruendo una *dense PC*, in base alla posizione stimata della fotocamera ed alle foto (Agisoft LLC, 2013). A

questo punto la PC si presta ad essere ulteriormente elaborata, modificata ed esportata in diversi formati per i diversi utilizzi: PC, DEM, Ortofoto.

5.3.2 Comparazione dei rilievi

La fase successiva ha comportato sostanzialmente la comparazione delle PC della stessa area e successive nel tempo. La maggior parte dei metodi più diffusi per tale operazione si basa sul calcolo della distanza minore e richiede che almeno una delle PC venga trasformata in una *mesh*, una superficie derivata dall'interpolazione dei punti originali; tale operazione può rivelarsi un limite quando si ha a che fare con superfici dalle elevate rugosità, quale è una superficie vegetata. Per superare questo problema è stato utilizzato il plugin M3C2 (*Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) (Lague *et al.*, 2013) sviluppato nell'ambito del software open source *Cloud Compare v2.6.2*¹². M3C2 effettua il calcolo della distanza direttamente tra i punti delle due PC, lungo la direzione della normale al punto ed infine calcola l'incertezza legata alla misura che, secondo gli autori, è legata più che altro ad errori in fase di registrazione/allineamento ed alla rugosità piuttosto che all'algoritmo in sé per sé.

In breve la procedura di M3C2 prevede:

- il calcolo delle superfici normali, per ogni punto (i) viene calcolato il vettore normale ad una superficie stabilita relativamente ad una serie di punti vicini a (i) in base al raggio $D/2$, dove D , *normal scale*, può essere definita dall'utente o scelta tra appositi *guess parameters*
- una volta definite le normali, ogni punto viene proiettato in entrambe le PC in base alla *projection scale (d)*, anche questa definita dall'utente o scelta tra appositi *guess parameters*; ciò permette di calcolare le posizioni medie (i_1 e i_2) di ogni PC rispetto ad (i) e ciò è fatto all'interno di un cilindro di raggio $d/2$ ed orientato lungo la direzione della normale; infine la distanza locale è data dalla distanza tra i_1 e i_2 .

La procedura prevede una fase iniziale di allineamento “manuale” delle PC (*point-pair alignment*) facendo coincidere il centro dei quattro targets di riferimento, Figura 5.4, quindi le nuvole vengono comparate con M3C2 ad ottenere la differenza sull'asse Z calcolata punto per punto, ossia una differenza topografica tra le aree.

I dati sono stati quindi classificati in classi di Accumulo, Stabilità ed Erosione con relative aree in percentuale ed aree assolute in m^2 .

5.3.3 Analisi d'immagine per la valutazione della copertura vegetale

Per quanto riguarda la vegetazione è stato effettuato il rilievo in campo, annotando specie e coperture. In seguito, potendo disporre di vere e proprie ortofoto, per ogni area e per ogni rilievo, si è valutato di sperimentare l'utilizzo dell'*Image Classification Tool* (ArcGis-ESRI), strumento per la classificazione d'immagine sviluppato in ambiente GIS. La stima visiva delle coperture

¹² <http://www.danielgm.net/cc/>

percentuali delle piante è un'operazione ad alto grado di soggettività ed intuizione, è richiesta una notevole esperienza ed inoltre alcuni studi dimostrano che le stime visive sono molto spesso orientate verso i valori estremi delle classi tralasciando i valori intermedi (Hatton *et al.*, 1986). A tal fine tutte le ortofoto sono state georeferenziate, ritagliate per ottenere superfici perfettamente identiche per ogni plot e classificate (*Supervised classification; Maximum Likelihood method*). Dopo la classificazione ogni foto è stata sottoposta ad una serie di filtri (*Majority filter; Boundary clean*) per ottenere una ripartizione più omogenea e coerente dei pixel nelle diverse classi (Sabbia, Biomassa, Vegetazione, Ombra, Target). Il processo, che si basa sulla selezione manuale di *training samples* per ogni classe, si è rivelato molto utile, veloce ed efficiente soprattutto per i primi rilievi, quelli del periodo primaverile-estivo, quando la vegetazione risulta di un verde acceso e viene classificata molto bene. Per i rilievi successivi è stato necessario intervenire "manualmente", poiché la colorazione rosso-brunastra della vegetazione ne comportava una costante sottostima; in questi casi a partire dalla classificazione automatica, sono stati ricavati i poligoni vettoriali che sono stati quindi editati tramite fotointerpretazione. Infine sono state calcolate le relative percentuali di copertura, tra cui quelle d'interesse relative alla vegetazione totale ed alle specie.

5.3.4 Rilievi topografici plot-riva

Nello studio sono state considerate anche le caratteristiche morfologiche della spiaggia antistante ogni area. A tal riguardo per ogni giornata di monitoraggio sono stati effettuati i rilievi topografici secondo transeetti normali a costa, partendo da ogni plot fino a riva.

I rilievi sono stati effettuati con lo strumento GPS Leica Viva GS14 secondo la procedura del rilievo DGPS-RTK (*Real time Kinematic*) che grazie alla connessione in tempo reale alla rete di stazioni permanenti GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permette un'accuratezza sia altimetrica che planimetrica nell'ordine dei 2-3 cm.

5.3.5 Analisi statistiche

Le analisi di statistica multivariata utilizzate nelle seguenti analisi sono le stesse utilizzate e descritte al paragrafo 4.3, a cui si rimanda. Anche in questo caso le analisi sono state svolte attraverso l'utilizzo del software open source R 3.1.1 - *vegan package* (Oksanen *et al.*, 2013, Oksanen, 2013) e seguendo le metodologie indicate in Bocard *et al.*, 2011.

Nelle analisi RDA, la matrice delle variabili effetto (Y) è la matrice che contiene i dati di dinamica geomorfologica "geomorfologia" espressi come accumulo- stabilità- erosione (m²) ed ordinata per singoli casi, a formare una matrice 61 x 3.

Le confronti (C) sono 61 e non 66, come ci si aspetterebbe (6 plot x 11 C), poiché in cinque casi non è stato possibile procedere al confronto; ciò a causa del distacco dei target dai paletti che ha comportato un necessario riposizionamento, rendendo le PC non confrontabili in quel caso.

5.4 RISULTATI

5.4.1 Dati Meteomarini

I dati meteo marini collezionati sono temperatura (C°), precipitazioni (mm), velocità vento (m/s) e direzione vento (°N), livello idrometrico marino (m l.m.m.), altezza significativa d'onda (Hs, m) e periodo significativo d'onda (Ts, s).

I dati sono stati analizzati complessivamente su tutto il periodo di studio, ossia da Maggio 2014 ad Aprile 2015, in modo da poter confrontare l'andamento generale dei parametri meteo con le medie climatiche della zona ed appurarne eventuali differenze; in seguito, gli stessi dati sono stati valutati relativamente ad ogni singolo periodo (C) tra un rilievo (R) e l'altro, Tabella 5.2, in modo da evidenziarne le differenze da mettere poi in relazione alle altre componenti considerate, cioè la dinamica geomorfologica e quella vegetazionale.

Tabella 5. 2 – Denominazione dei Rilievi (R) con relativa data e dei periodi intercorsi tra rilievi o confronti (C)

RILIEVO (R)	DATA	PERIODI/CONFRONTO (C)
1	05.05.2014	
2	29.05.2014	C1 (R1-R2)
3	20.06.2014	C2 (R2-R3)
4	07.07.2014	C3 (R3-R4)
5	28.07.2014	C4 (R4-R5)
6	25.08.2014	C5 (R5-R6)
7	19.09.2014	C6 (R6-R7)
8	14.10.2014	C7 (R7-R8)
9	12.11.2014	C8 (R8-R9)
10	10.12.2014	C9 (R9-R10)
11	09.01.2015	C10 (R10-R11)
12	02.02.2015	C11 (R11-R12)
13*	27.02.2015	C12 (R12-R13)
14*	14.04.2015	C13 (R13-R14)

* solo plot BS3

Precipitazioni e temperatura

La piovosità è un parametro di fondamentale importanza da tenere in considerazione nello studio dei sistemi costieri. Sebbene molti studi confermino che il trasporto eolico può avvenire anche in condizioni di pioggia, allo stesso tempo è altrettanto evidente che questo trasporto risulta esiguo rispetto a condizioni secche, fino a dieci volte minore (Jackson & Nordstrom, 1998). Per questi motivi si è ritenuto opportuno effettuare un'analisi delle precipitazioni. Tali misure sono state ottenute dalla stazione ARPA Ravenna Urbana (44° 24'; 12° 11'; 16 m l.m.m.), disponibili on-line sul sito di Arpa-ER¹³. Dai dati grezzi di precipitazione oraria (mm/h) sono state ricavate le somme mensili che sono state quindi confrontate con i dati medi climatici disponibili per le località limitrofe di Punta marina (elaborazioni a cura dell'Aeronautica Militare) e Marina di Ravenna (Arpa-ER), due stazioni con lunghe serie di dati a disposizione. Dal grafico seguente è possibile notare come i mesi di rilievo (in rosso, Figura 5.6) mostrino valori che si discostano notevolmente da quelli medi. In particolare i mesi estivi di luglio e agosto 2014 hanno visto un livello di precipitazioni totale quasi due volte il valore medio e lo stesso vale per dicembre 2014, tutti mesi tendenzialmente molto secchi. Anche febbraio e marzo 2015 mostrano ampie anomalie positive.

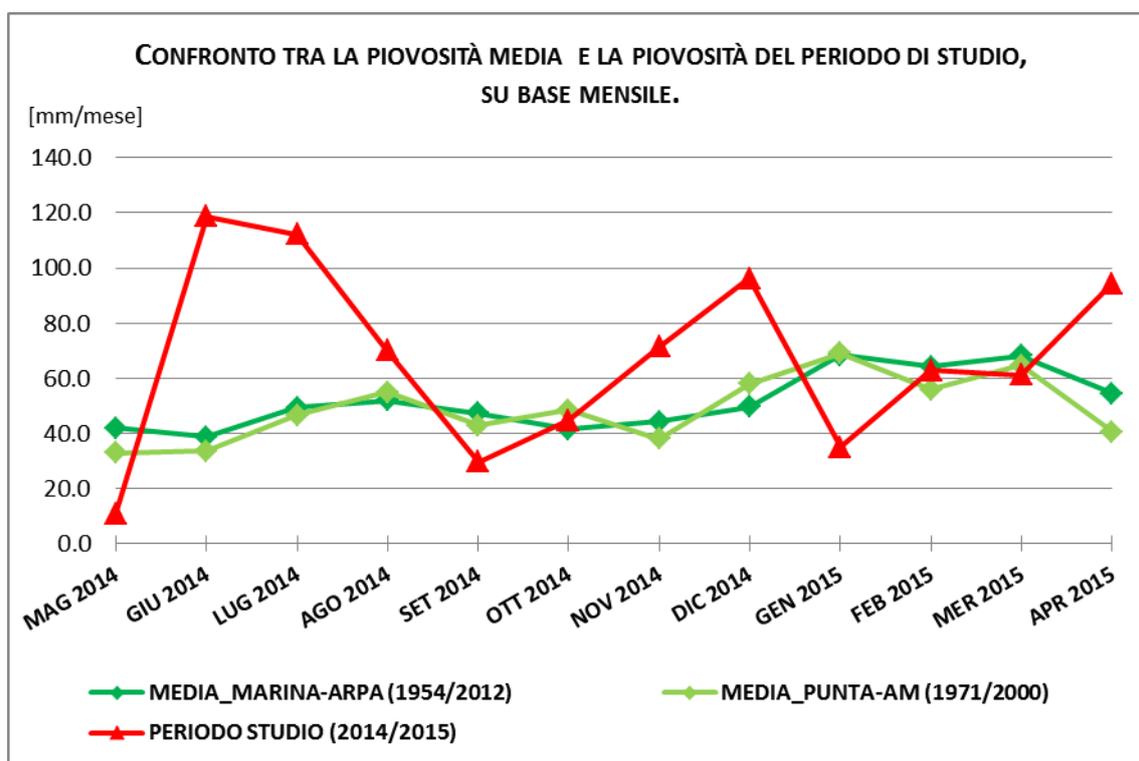


Figura 5. 6 - Confronto sulla piovosità su base mensile.

¹³ http://www.arpa.emr.it/dettaglio_generale.asp?id=3284&idlivello=1625

Una successiva osservazione va fatta in merito ai giorni piovosi, ossia i giorni con precipitazione totale maggiore di 1 mm. Anche in questo caso, luglio e dicembre 2014 sono i mesi che si distinguono come anomalie, con più del doppio di giorni piovosi rispetto alla media. Figura 5.7.

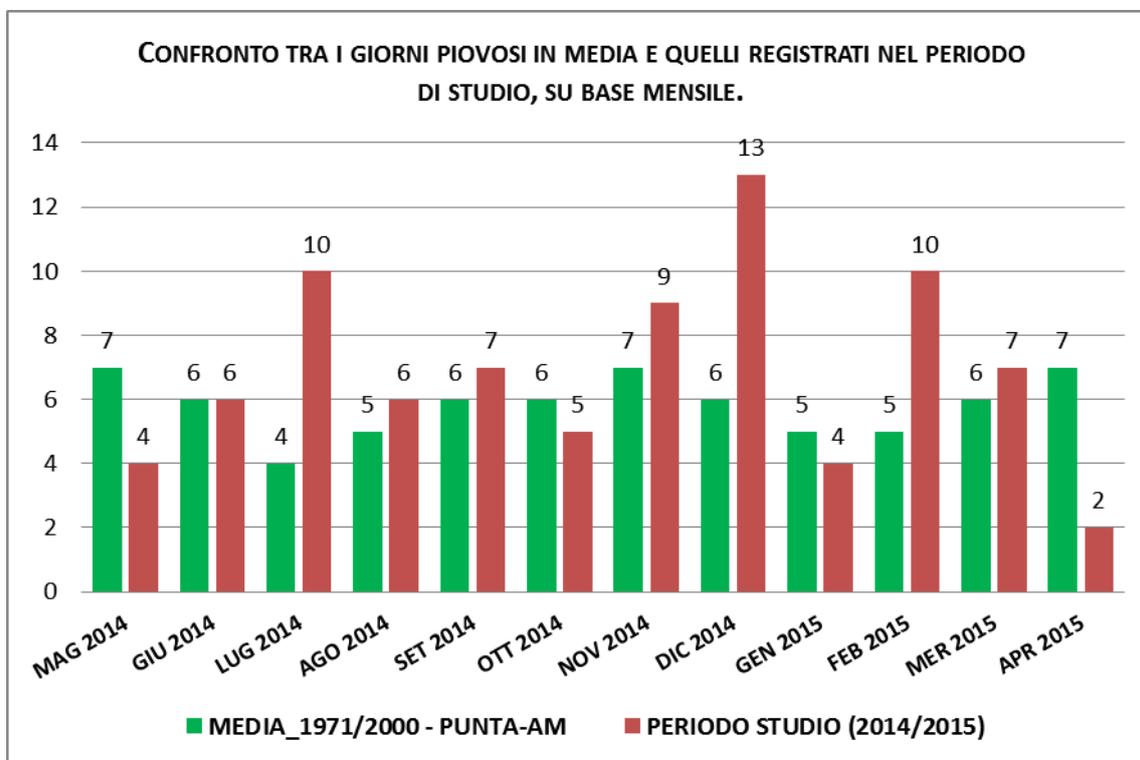


Figura 5. 7 - Confronto sui giorni piovosi su base mensile.

Le stesse analisi sono state effettuate anche per le temperature. In questo caso i dati derivano dalla stazione meteomarina di Porto Corsini (RMN-Ispra).

Tutto il periodo di studio si caratterizza per temperature medie mensili leggermente superiori alle medie storiche, ad eccezione di luglio, agosto e settembre 2014 che mostrano valori in linea o lievemente inferiori. Le temperature massime sono costantemente superiori alla media e le minime inferiori alla media. Figura 5.8.

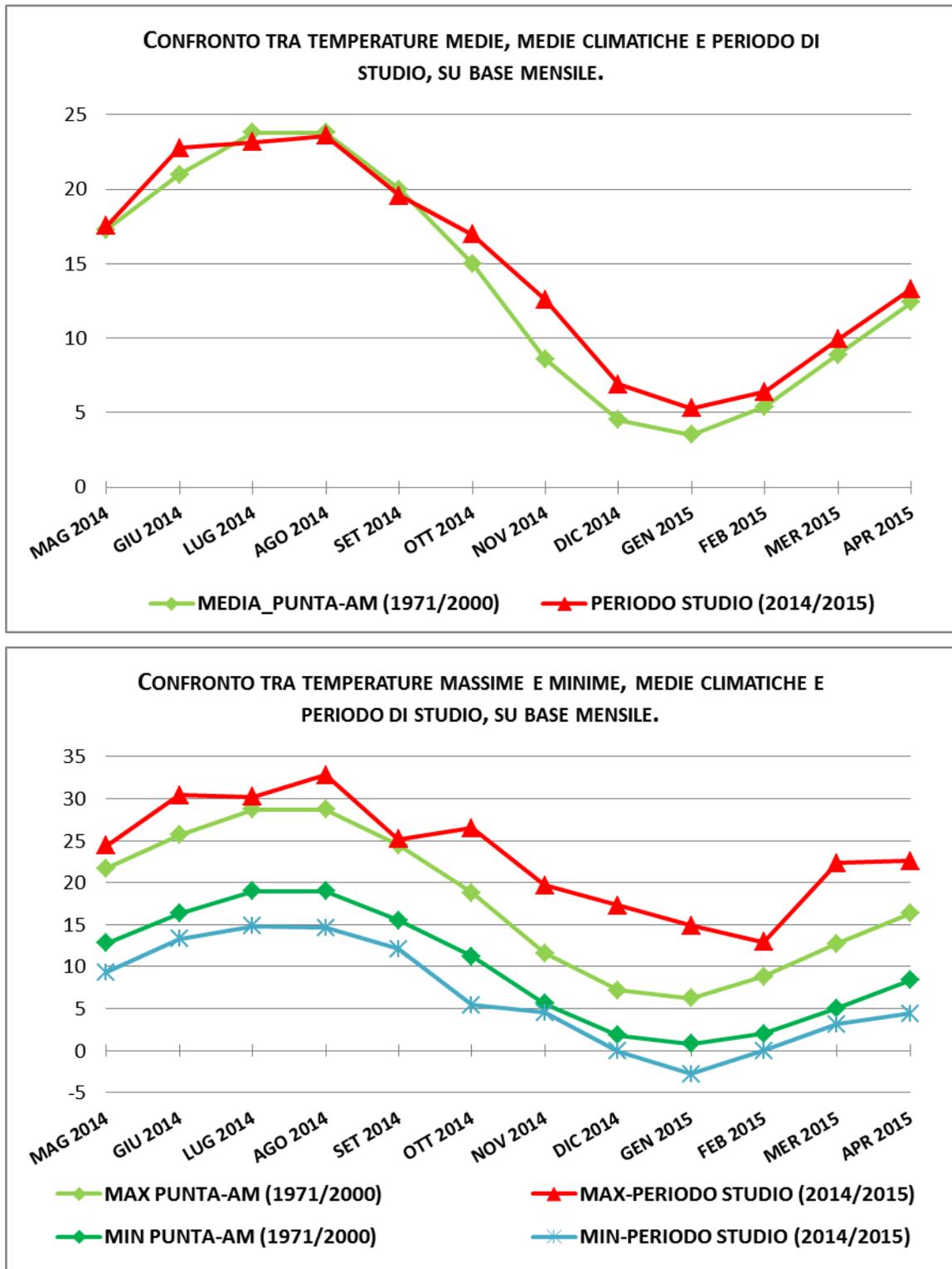


Figura 5. 8 - Sopra: confronto sulle temperature medie, su base mensile. Sotto: confronto sulle temperature massime e minime, su base mensile

Regime eolico

I dati per la caratterizzazione del regime eolico sono stati registrati dalla stazione meteorologica di Porto Corsini (RMN-Ispra); anche in questo caso sono stati confrontati il periodo di rilievo (Maggio 2014 - Aprile 2015) e le frequenze medie ottenute dall'analisi dell'intero dataset disponibile, ossia dal 1998 al 01/10/2015.

Nella Tabella 5.3 sono riportate le frequenze relative secondo le direzioni di provenienza del vento per settori di 10 gradi. Rispetto alle direzioni, non sembrano esserci particolari differenziazioni tra le medie storiche ed il periodo indagato; in generale, i venti prevalenti sono quelli provenienti a W-NW e secondariamente dal II° quadrante.

Tabella 5.3 - Confronto sulle direzioni di provenienza del vento

[°N]	MEDIA (1998/2015)	PERIODO S. (2014/2015)
≥0 - 10	1.01%	1.14%
>10 - 20	1.14%	1.25%
>20 - 30	1.26%	1.38%
>30 - 40	1.53%	1.57%
>40 - 50	1.89%	1.95%
>50 - 60	2.10%	2.88%
>60 - 70	2.13%	2.88%
>70 - 80	2.70%	2.75%
>80 - 90	2.96%	2.76%
>90 - 100	3.02%	2.89%
>100 - 110	3.15%	2.86%
>110 - 120	3.57%	3.34%
>120 - 130	3.62%	3.72%
>130 - 140	3.45%	3.76%
>140 - 150	3.42%	3.48%
>150 - 160	3.10%	3.22%
>160 - 170	2.57%	2.26%
>170 - 180	2.25%	1.76%
>180 - 190	1.72%	1.36%
>190 - 200	1.81%	1.78%
>200 - 210	1.89%	2.11%
>210 - 220	1.88%	2.13%
>220 - 230	1.84%	1.72%
>230 - 240	1.99%	1.90%
>240 - 250	2.35%	2.12%
>250 - 260	3.49%	2.57%
>260 - 270	5.41%	4.37%
>270 - 280	8.02%	7.06%
>280 - 290	7.29%	6.76%
>290 - 300	5.60%	6.17%
>300 - 310	4.00%	4.81%
>310 - 320	2.69%	3.19%
>320 - 330	1.91%	2.21%
>330 - 340	1.40%	1.69%
>340 - 350	1.03%	1.17%
>350 - 360	0.83%	1.02%
	100.00%	100.00%

Per quanto riguarda le classi di velocità, Tabella 5.4, è possibile notare come le classi più alte mostrino frequenze maggiori nel periodo di studio rispetto ai dati medi storici (1998/2015) e ciò è ancora più evidente andando a sommare le classi di velocità ≥ 7 m/s, velocità soglia per il trasporto eolico (Fabbri, 2015), che mostrano una frequenza doppia rispetto la media.

Tabella 5. 4 – Sopra: confronto tra classi di velocità; Sotto: confronto sulle velocità ≥ 7 m/s

VEL. [m/s]	≤ 0.5	≥ 0.6	≥ 4	≥ 7	≥ 10
MEDIA (1998-2015)	9.81%	63.11%	20.45%	4.53%	2.10%
PERIODO S. (2014/2015)	10.34%	51.61%	26.84%	7.35%	3.85%

VEL. [m/s]	≥ 7 m/s
MEDIA (1998-2015)	6.63%
PERIODO S. (2014/2015)	11.20%

Livello idrometrico marino.

Per quanto riguarda il livello marino (LIV), sono stati considerati i soli eventi in cui il livello ha raggiunto la soglia di allerta per i fenomeni di “acqua alta” o storm surge, cioè $LIV \geq 0.7$ m s.l.m. (Perini *et al.*, 2011)

Per il confronto sono stati utilizzati i dati del mareografo di Porto Corsini mediati su base mensile sul periodo 2000/2015.

I mesi di rilievo mostrano quindi una situazione particolare, con un numero di eventi superiore alla media ma concentrati in tre mesi (novembre, dicembre 2014 e febbraio 2015) con gli altri mesi invece con numero di eventi inferiore alla media. Tabella 5.5.

Tabella 5. 5 - Confronto sugli eventi di storm surge.

EVENTI LIV ≥ 0.7 m	MEDIA (2000/2015)	PERIODO STUDIO (2014/2015)
MAG 2014	2	0
GIU 2014	1	0
LUG 2014	1	0
AGO 2014	0	0
SET 2014	1	2
OTT 2014	3	0
NOV 2014	4	8
DIC 2014	6	7
GEN 2015	5	1
FEB 2015	5	7
MAR 2015	4	1
APR 2015	2	0
TOT	17	17

Clima ondosso e mareggiate

Per questa parte dello studio sono stati utilizzati principalmente i dati della boa ondometrica Nausicaa che però riporta diversi periodi di dati mancanti. Per sopperire alla mancanza di tali dati ne sono stati recuperati anche da altre boe:

- Venezia RON (Rete Ondometrica Nazionale), per il periodo febbraio-giugno 2014, adattati con il metodo della trasposizione dei fecht efficaci.
- Piattaforma ENI Angelina, per il periodo 2014/2015, ubicata di fronte la Foce F. Uniti. La boa misura solo l'altezza d'onda e non la direzionalità delle onde.

Il confronto sul clima ondosso è stato effettuato sui dati di Nausicaa e considerando solo il 2014 poiché per il 2015 non sono disponibili dati di direzione delle onde.

I due dataset non mostrano differenze importanti, con il moto ondosso più frequente proveniente da E, tra 80° e 110°N ed in generale dal I e dal II quadrante.

Tabella 5. 6 - Confronto sul clima ondosso.

[°N]	MEDIA (2007-2014)	PERIODO STUDIO (2014)
≥0 - 10	2.39%	2.62%
>10 - 20	2.67%	2.52%
>20 - 30	3.83%	3.59%
>30 - 40	4.21%	4.27%
>40 - 50	4.75%	4.22%
>50 - 60	6.17%	5.78%
>60 - 70	7.98%	7.36%
>70 - 80	6.11%	5.99%
>80 - 90	10.73%	9.09%
>90 - 100	14.89%	12.89%
>100 - 110	12.19%	12.98%
>110 - 120	6.88%	6.51%
>120 - 130	2.66%	3.76%
>130 - 140	1.32%	3.11%
>140 - 150	0.82%	2.51%
>150 - 160	0.48%	1.72%
>160 - 170	0.31%	1.24%
>170 - 180	0.22%	0.68%
>180 - 190	0.15%	0.31%
>190 - 200	0.14%	0.21%
>200 - 210	0.15%	0.27%
>210 - 220	0.17%	0.45%
>220 - 230	0.19%	0.27%
>230 - 240	0.19%	0.19%
>240 - 250	0.21%	0.11%
>250 - 260	0.25%	0.06%
>260 - 270	0.33%	0.13%
>270 - 280	0.39%	0.31%
>280 - 290	0.59%	0.57%
>290 - 300	0.85%	0.83%
>300 - 310	1.01%	1.00%
>310 - 320	1.04%	0.72%
>320 - 330	1.03%	0.57%
>330 - 340	1.07%	0.60%
>340 - 350	1.40%	0.89%
>350 - 360	2.21%	1.65%
	100.00%	100.00%

Per quanto riguarda le classi di altezza d'onda la scelta del dato da utilizzare è stata un po' più difficile, visti i problemi di ogni dataset a disposizione; la scelta finale è quindi ricaduta sulla boa Angelina per la vicinanza con il sito di studio.

Dal confronto sembrerebbe emergere un deficit di onde con $H_s \geq 1.5$ m per il 2014, ossia le onde considerate da mareggiata.

Tabella 5. 7 - Sopra: confronto tra classi di H_s ; Sotto: confronto sulle $H_s \geq 1.5$ m/s

Hs [m]	≤0.5	≥0.6	≥1	≥1.5	≥2	≥3
MEDIA (2007-2014)	71.91%	18.55%	5.74%	2.49%	1.15%	0.16%
PERIODO S. (2014/2015)	76.98%	16.17%	4.15%	1.60%	0.89%	0.20%

Hs [m]	Hs ≥1.5
MEDIA (2007-2014)	3.80%
PERIODO S. (2014/2015)	2.69%

In merito alle mareggiate sono state confrontate le medie su base mensile tra il dataset totale, 2007/2014, e quello relativo al periodo di rilievo. Anche in questo caso le mareggiate si sono concentrate in pochi mesi, soprattutto in dicembre 2014 e marzo 2015; di particolare rilievo la mareggiata del febbraio 2015 che ha distrutto cinque aree di rilievo su sei.

Tabella 5. 8 - Confronto sul numero di mareggiate mensili.

N°MAREGGIATE/MESE	MEDIA (2007-2014)	PERIODO STUDIO (2014/2015)
MAG 2014	2	0
GIU 2014	2	0
LUG 2014	3	0
AGO 2014	1	0
SET 2014	2	1
OTT 2014	1	0
NOV 2014	1	0
DIC 2014	1	3
GEN 2015	2	0
FEB 2015	2	1
MAR 2015	2	3
APR 2015	3	1
TOT	10	9

Tabella 5. 9 – Elenco delle mareggiate registrate nel periodo di rilievo

RILIEVO (R)	DATA	DURATA [h]	Hs_MAX	LIV ≥ 0.7
6	01/09/2014	14	3.24	-
10	28-29/12/2014	23	2.85	-
10	30/12/2014	11	2.32	-
10	31/12/2014 - 01/01/2015	15	3.20	-
12	5-6/02/2015	46	4.85	1.21
13	04-05-06-07/03/2015	57	3.77	-
13	08/03/2015	14	2.03	-
13	25-26/03/2015	19	2.52	0.73
13	05-06/04/2015	36	2.52	-

Indici Meteomarini

Dopo aver valutato le variabili meteo marine nel loro complesso, dalle stesse sono state ricavati degli *indici* sulla base di valori significativi, ciò al fine di ottenere un'informazione ridotta da poter utilizzare nelle analisi di tipo statistico.

Questi indici sono stati calcolati non più su base mensile, come nelle precedenti valutazioni, bensì negli archi temporali tra un rilievo ed il successivo.

Per la variabile precipitazioni sono stati scelti:

TP: precipitazione totale nel periodo (mm)

GP: numero di giorni piovosi nel periodo; come giorno piovoso s'intende un giorno con precipitazione totale ≥ 1 mm

Per la variabile vento sono stati scelti:

VT: ore di vento ≥ 7 m/s nei giorni secchi; sono stati esclusi i dati in concomitanza di precipitazioni e per le due ore successive.

Le ore di vento, inoltre, sono state analizzate anche per direzione di provenienza rispetto all'orientazione prevalente del tratto di costa esaminato, secondo il seguente schema, Figura 5.9.

La linea rossa rappresenta l'orientazione generale del tratto di costa in esame, 350° - 170° .

A partire da questo dato sono stati considerati:

- **Venti Onshore**, i venti provenienti dalle direzioni di $\pm 60^\circ$ dalla normale a costa (Arens *et al.*, 1995), ossia 20° - 140° . Settore azzurro in Figura 5.9
- **Venti Onshore Obliqui**, 0° - 20° e 140° - 160° . Settore verde in Figura 5.9
- **Venti Alongshore**, $\pm 10^\circ$ rispetto l'orientazione della costa, 160° - 180° e 340° - 0° . Settore in giallo in Figura 5.9
- **Venti Offshore + Offshore Obliqui**, sono stati considerati insieme e sommati. i primi sono i venti provenienti dal settore opposto agli Onshore, 200° - 320° ; i secondi sono i venti Offshore obliqui, 180° - 200° e 320° - 340° . Settore bianco in Figura 5.9

Infine sia i venti Obliqui che gli Alongshore sono stati ulteriormente divisi nelle due direzioni principali, da Nord e da Sud.

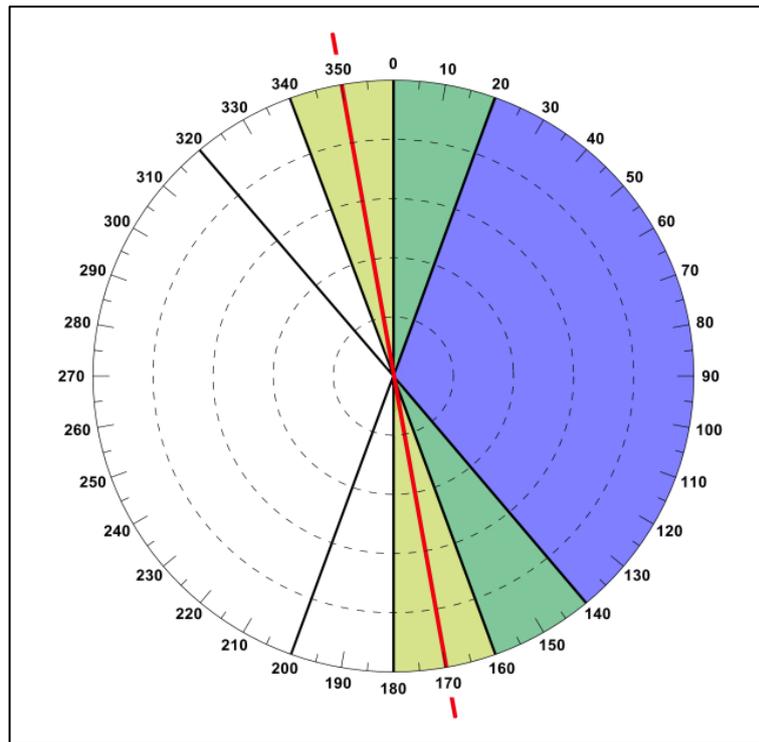


Figura 5. 9 - Denominazione dei venti in base alla direzione di provenienza rispetto l'orientazione generale della costa in esame.

Quindi procedendo da nord sono stati considerati i seguenti indici:

V.AL_N: ore di vento Alongshore da N

V.OB_N: ore di vento Obliqui Onshore da N

V.ON: ore di vento diretti Onshore

V.OB_S: ore di vento Obliqui Onshore da S

V.AL_S: ore di vento Alongshore da S

V.OFF: ore di vento Offshore, sia diretti che Obliqui da N e da S.

Per il livello idrometrico marino/storm surge sono stati utilizzati:

STO: il numero di eventi storm surge, ossia $LIV \geq 0.7$ m s.l.m.

STOh: ore totali d'innalzamento del livello marino ≥ 0.7 m

Per le onde marine/mareggiate:

MAR: numero eventi mareggiata, $H_s \geq 1.5$ m per 6 ore consecutive

MARh: ore totali con $H_s \geq 1.5$ m

Nella Tabella 5.10 sono elencati tutti i parametri appena descritti con i relativi valori.

Tabella 5. 10 - Riepilogo degli Indici meteo marini per ogni periodo intercorso tra i rilievi. La stessa Tabella è stata qui divisa in due set di dati per una migliore leggibilità.

PERIODO (C)	VT	V.OB_N	V.ON	V.OB_S	V.AL_N	V.OFF	V.AL_S
C1	49	0	21	9	3	16	0
C2	39	1	34	3	1	0	0
C3	50	0	35	8	5	1	0
C4	19	1	2	3	0	12	0
C5	35	1	11	10	3	9	0
C6	42	13	22	2	1	2	2
C7	22	0	13	7	2	0	0
C8	77	1	16	29	14	17	1
C9	45	0	29	8	1	7	0
C10	53	0	35	3	1	13	0
C11	35	0	19	1	2	11	1

PERIODO (C)	PT	GP	STO	STOh	MAR	MARh
C1	3	1	0	0	0	0
C2	49	5	0	0	0	0
C3	25	5	0	0	0	0
C4	50	7	0	0	0	0
C5	88	6	0	0	0	1
C6	39	7	1	0	1	19
C7	26	5	1	1	0	4
C8	83	6	4	4	0	1
C9	90	12	11	19	0	14
C10	34	6	0	0	3	65
C11	13	5	2	5	0	8

Quello che è possibile notare ad una valutazione immediata è che :

- i primi cinque periodi (C1-C5), intercorsi tra i rilievi primaverili/estivi, sono stati sostanzialmente quieti dal punto di vista marino, nessuna mareggiata e surge
- le condizioni meteo accorse nei primi tre periodi (C1-C3) sono state particolarmente favorevoli con piovosità nella media o inferiore e molte ore di venti onshore
- al contrario, C4 e C5 si sono caratterizzati per l'elevata piovosità, ben oltre la media, non tanto come giorni piovosi ma come mm totali di pioggia; di conseguenza le ore di venti secchi risultano minori rispetto ai periodi precedenti e sono distribuite in modo variabile senza una direzione prevalente.
- I periodi successivi (C6-C11), intercorsi tra i rilievi autunnali/invernali, si caratterizzano per un numero variabile di mareggiate e surge, mai contemporanei; il numero di ore di venti secchi è variabile e risulta comunque alto nonostante l'elevata piovosità (C8), mostrando oltretutto come direzione preferenziale quella onshore.

Allo scopo di indagare sulle relazioni tra variabili meteo, è stata eseguita un'analisi PCA sul precedente dataset. L'analisi riporta che le prime due componenti spiegano il 49% della variabilità totale espressa nel dataset, in sostanza il modello spiega solo la metà della variabilità esistente, Tabella 5.11.

Tabella 5. 11 – Importanza delle componenti della matrice delle variabili meteo.

	PC1	PC2	PC3	PC4
<i>Eigenvalue</i>	3.6036	2.7813	2.4526	1.8541
<i>Proportion Explained</i>	0.2772	0.2139	0.1887	0.1426
<i>Cumulative Proportion</i>	0.2772	0.4911	0.6798	0.8224

La Figura 5.10 mostra il risultato grafico dell'analisi PCA, denominato biplot; a sinistra il cerchio definisce la lunghezza del vettore per la quale il contributo alla variabilità è uguale per tutte le dimensioni dello spazio PCA., quindi le variabili con vettori più lunghi danno un contributo maggiore della media e possono essere interpretate con elevata confidenza; in questo caso sono GP, STO, STO_h, V.OB_S, V.AL_N.

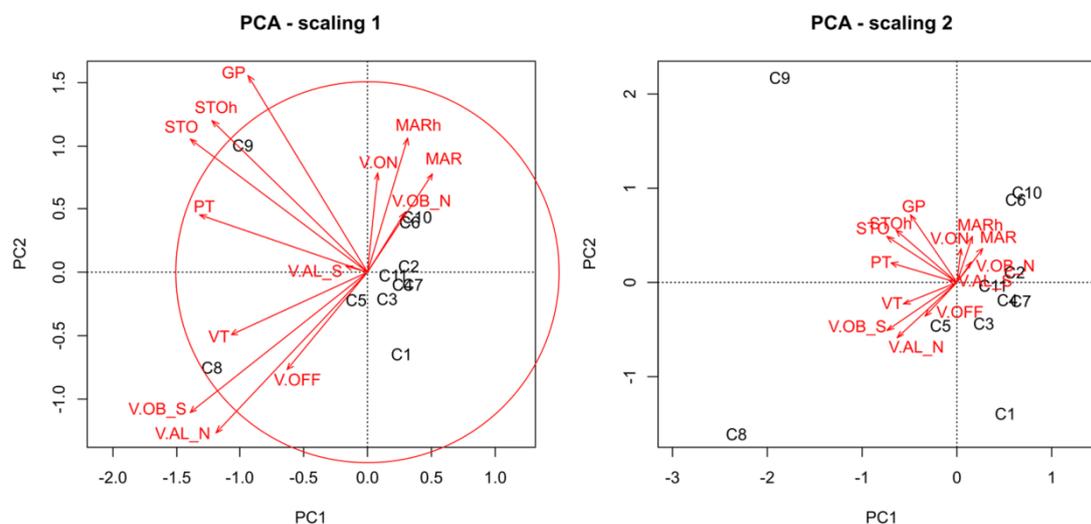


Figura 5. 10 - Biplot dell'analisi PCA effettuata sugli Indici meteo marini relativi ad ogni periodo tra rilievi successivi.

Le relazioni oggetti-vettori (periodi-variabili) evidenziano che:

- C8 è il periodo con le frequenze maggiori di venti secchi (VT)
- C9 è il periodo in cui si verificano il maggior numero gli storm surge (STO)
- C10 è il periodo in cui si verificano il maggior numero di mareggiate (MAR) e venti obliqui da Nord (V.OB_N)
- il numero di surge (STO) e le ore di surge (STO_h) sono entrambi correlati positivamente con i giorni di pioggia (GP) e con la pioggia totale (PT)
- Il numero di mareggiate (MAR) e le ore di onda ≥ 1.5 (MAR_h) sono correlati positivamente con i venti V.ON e V.OB_N; queste quattro variabili sono a loro volta correlate negativamente con i VT, V.OFF, V.OB_S, V.AL_N.
- i venti AL_S non hanno alcun ruolo.

5.4.2 Dinamica geomorfologica

I rilievi geomorfologici sono stati eseguiti secondo la procedura descritta al paragrafo 5.3.1.

A partire dal 5 maggio 2014 sono state effettuate 12 giornate di rilievo, durante le quali sono state rilevate le sei aree di studio per un totale di 72 rilievi fotogrammetrici, ognuno dei quali costituito di circa 250 foto.

Ogni set di foto è stato quindi sottoposto alla procedura di post-processing descritta al paragrafo 5.3.1 per ottenere una *dense PC* ottimizzata sulle misure reali, Figura 5.11.

Le nuvole di punti della stessa area e riferite a rilievi successivi nel tempo sono state quindi comparate tramite il software open source *Cloud Compare 2.6.2*, che ne restituisce le differenze sull'asse *Z* delle altezze, una differenza topografica. L'insieme dei valori delle differenze è stato quindi classificato in classi d'incrementi e diminuzioni di *Z*, andando a definire aree di *accumulo*, *stabilità* ed *erosione* (Figura 5.12), dove la classe stabilità corrisponde al range d'errore stimato. In totale sono stati effettuati 61 confronti (C) e non 66 (11 confronti x 6 plot) poiché in cinque casi non è stato possibile sovrapporre le PC a causa dello scollamento fisico dei target. In questi casi si è proceduto al riposizionamento degli stessi in posizione simile, per quanto possibile, le misure di distanza sono state aggiornate ed è stato eseguito il consueto rilievo fotogrammetrico. Tale operazione ha reso possibile la continuazione del monitoraggio ma ovviamente non ha risolto il problema della comparazione tra PC pre e post "ricollozione target".

Indubbiamente questo è stato uno dei limiti maggiori della fase di monitoraggio ed in futuro bisognerà pensare a nuovi metodi di ancoraggio dei target.

Prima della comparazione, ogni PC è stata sottoposta ad una fase di lieve filtraggio/correzione tramite il software Geomagic, fase che comunque non ha previsto l'eliminazione della vegetazione poiché nei tentativi preliminari si è valutato che tale passaggio implicava la perdita di troppa informazione, rendendo vano tutto il lavoro precedente. Si è deciso quindi di mantenere le PC quasi originali nel confronto e di eliminare la vegetazione solo successivamente, dove possibile, in modo da ottenere le sole misure legate ai veri e propri cambiamenti della topografia. Ovviamente ciò porta con sé il problema che le differenze topografiche che leggiamo possono, anche se in minima parte, essere ricondotte anche alla vegetazione e questo problema è chiaramente un punto da approfondire, non risolto in tale studio.

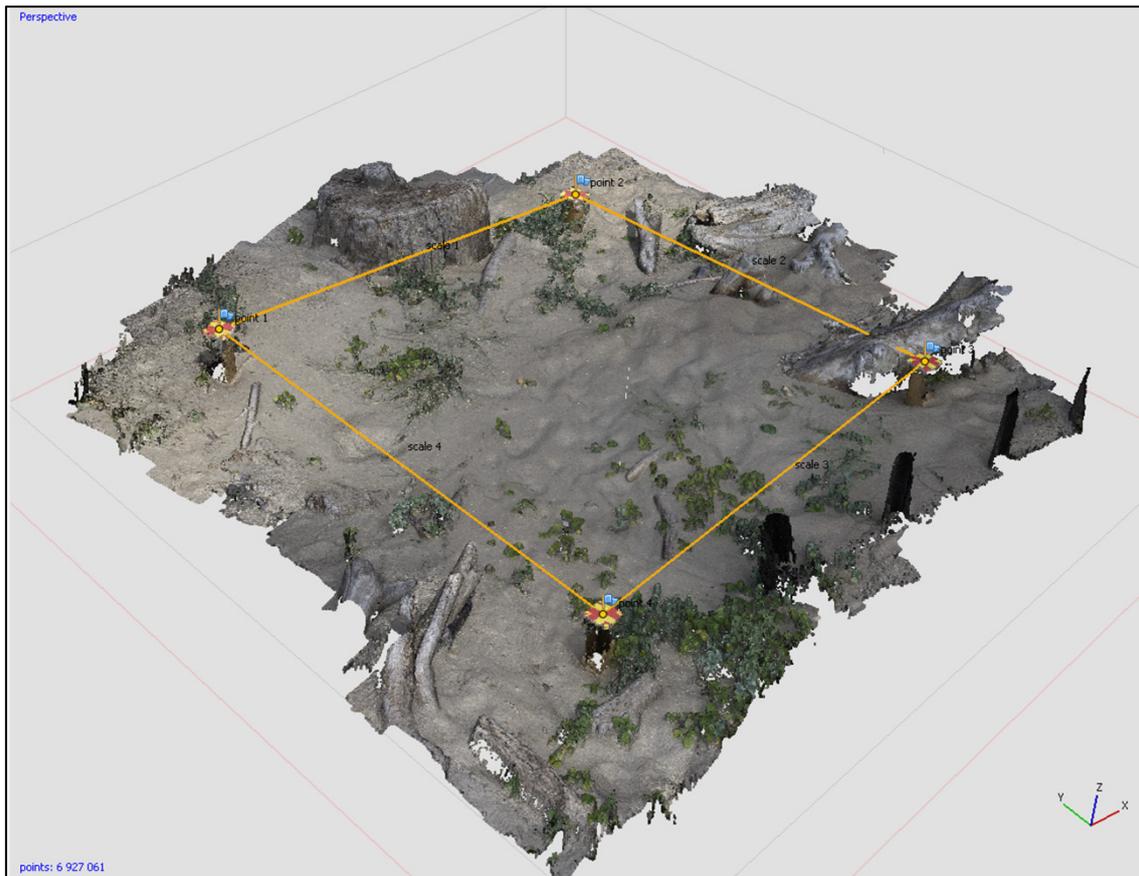


Figura 5. 11 - *Dense PC* per l'area BS1. Le linee gialle rappresentano le *Scale-bar*, cioè le distanze tra targets misurate in campo ed inserite nel modello.

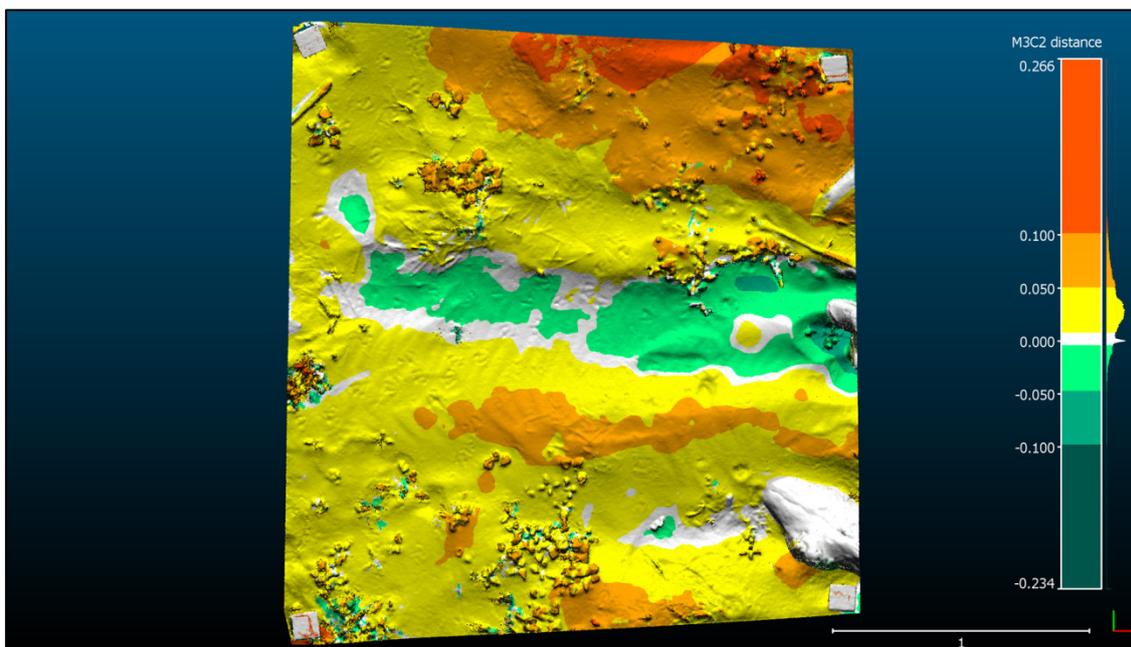


Figura 5. 12 - Confronto tra due nuvole di punti per l'area BS1. In questo caso, tra un rilievo ed il successivo si registra un innalzamento delle topografia generalizzato, variabile circa tra 0.5 - 6 cm (aree giallo/arancio/rosso); l'area in verde centrale mostra un locale abbassamento, tra -0.5 e -2 cm.

Operazione fondamentale e preliminare alla classificazione è stata la valutazione dell'errore complessivo associato alle varie operazioni di misura e trasformazione delle PC.

La Tabella 5.12 riassume per ogni area di studio gli errori mediati su tutte le PC e per tipo di operazione.

Tabella 5. 12 - Errori medi per ogni fase di elaborazione e totale

[m]	ERR misura	Scale error (med)	RSM-POINTPAIR (med)	ERRORE TOT. medio
BN1	0.0005	0.0025	0.0014	0.004
BN2	0.0005	0.0018	0.0020	0.004
BN3	0.0005	0.0023	0.0016	0.004
BS1	0.0005	0.0035	0.0015	0.005
BS2	0.0005	0.0018	0.0021	0.004
BS3	0.0005	0.0010	0.0014	0.003

L'errore totale, mediato su tutte le PC per la stessa area, è il risultato di tre tipologie d'errore derivati da altrettante operazioni:

- *ERR misura*, deriva dalla lettura delle misure delle distanze tra target in campo, misure utilizzate in fase di ottimizzazione della nuvola stessa
- *Scale error (med)*, deriva dall'ottimizzazione delle PC sulle misure reali
- *RSM-Pointpair (med)*, deriva dalla fase di allineamento delle due nuvole una sull'altra per il confronto.

Queste tre misure sono state mediate per ogni area ed infine sommate (ERRORE TOT. Medio in Tabella 5.12). Non è stato considerato l'errore generato dall'assestamento dei paletti nella sabbia.

Al fine di ottenere un'unica classificazione coerente per tutte le aree e per le valutazioni sui cambiamenti geomorfologici è stato adottato come errore medio generale ± 0.005 m, il maggiore tra quelli appurati.

Nella Tabella 5.13 sono stati riassunti i risultati delle operazioni di confronto, suddivise per i sei diversi plots e per confronti successivi (C). Le classi utilizzate sono cinque: una centrale per la classe Stabilità/Errore (± 5 mm), due classi positive per gli incrementi di quota, fino a 5 cm e oltre i 5 cm, due classi negative per le diminuzioni di quota, fino a -5 cm e oltre i -5 cm.

I valori riportati sono le estensioni in m² delle aree relative ad ogni classe. Si è deciso di riportare le aree assolute invece che le percentuali poiché i diversi plot hanno aree leggermente diverse, Tabella 5.1, per cui le percentuali non sono idonee ad una valutazione comparata.

Gli stessi dati di Tabella 5.13 vengono poi proposti in formato d'istogramma (Figura 5.13).

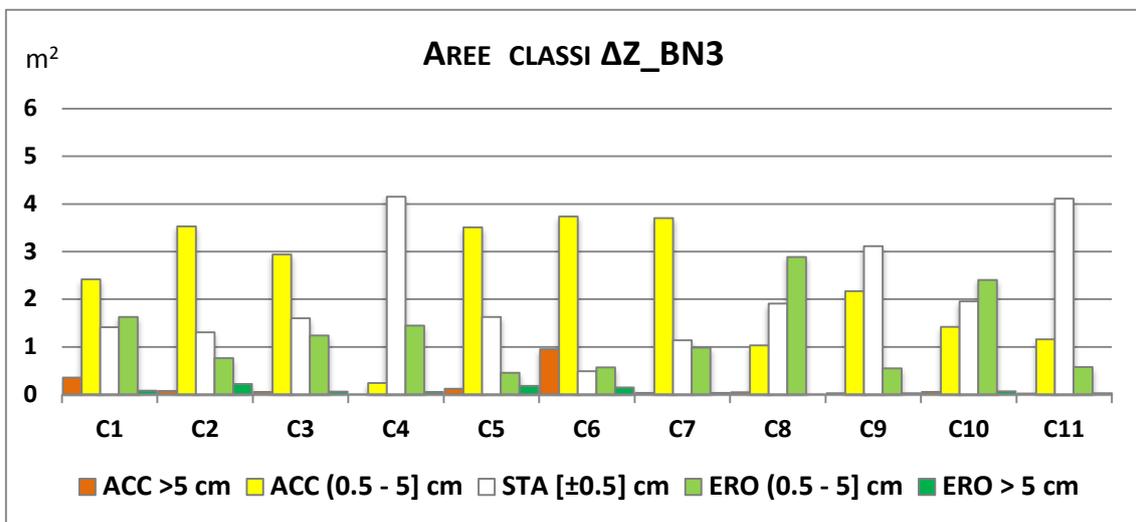
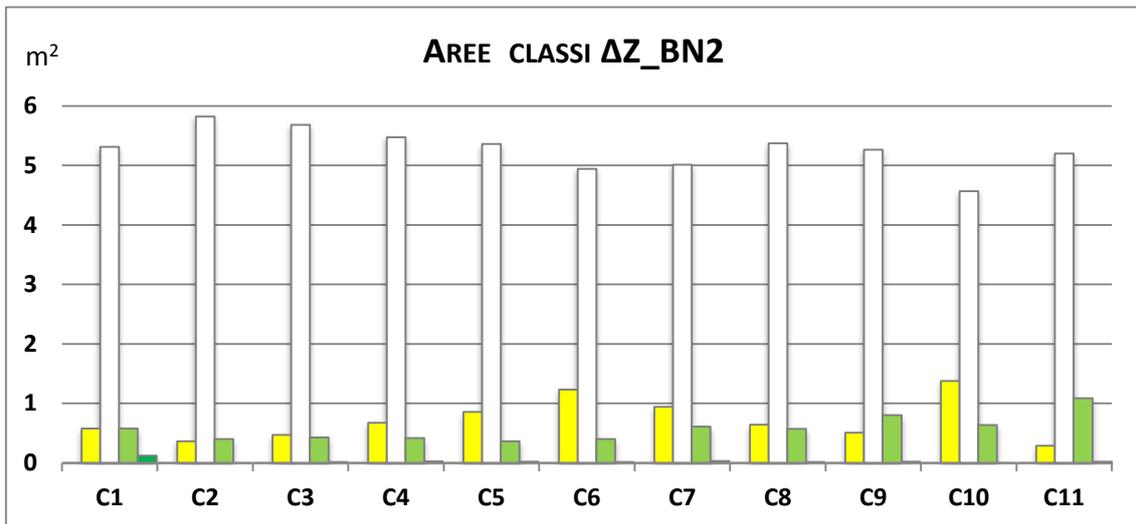
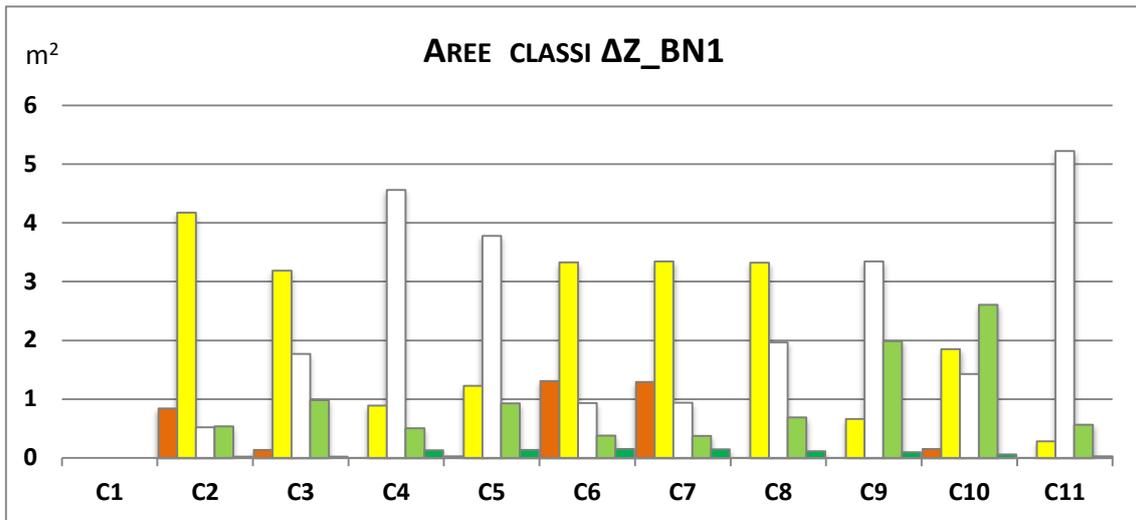
Tabella 5. 13 - Valori in m² per le classi di accumulo- stabilità- erosione, evidenziate rispettivamente in arancio, bianco e verde, per ogni plot e per ogni confronto (C) tra rilievi successivi.

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
BN1	[> 0.05]	-	0.84	0.14	0.01	0.03	1.31	1.29	0.01	0.00	0.15	0.00
	[0.005 - 0.05]	-	4.17	3.19	0.89	1.23	3.33	3.35	3.32	0.66	1.85	0.28
	[-0.005 - 0.005]	-	0.52	1.77	4.56	3.78	0.93	0.94	1.97	3.35	1.43	5.22
	- [0.005 - 0.05]	-	0.54	0.98	0.51	0.93	0.38	0.38	0.69	1.99	2.61	0.56
	[< -0.05]	-	0.02	0.02	0.13	0.14	0.15	0.14	0.11	0.10	0.06	0.03
BN2	[> 0.05]	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	[0.005 - 0.05]	0.58	0.37	0.47	0.68	0.86	1.24	0.94	0.64	0.51	1.38	0.29
	[-0.005 - 0.005]	5.31	5.82	5.68	5.48	5.36	4.94	5.01	5.37	5.26	4.57	5.20
	- [0.005 - 0.05]	0.58	0.40	0.43	0.42	0.36	0.40	0.61	0.57	0.80	0.64	1.09
	[< -0.05]	0.12	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02
BN3	[> 0.05]	0.36	0.08	0.05	0.00	0.12	0.95	0.04	0.05	0.03	0.05	0.02
	[0.005 - 0.05]	2.42	3.53	2.94	0.24	3.51	3.74	3.70	1.04	2.17	1.42	1.16
	[-0.005 - 0.005]	1.42	1.31	1.60	4.15	1.63	0.49	1.14	1.91	3.12	1.95	4.11
	- [0.005 - 0.05]	1.63	0.76	1.24	1.45	0.46	0.57	0.98	2.89	0.55	2.40	0.57
	[< -0.05]	0.08	0.22	0.06	0.06	0.18	0.15	0.04	0.02	0.03	0.07	0.03
BS1	[> 0.05]	0.39	1.17	0.50	0.00	-	0.28	0.64	0.00	0.02	0.33	0.00
	[0.005 - 0.05]	3.14	2.80	2.63	0.90	-	3.05	2.62	1.14	3.27	2.26	2.01
	[-0.005 - 0.005]	1.04	0.43	1.12	3.13	-	1.01	0.68	2.89	1.32	0.89	2.28
	- [0.005 - 0.05]	0.32	0.48	0.65	0.77	-	0.35	0.81	0.82	0.24	1.39	0.60
	[< -0.05]	0.02	0.03	0.01	0.10	-	0.22	0.15	0.05	0.05	0.03	0.01
BS2	[> 0.05]	0.27	0.54	0.19	-	0.01	-	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	[0.005 - 0.05]	4.18	4.07	3.88	-	0.65	-	3.46	0.70	2.81	0.94	0.25
	[-0.005 - 0.005]	0.82	0.72	1.13	-	4.94	-	1.79	1.67	3.08	1.04	5.61
	- [0.005 - 0.05]	0.92	0.86	0.99	-	0.37	-	0.73	3.72	0.25	4.18	0.31
	[< -0.05]	0.01	0.02	0.02	-	0.23	-	0.19	0.10	0.06	0.04	0.03
BS3	[> 0.05]	0.00	-	0.01	0.00	0.00	0.22	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00
	[0.005 - 0.05]	1.46	-	1.35	0.21	1.64	3.23	2.21	2.79	2.82	0.15	0.93
	[-0.005 - 0.005]	3.24	-	1.55	5.43	3.64	1.06	2.62	1.37	2.01	0.30	4.61
	- [0.005 - 0.05]	1.29	-	3.09	0.35	0.72	1.47	1.17	1.69	1.10	5.08	0.45
	[< -0.05]	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.12	0.00	0.47	0.01

Ad una prima valutazione, sia della Tabella 5.13 che dei grafici in Figura 5.13, si può immediatamente osservare che i valori relativi alle due classi estreme sono esigui rispetto alle tre centrali. Andando quindi ad analizzare i range di differenza topografica evidenziati nelle singole comparazioni, si può osservare che gli accumuli presentano valori di quota maggiori di 5cm in 20 comparazioni su 61 totali (considerando solo aree $\geq 1\%$) che scendono a 12 se consideriamo solo le aree maggiori del 5%; in tre casi le aree con accumuli $\geq 5\text{cm}$ hanno superato il 20 % nei plot BN1 e BS1, proprio in quest'ultimo caso (Figura 5.12) sono state identificate anche elevazioni maggiori di 10 cm sul 3% dell'area.

Nel caso delle aree di erosione si ritrova una condizione simile ma con valori minori in assoluto. Le aree con diminuzioni di quota maggiori de 5 cm sono state identificate in 16 confronti sui 61 totali (area $\geq 1\%$), in questo caso però al contrario del precedente tali valori sono davvero molto bassi, infatti se si considerano solo aree maggiori al 5 % troviamo solo un caso (C10-BS3).

Dopo tali valutazioni, si è deciso quindi di ridurre le classi da cinque a tre, andando semplicemente ad accorpare i valori delle due classi di accumulo in una sola, idem per le classi di erosione, ottenendo un livello d'informazione simile ma di più semplice gestione e valutazione.



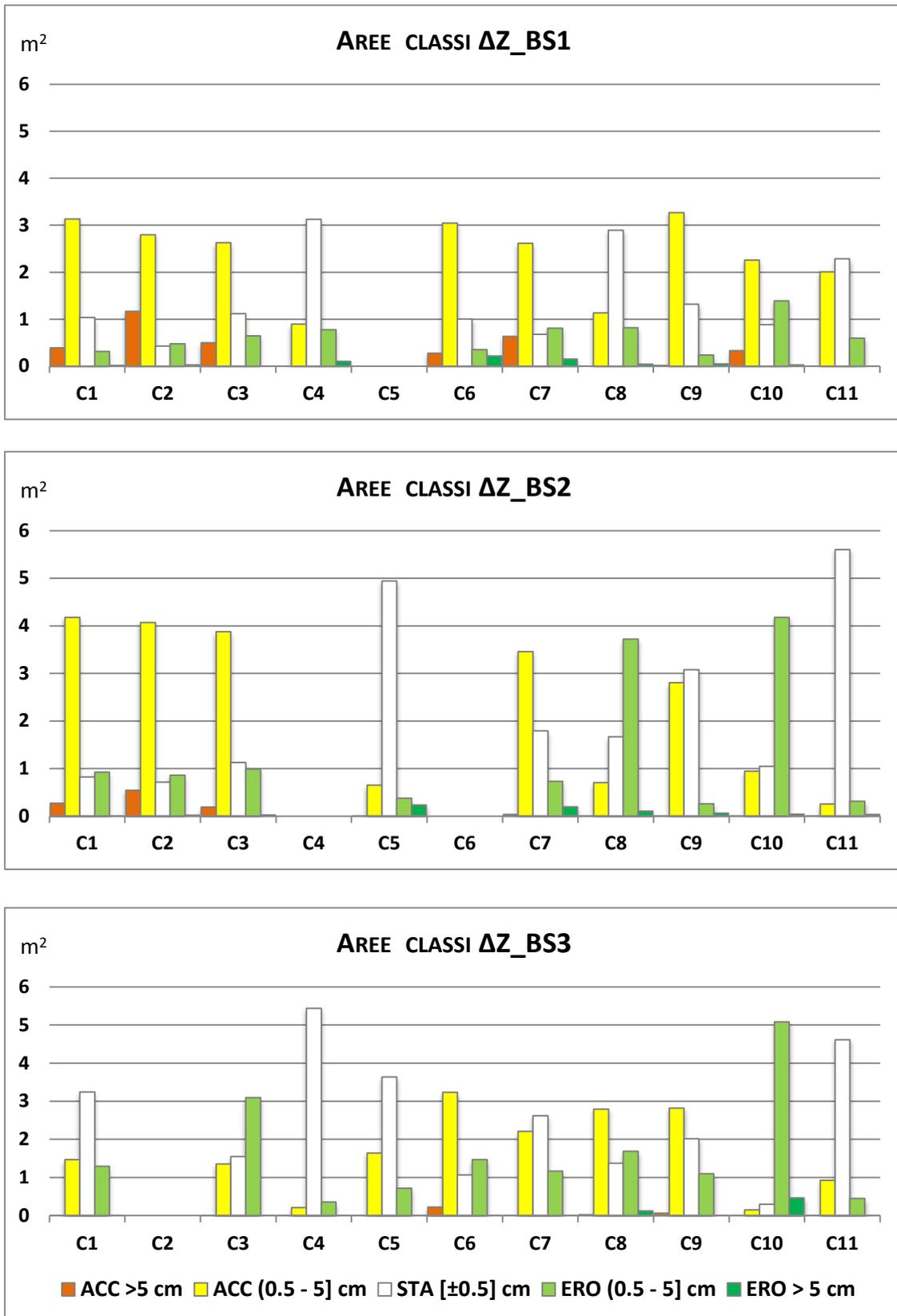
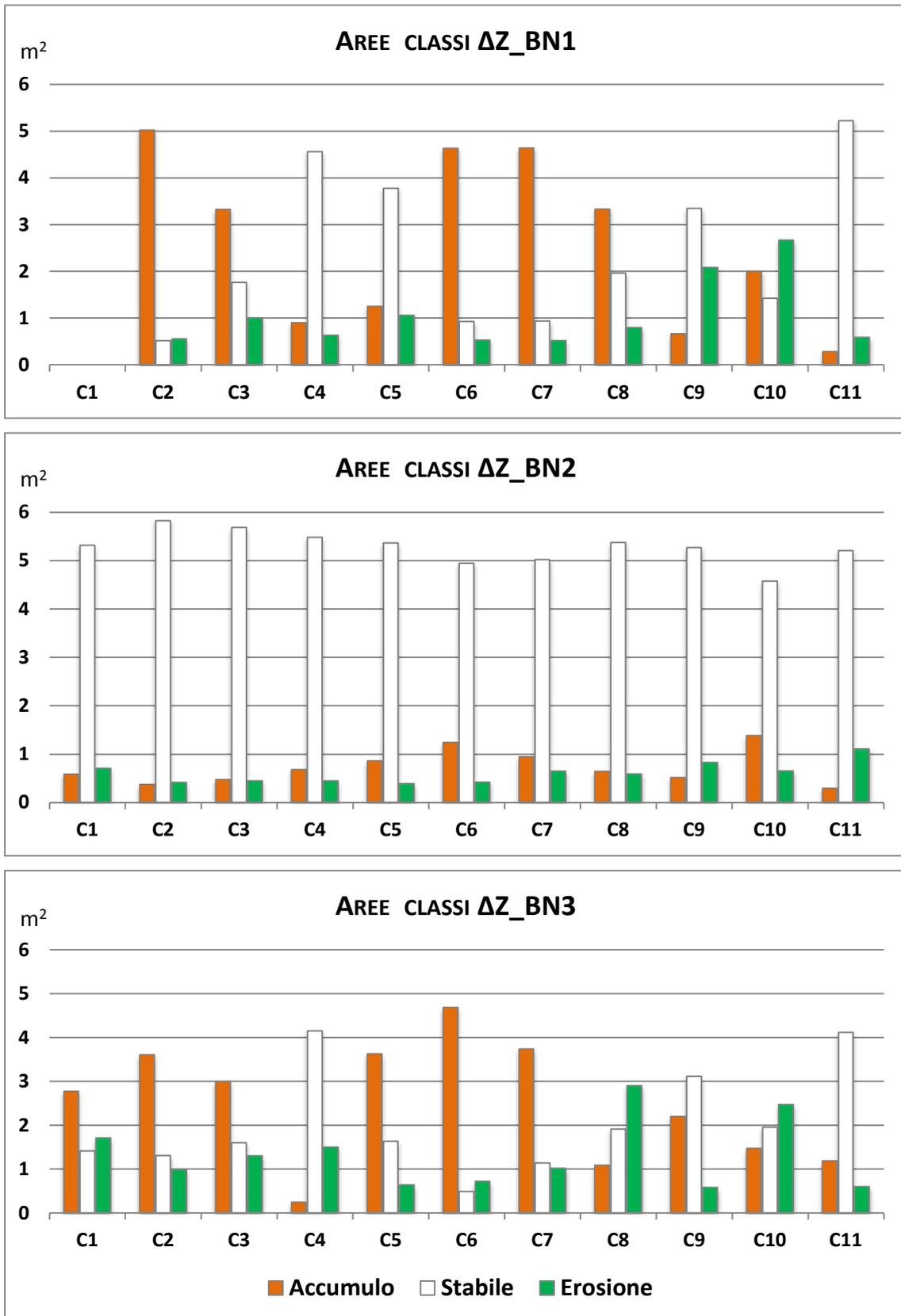


Figura 5. 13 - Valori in m² raggruppati per plot e suddivisi in cinque classi: due per Accumulo (≤5cm, >5 cm), una per Stabilità (±0.5cm), due per Erosione (≤5cm, >5cm).

Di seguito, Figura 5.14, gli stessi dati rappresentati con tre classi (accumulo-stabilità-erosione).



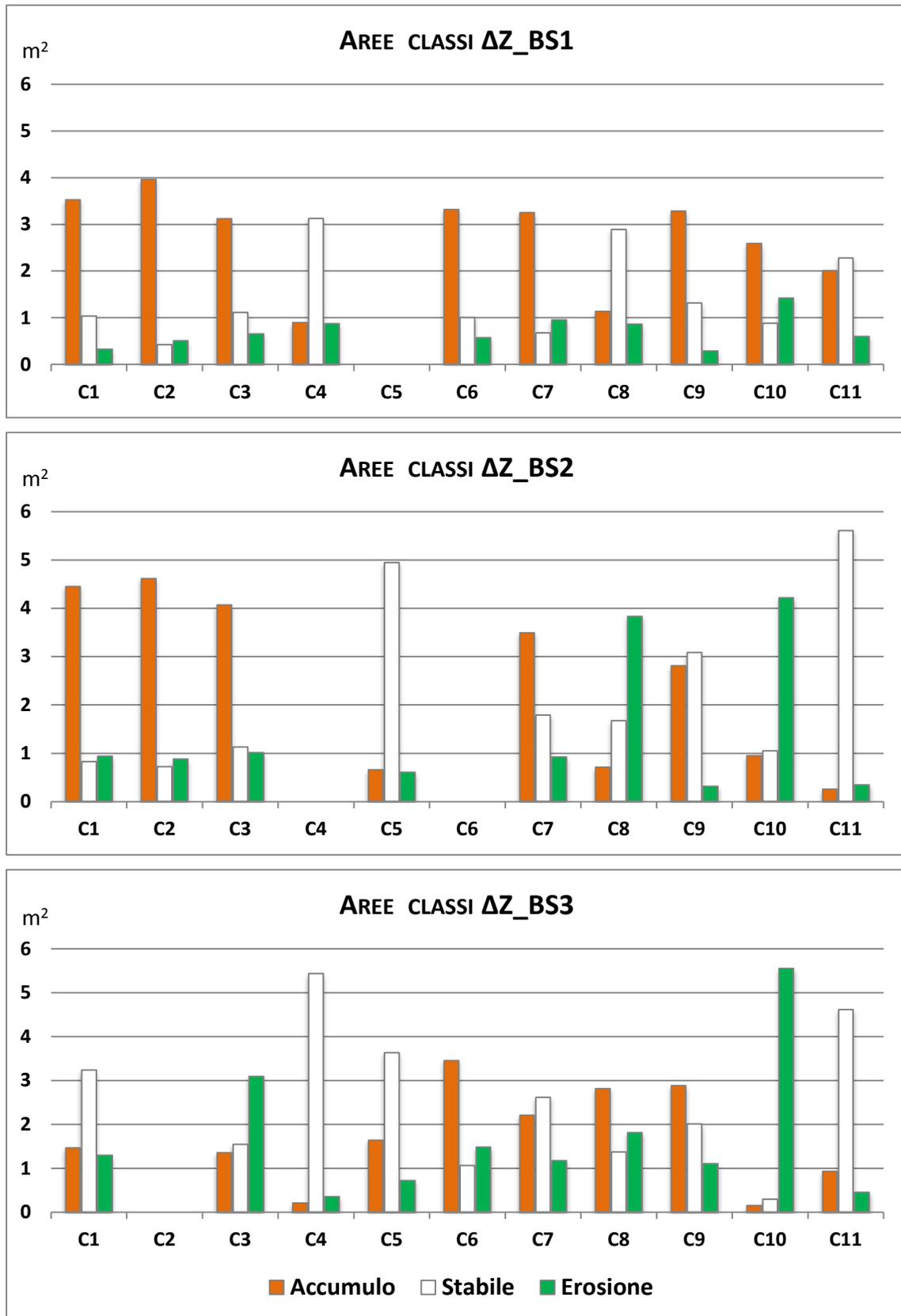


Figura 5. 14 - Valori in m^2 per le classi di Accumulo- Stabilità- Erosione, raggruppati per plot.

Ciò che si può immediatamente evidenziare è che i patterns di sedimentazione/erosione non sono mai univoci, tutta sedimentazione o tutta erosione, ma l'evoluzione di ogni area risulta piuttosto complessa. Ciò nonostante sono evidenziabili dei trend generali:

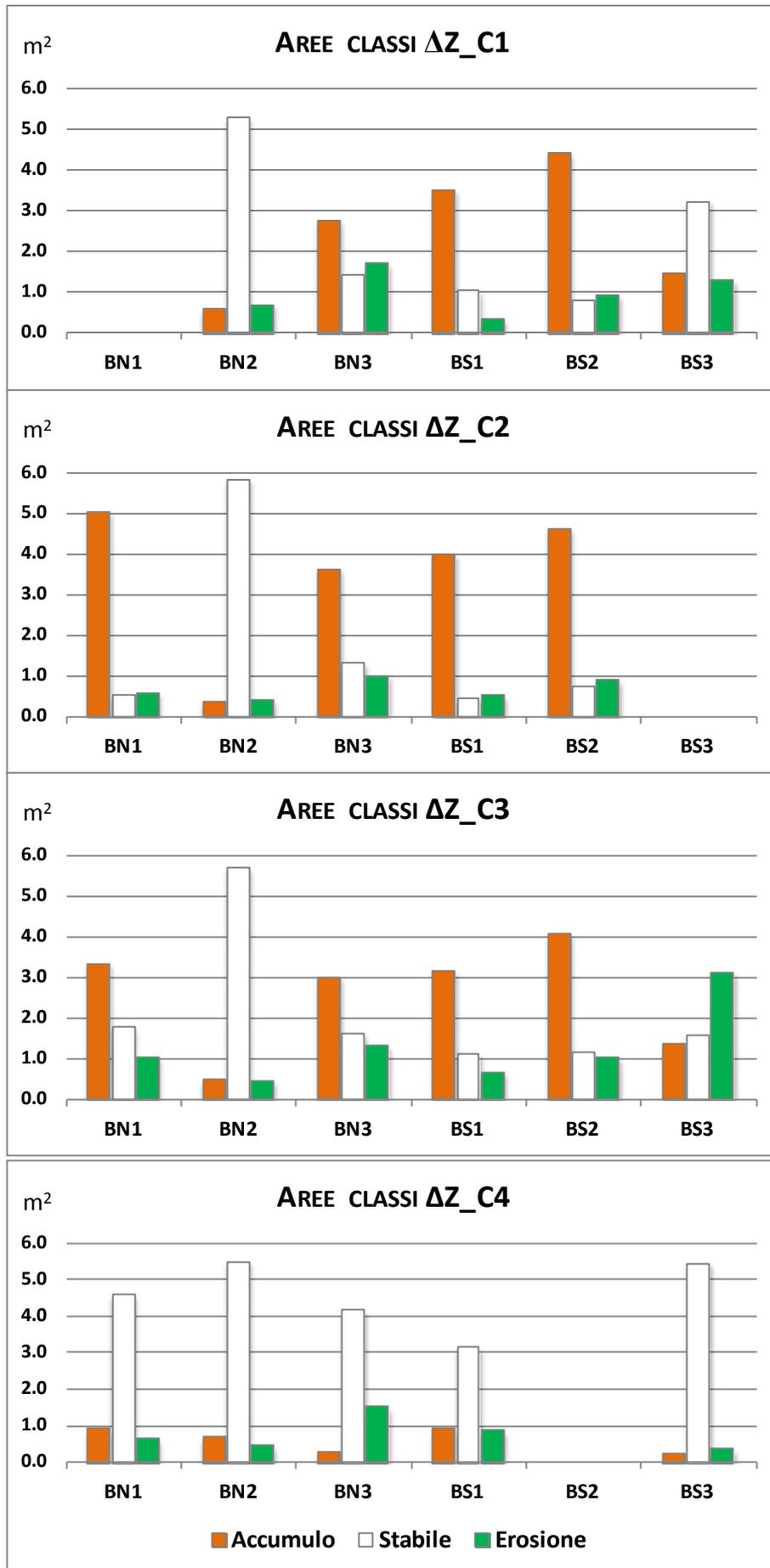
Il plot BN2 mostra piccole aree dinamiche ed una costante stabilità.

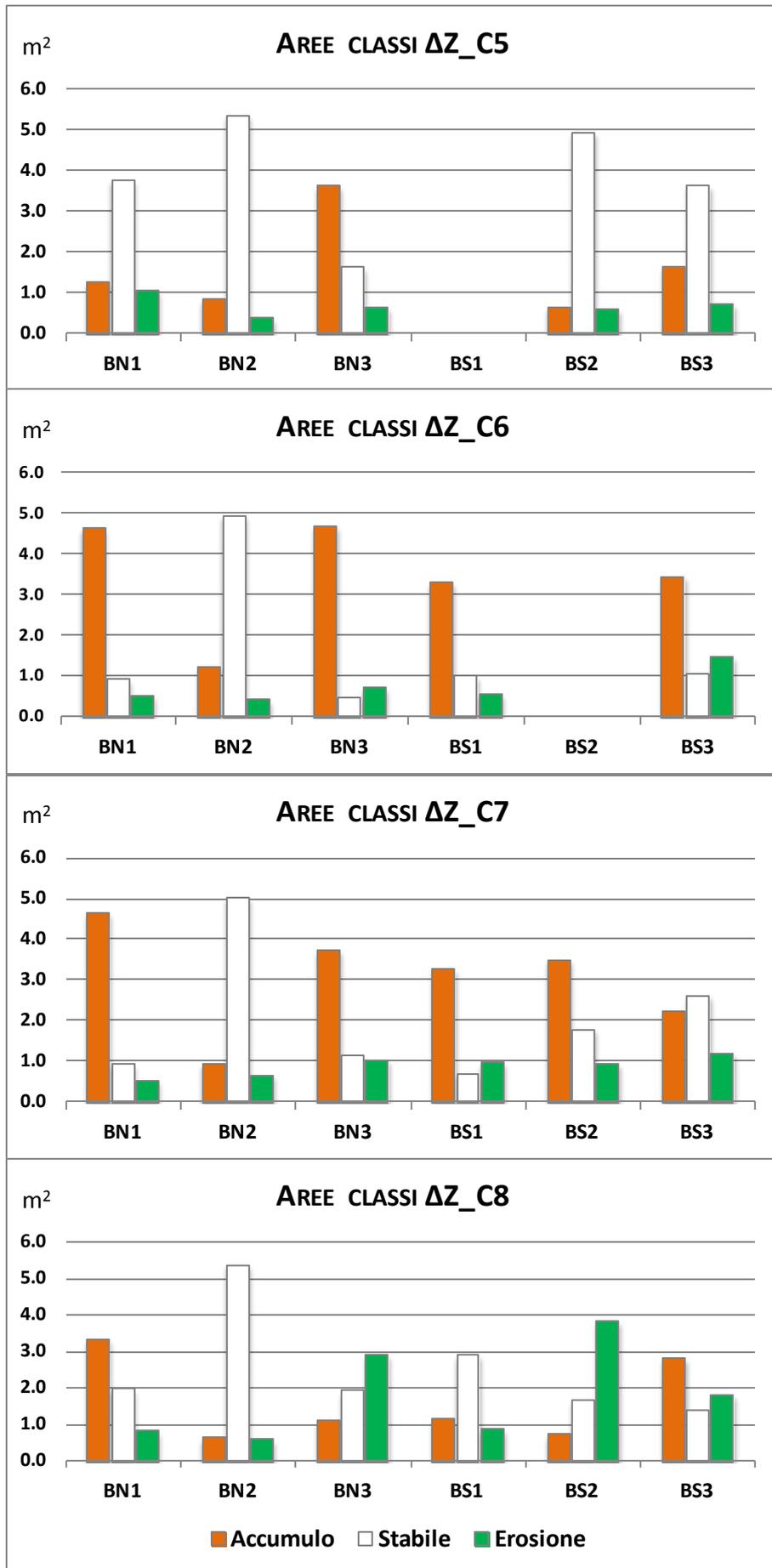
BN3, BS1 e BS2 mostrano, con valori diversi, elevate aree di sedimentazione in tutti i confronti tendenzialmente maggiori nei confronti iniziali e/o centrali; sono sempre presenti delle aree di erosione che tendenzialmente aumentano negli ultimi confronti.

BS3 è l'area in cui si osservano i minori accumuli e le maggiori superfici d'erosione, anche nei primi confronti.

Infine, gli stessi dati vengono riportati in ordine temporale, quindi secondo confronti successivi (C), in Figura 5.15. Anche in questo caso è possibile fare delle valutazioni di massima:

- nei confronti C4, C5, e C11 predominano aree di stabilità
- i confronti C2, C6, C7 riportano le maggiori aree di sedimentazione
- il confronto C10 si caratterizza per una generale erosione





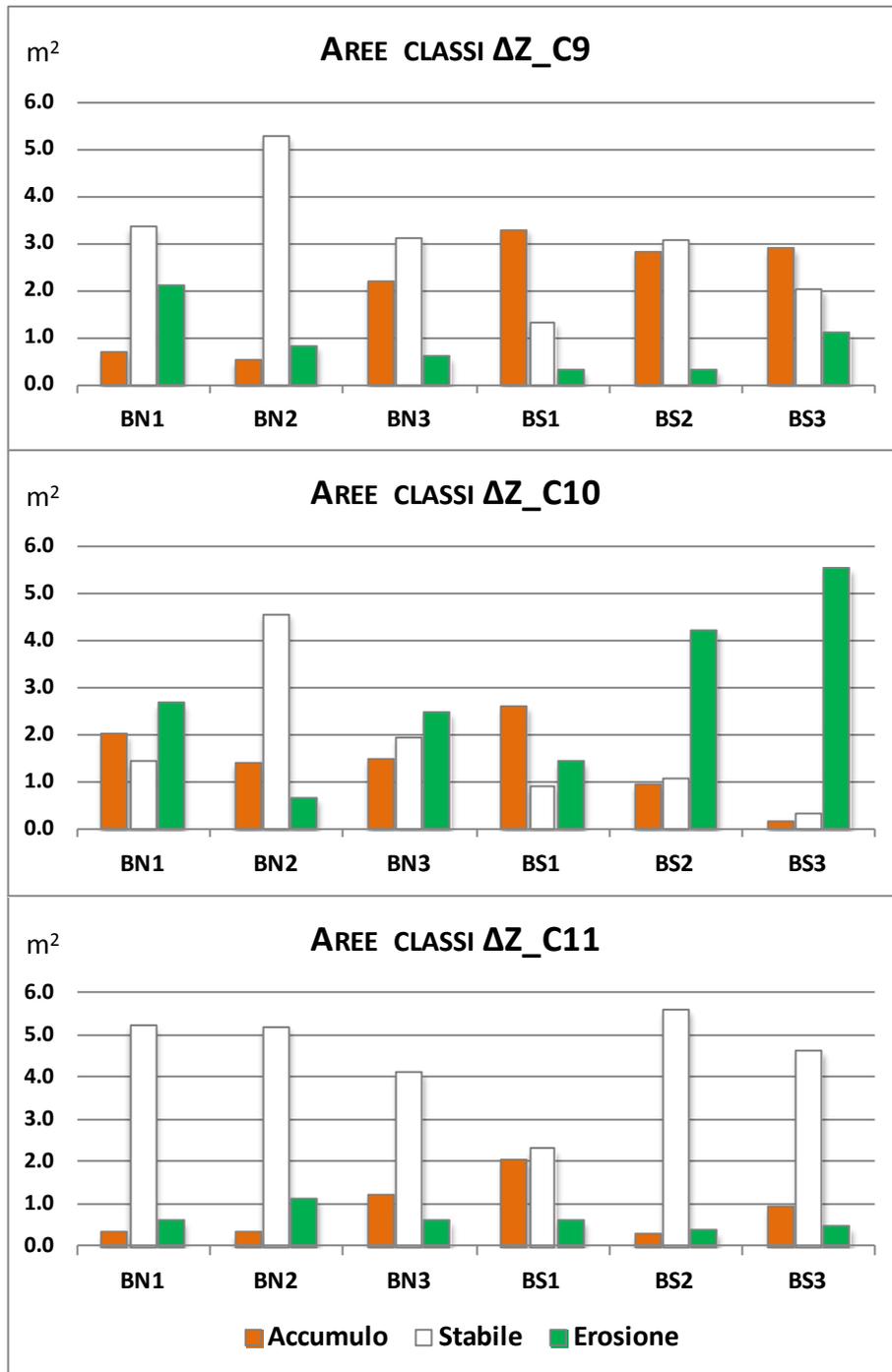


Figura 5. 15 - Valori in m^2 delle classi di Accumulo- Stabilità - Erosione, raggruppati per confronti (C) tra rilievi successivi.

Anche in questo caso è stata effettuata un'analisi cluster alla ricerca di similarità tra plots e confronti. I tre cluster evidenziati si raggruppano a seconda che prevalga la Stabilità, l'Accumulo o l'Erosione ma le relazioni con i plot o con i confronti tra rilievo non sono altrettanto chiare. Figura 5.16.

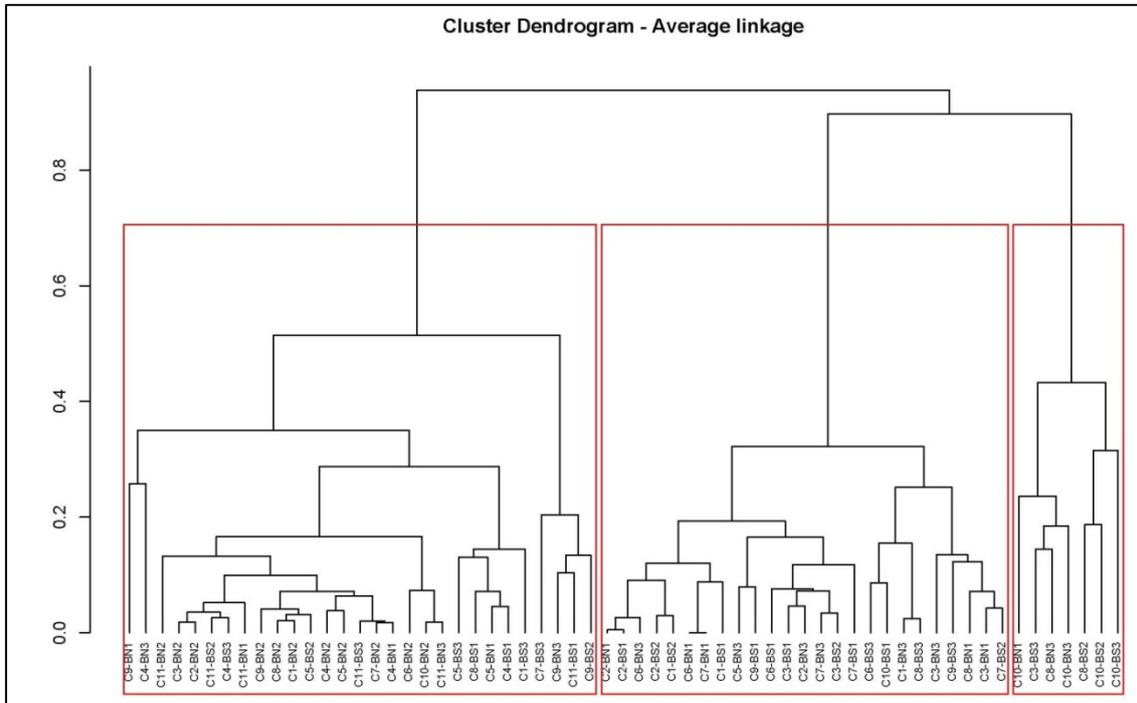


Figura 5. 16 - Dendrogramma relativo alla matrice “Geomorfologia” con le superfici di Accumulo-Stabilità-Erosione

Per questo motivo è stata effettuata un'analisi RDA tra la matrice “Geomorfologia” (Superfici m^2 di Accumulo-Stabilità-Erosione) e la matrice “Plot-Confronti”, Figura 5.17.

L'analisi è significativa, Tabella 5.14, e la matrice X “plot-confronti” spiega in maniera sufficiente ($R^2_{adj.} = 0.57$) la variabilità della matrice X “Geomorfologia”, cioè la dinamica geomorfologia è legata indubbiamente alla posizione (plot) e/o al periodo/confronto (C), ossia al periodo dell'anno e quindi al meteo; in particolare la varianza associata ai confronti (C) è maggiore di quella associata alle aree (PLOT), in altre parole la variabilità geomorfologica è detreminata più dai fattori meteo che alla posizione e ciò non stupisce visto che tutte e sei le aree sono collate nella stessa fascia delle dune embrionali.

Il triplot rivela le seguenti relazioni:

- La variabile ACC è correlata positivamente con i plot BS1, BN1 e con i confronti C2, C6, C7
- La variabile STA è correlata positivamente con il plot BN2 e con il confronto C11
- La variabile ERO è correlata positivamente con il plot BS3 e con il confronto C10

Tabella 5. 14 – RDA, partizione della varianza e Test delle permutazioni.

<i>ADJUSTED R²</i>		0.567278			
PARTITIONING OF VARIANCE:					
<i>Total</i>	Inertia	Proportion			
<i>Constrained</i>	3	1			
<i>Unconstrained</i>	2.0264	0.6755			
	0.9736	0.3245			
PERMUTATION TEST FOR RDA:					
<i>Model</i>	Df	Variance	F	Pr(>F)	
<i>Residual</i>	4	0.08286	8.1608	0.001	***
	243	0.61684			
<i>RDA1</i>	1	0.04758	18.7418	0.001	***
<i>RDA2</i>	1	0.02221	8.7498	0.001	***
<i>RDA3</i>	1	0.01105	4.3513	0.001	***
<i>RDA4</i>	1	0.00203	0.8002	0.685	
<i>Residual</i>	243	0.61684			
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

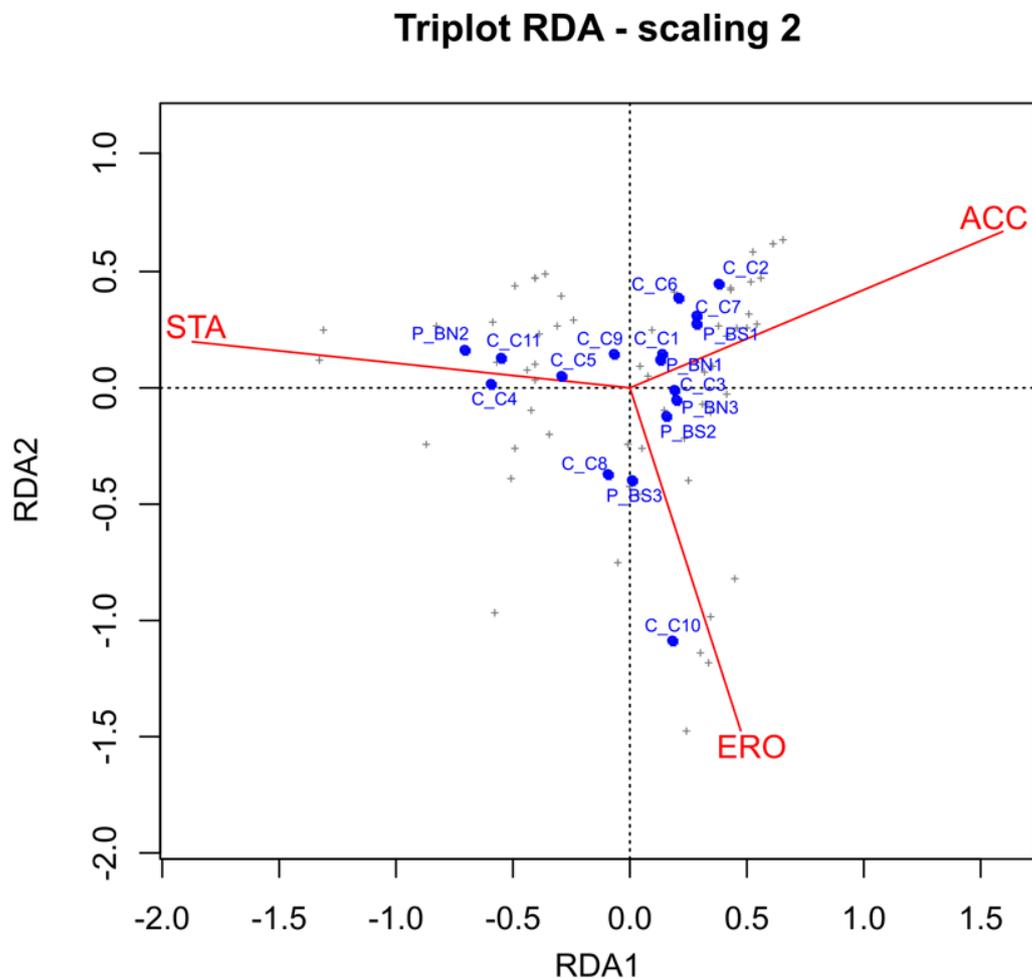


Figura 5. 17 - Triplot per l'analisi RDA tra le matrici "Geomorfologia" e "Plot-confronti".

5.4.3 Turn over della vegetazione

La vegetazione è stata inizialmente rilevata in campagna, come specie e relative coperture. Successivamente, grazie alle ortofoto prodotte con i rilievi fotogrammetrici, Figura 5.18, si è potuto procedere alla classificazione d'immagine. Le aree sono state divise in classi di: Sabbia, Biomassa, Vegetazione, Ombra, Target. Figura 5. 18.

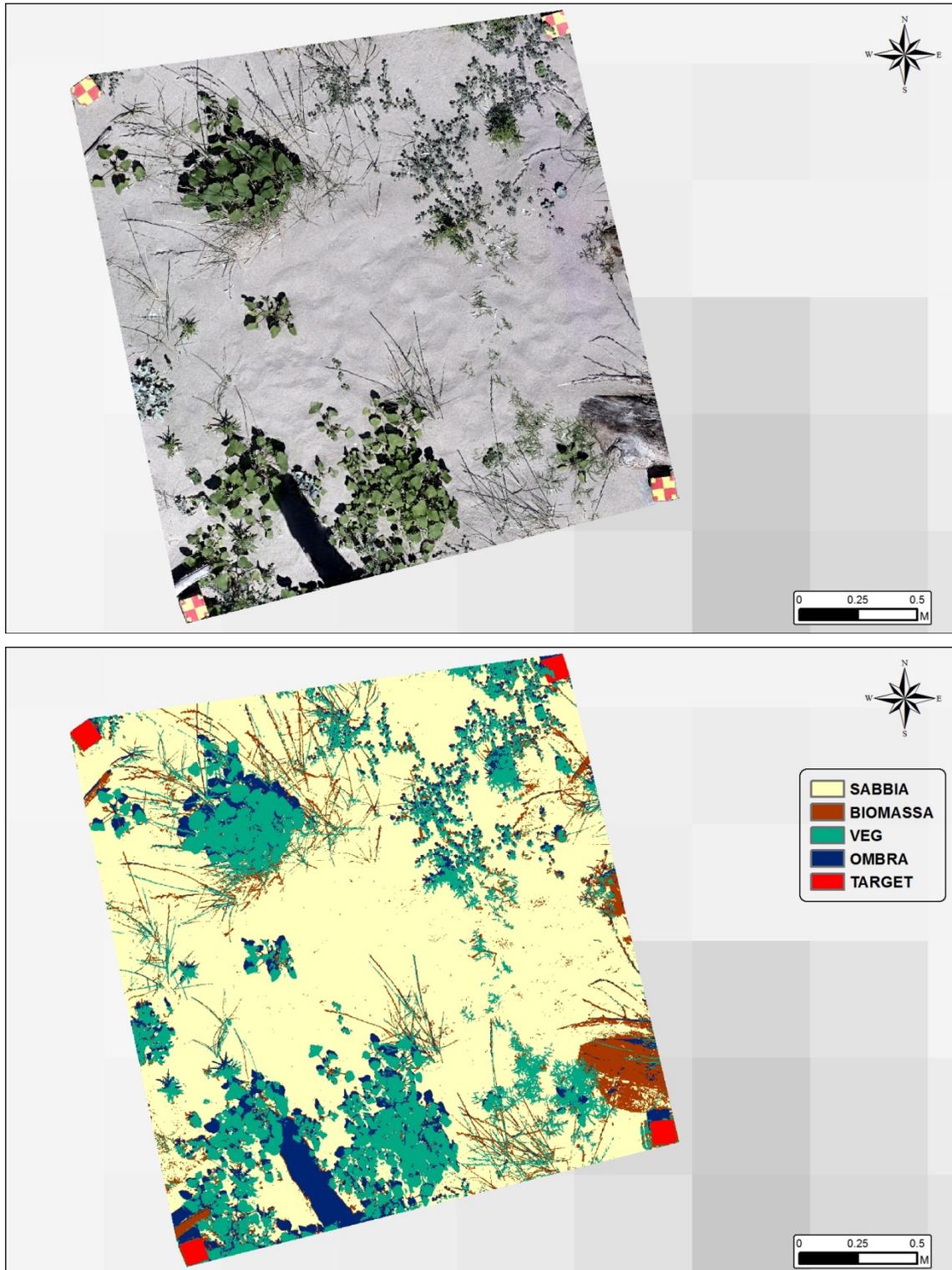


Figura 5. 18 – Classificazione di una delle ortofoto, BS1_R3, ottenute dal rilievo fotogrammetrico.

Dopo la classificazione e relativi aggiustamenti, come descritto al paragrafo 5.3.3, si è proceduto all'estrazione dell'istogramma relativo ad ogni foto che riporta il numero di pixel per ogni classe e relativa percentuale; quindi sono state selezionate le coperture della vegetazione. Le altre classi, sebbene non d'interesse, sono state aggiunte all'analisi poiché solo in tal modo è stato possibile ottenere una classificazione realistica.

In Figura 5.19 sono riportate le percentuali di copertura relativa della vegetazione per ogni plot. Ad una valutazione speditiva è possibile notare come tutte le aree, tranne BN2, presentino lo stesso trend e cioè un incremento della copertura nei primi rilievi che raggiunge il suo picco tra R5 (28.07.14) e R6 (25.08.14) per passare poi ad una progressiva diminuzione e scomparsa. BN2 invece raggiunge il suo picco di copertura nei primi rilievi R2 (29.05.14) grazie ad un'estesa fioritura di *Calystegia soldanella*, per poi passare ad una lenta diminuzione. Sempre in Figura 5.19 ed in Tabella 5.15 è riportato anche il numero di specie rinvenute ad ogni rilievo; tendenzialmente l'aumento in copertura non coincide con un aumento del numero di specie, tranne in BS2 e BS3, mentre la relazione tra la diminuzione delle coperture negli ultimi rilievi e la diminuzione in ricchezza specifica è molto più evidente.

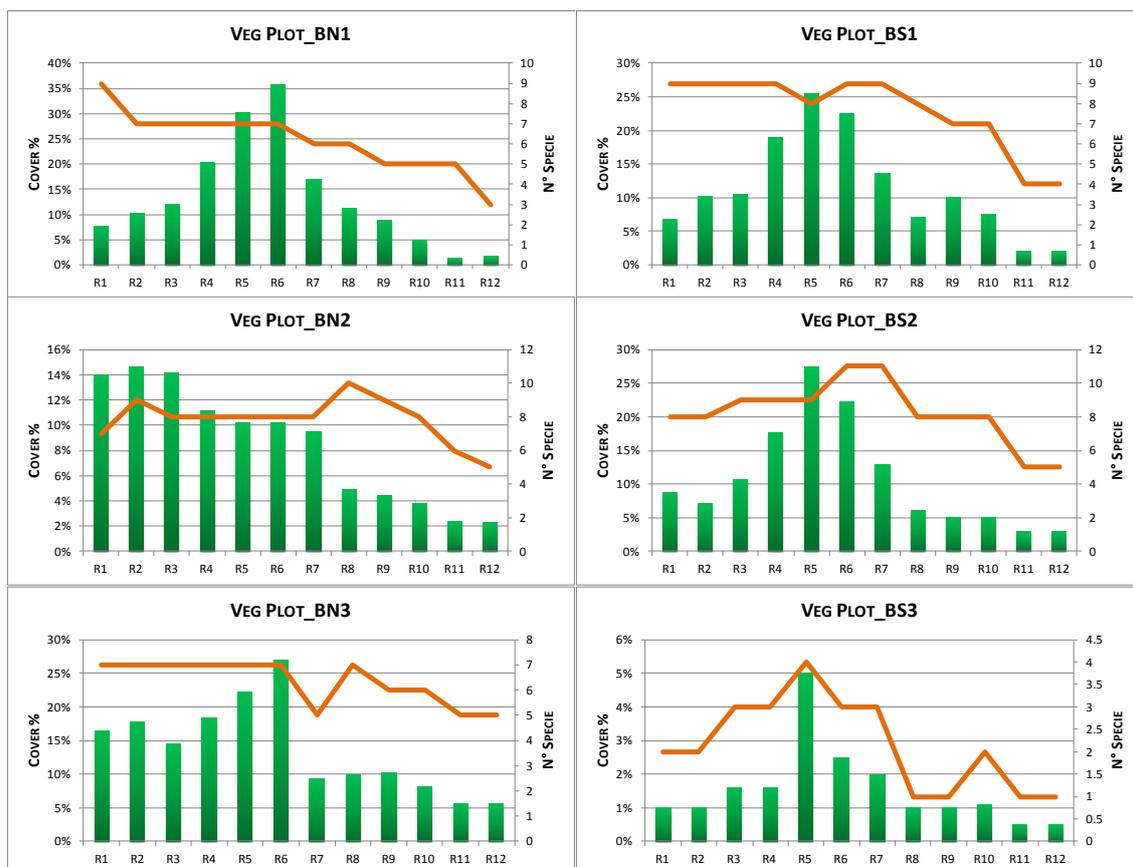


Figura 5. 19 - Coperture della vegetazione e numero di specie rilevate, per ogni area e per ogni rilievo

Tabella 5. 15 - Numero di specie per ogni area e per ogni rilievo (R)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
BN1	9	7	7	7	7	7	6	6	5	5	5	3
BN2	7	9	8	8	8	8	8	10	9	8	6	5
BN3	7	7	7	7	7	7	5	7	6	6	5	5
BS1	9	9	9	9	8	9	9	8	7	7	4	4
BS2	8	8	9	9	9	11	11	8	8	8	5	5
BS3	2	2	3	3	4	3	3	1	1	2	1	1

I valori di ogni rilievo, intesi come copertura per ogni specie, sono stati quindi raggruppati nei valori delle classi di copertura di Braun Blanquet e sottoposti a cluster analysis (*Average Linkage-Chord distance*).

In generale, tutti i plot possono essere riferiti all'associazione dell'agropireto, come deciso in fase iniziale.

Come evidenziato già nel paragrafo 4.3.1 sulla caratterizzazione generale della vegetazione costiera ravennate, in molti casi le associazioni risultano sovrapposte spazialmente tra loro, sia perché ovviamente le piante non seguono i rigidi confini delle classificazioni e sia per la limitata ampiezza delle spiagge che a sua volta limita l'estensione degli areali delle associazioni.

In questo specifico caso è possibile riconoscere alcune di queste situazioni nella ripartizione in cluster, Figura 5.20.

Il primo cluster a sinistra, formato dai plot BN2 - BN3 si caratterizza per la presenza costante di *Ammophila arenaria*, *Medicago marina* e *Cyperus capitatus* oltre alla presenza di *Elytrigia juncea* e altre specie dell'agropireto, quindi i due plots possono essere intesi come agropireti più avanzati tendenti all'ammofileto.

Il terzo cluster a destra raggruppa BS2, BN1, BS3 che, seppur con relative differenze, si caratterizzano come agropireti con abbondante e costante presenza di *Elytrigia j.* e *Xanthium i.* ma con presenze rilevanti di specie del cakileto, come *Inula c.*, *Cakile m.* e *Salsola t.*, quindi queste aree possono essere considerate come transizioni tra cakileto e agropireto, o come regressioni dinamiche di quest'ultima tipologia dovute al disturbo.

Infine, BS1 forma un cluster a sè stante ed è il classico agropireto con abbondante *Elytrigia j.* e *Xanthium i.*, accompagnata da molte altre specie tipiche come *Euphorbia paralias* ed *Eringium maritimum*, non presenti negli altri plot.

Va sottolineato che la diversa composizione in specie dei sei plot non è casuale ma è stata una scelta ben precisa, un criterio utilizzato per la scelta della aree di studio.

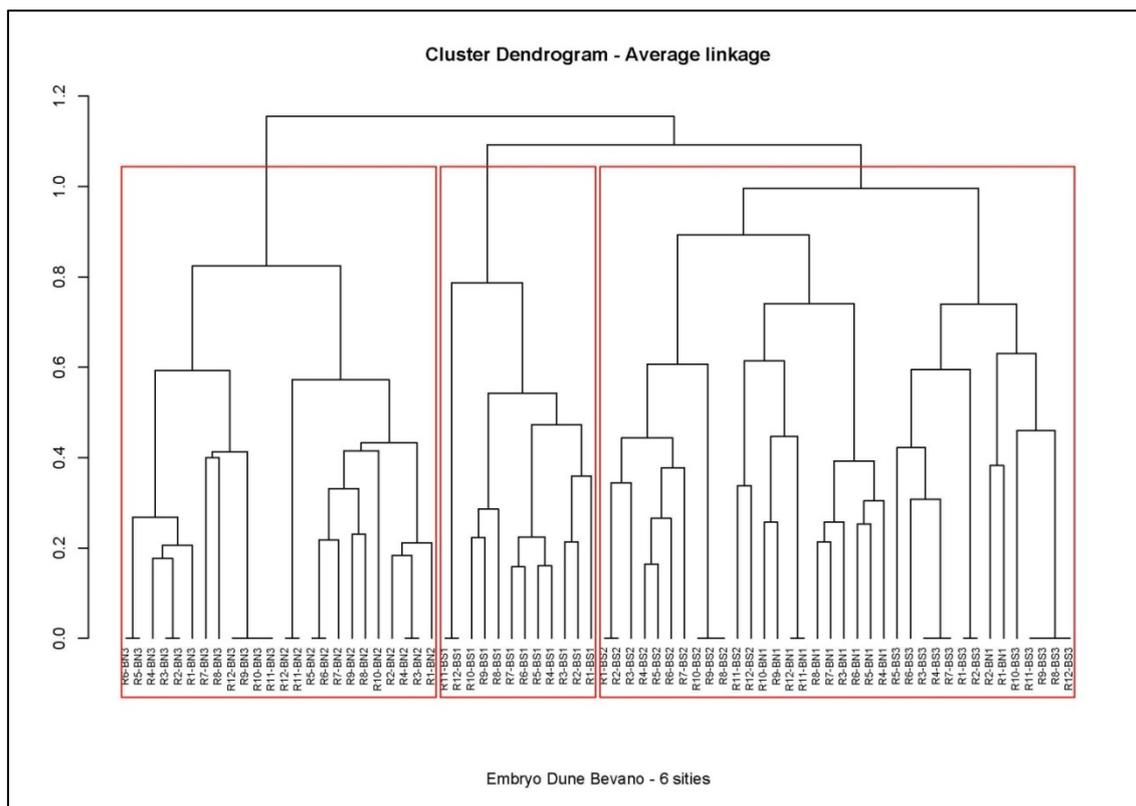


Figura 5. 20 - Dendrogramma relativo alla matrice “Vegetazione”, con le coperture per ogni specie

5.4.4 Monitoraggio sedimentologico

Come già descritto in precedenza, ad ogni rilievo è stato preso un campione di sabbia degli strati più superficiali per ogni area.

I campioni raccolti sono stati quindi sottoposti a setacciatura tramite vibrovaglio, utilizzando i seguenti setacci: 500, 350,250,177,125 (micron).

I risultati sono stati quindi immessi nel foglio di calcolo Excel GRADISTAT v 8.0 (Blott, 2010), ad ottenere un'immediata classificazione e descrizione dei campioni.

I campioni risultano composti principalmente di sabbia media e fine, con delle piccole frazioni (sempre inferiori all'1%) di sabbia molto fine e sabbia grossolana/bioclasti. Tutti i rilievi, classificati secondo le relative percentuali in "sabbia grossolana" (SG), "sabbia media" (SM), "sabbia fine" (SF), "sabbia molto fine" (SMF), sono stati quindi sottoposti ad analisi cluster, Figura 5.21 e Tabella 5.16.

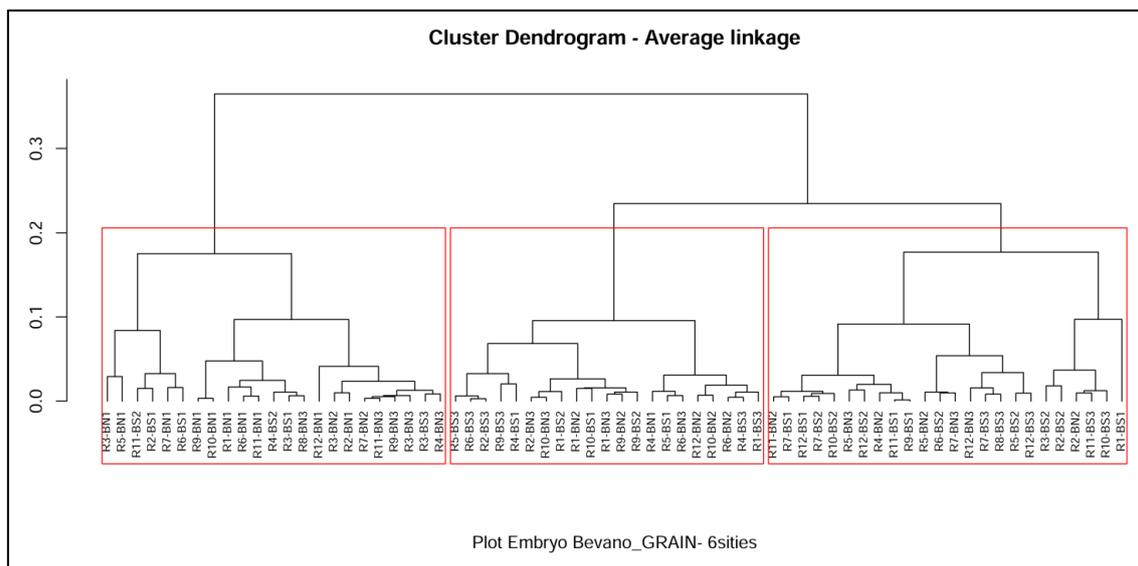


Figura 5. 21 - Dendrogramma relativo alla matrice "Granulometrie", con le classi granulometriche

Tabella 5. 16 - Percentuali medie per tre cluster per ogni classe granulometrica

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
SG	0.64%	0.43%	0.38%
SM	70.52%	57.31%	45.49%
SF	28.58%	41.86%	53.64%
SM F	0.26%	0.40%	0.49%

Possiamo notare che il primo cluster si caratterizza per una nettissima prevalenza di SM, negli altri due SM e SF hanno valori molto simili ma nel cluster 2 è di poco prevalente SM mentre nel cluster 3 prevale di poco SF.

L'analisi RDA effettuata tra le matrici "Granulometria" e "Plot-Confronti" risulta significativa, Tabella 5.17. In particolare, il plot BN1 si caratterizza per la prevalenza di sabbia media (SM);

BN2 e BS2 sono invece i plot dove può predominare sabbia fine anche se non costantemente. Infine, la variabilità granulometrica dipende più dalla posizione (P) che dal periodo (C).

Tabella 5. 17 - RDA, partizione della varianza e Test delle permutazioni.

<i>ADJUSTED R²</i>					
0.415021					
<i>PARTITIONING OF VARIANCE:</i>					
	Inertia	Proportion			
<i>Total</i>	4	1			
<i>Constrained</i>	2.245	0.5613			
<i>Unconstrained</i>	1.755	0.4387			
<i>PERMUTATION TEST FOR RDA:</i>					
	Df	Variance	F	Pr(>F)	
<i>Model</i>	15	2.2451	3.8379	0.001	***
<i>Residual</i>	45	1.7549			
<i>RDA1</i>	1	1.61539	51.5471	0.001	***
<i>RDA2</i>	1	0.41609	13.2774	0.001	***
<i>RDA3</i>	1	0.21358	6.8153	0.001	***
<i>RDA4</i>	1	0	0.0001	1	
<i>Residual</i>	56	1.75494			
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

Triplot RDA - scaling 2

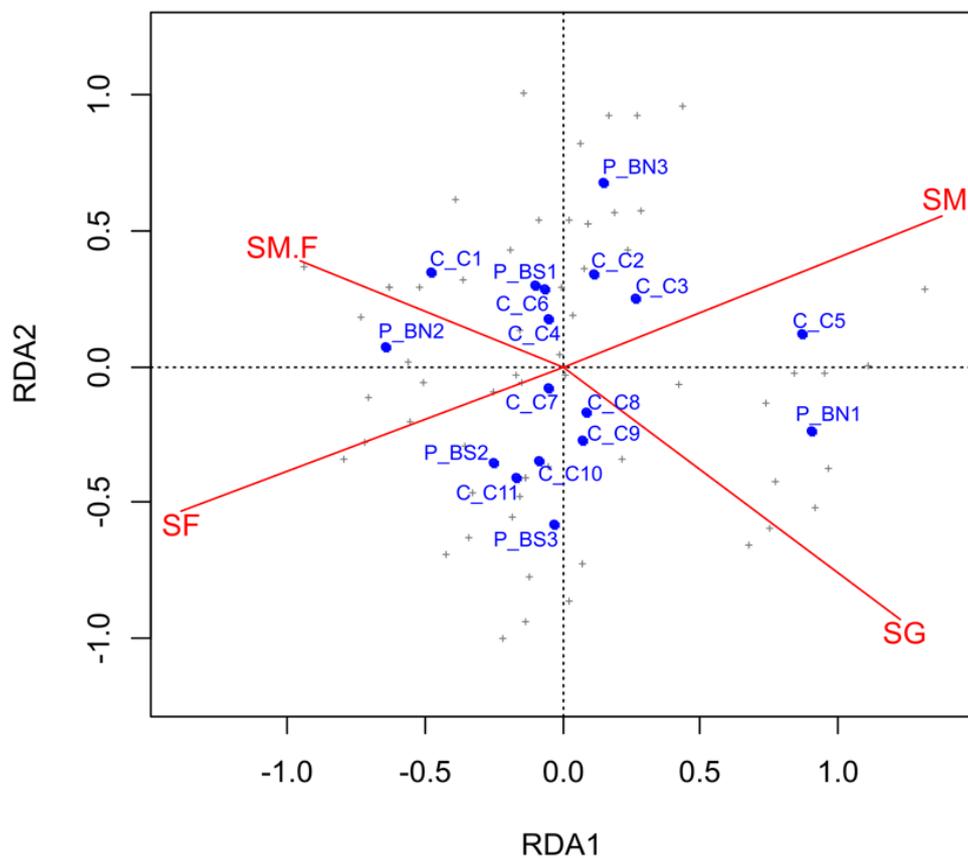


Figura 5. 22 - Triplot per l'analisi RDA tra le matrici "Granulometrie" e "Plot-confronti"

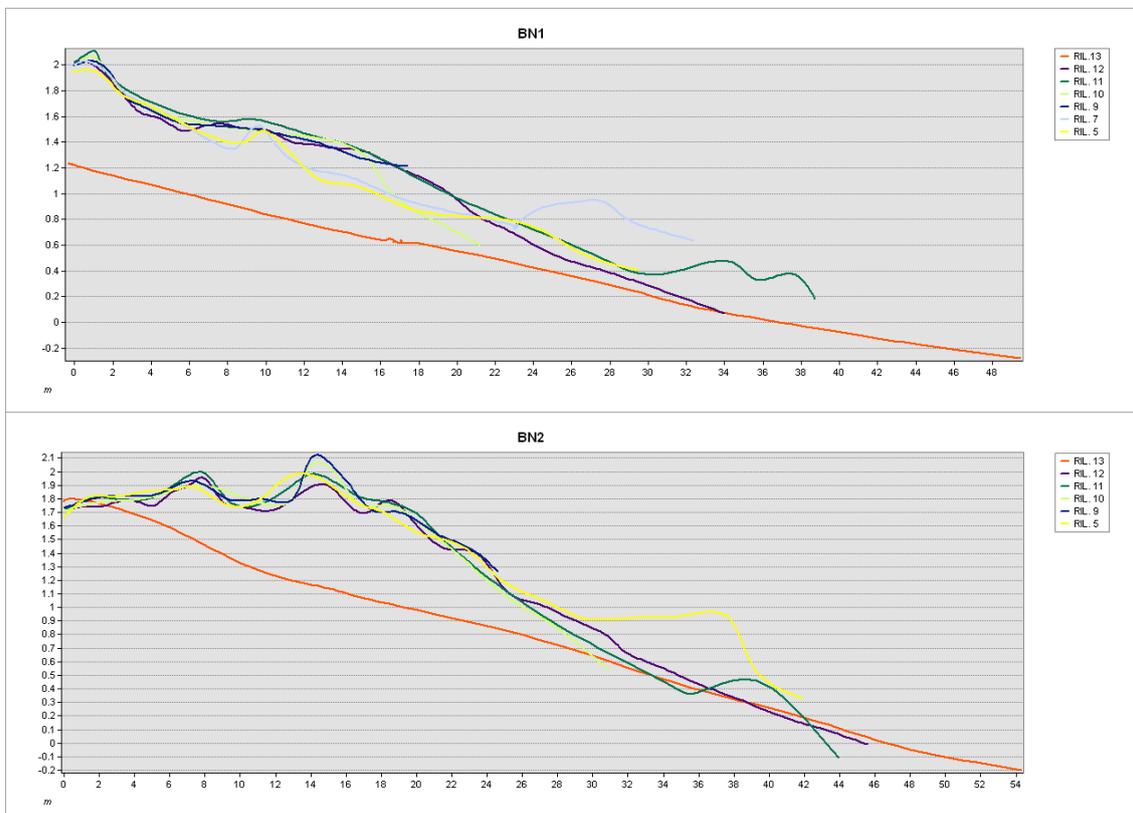
5.4.5 Rilevi topografici plot-riva

I rilievi della topografia sono stati eseguiti per il monitoraggio dei cambiamenti morfologici dell'intera spiaggia, effettuati a partire dalle aree dei plot fino a riva tramite metodologia DGPS-RTK. Per problemi tecnici relativi allo strumento, i transetti sono stati effettuati solo nei rilievi R4, R5, R9, R10, R11, R12, R13. Di notevole interesse è risultato oltretutto il rilievo R13, linea rossa nelle successive Figure, rilievo effettuato dopo la mareggiata del 5-6 febbraio 2015; è evidente il completo spianamento delle morfologie e l'abbassamento generale della topografia della spiaggia, fino a 1.20 m nell'area dove era ubicata il plot BN3 (terzo profilo in Figura 5.23).

In Tabella 5.18 vengono riportati i dati di ampiezza media, minima e massima per ogni transetto plot-riva; le ultime due derivano dalle vere e proprie misurazioni in campo mentre l'ampiezza media è stata ricavata come relazione lineare tra i parametri ampiezza-livello marino. A tal riguardo è risultato molto interessante poter osservare la variabilità dell'ampiezza della spiaggia in relazione al livello marino.

Tabella 5. 18 - Ampiezza media, minima e massima della spiaggia antistante ciascun plot; il range LIV si riferisce ai rispettivi livelli marini durante lo svolgimento dei rilievi relativi a AMP,min e AMP.max.

	<i>AMP. med</i>	<i>AMP. min</i>	<i>AMP. max</i>	<i>range LIV</i>
BN1	37	17	39	0.61 / -0.06
BN2	40	25	46	0.61 / -0.16
BN3	20	7	22	0.49 / 0.29
BS1	38	25	37	0.65 / 0.07
BS2	41	14	36	0.65 / 0.11
BS3	65	39	59	0.40 / 0.11



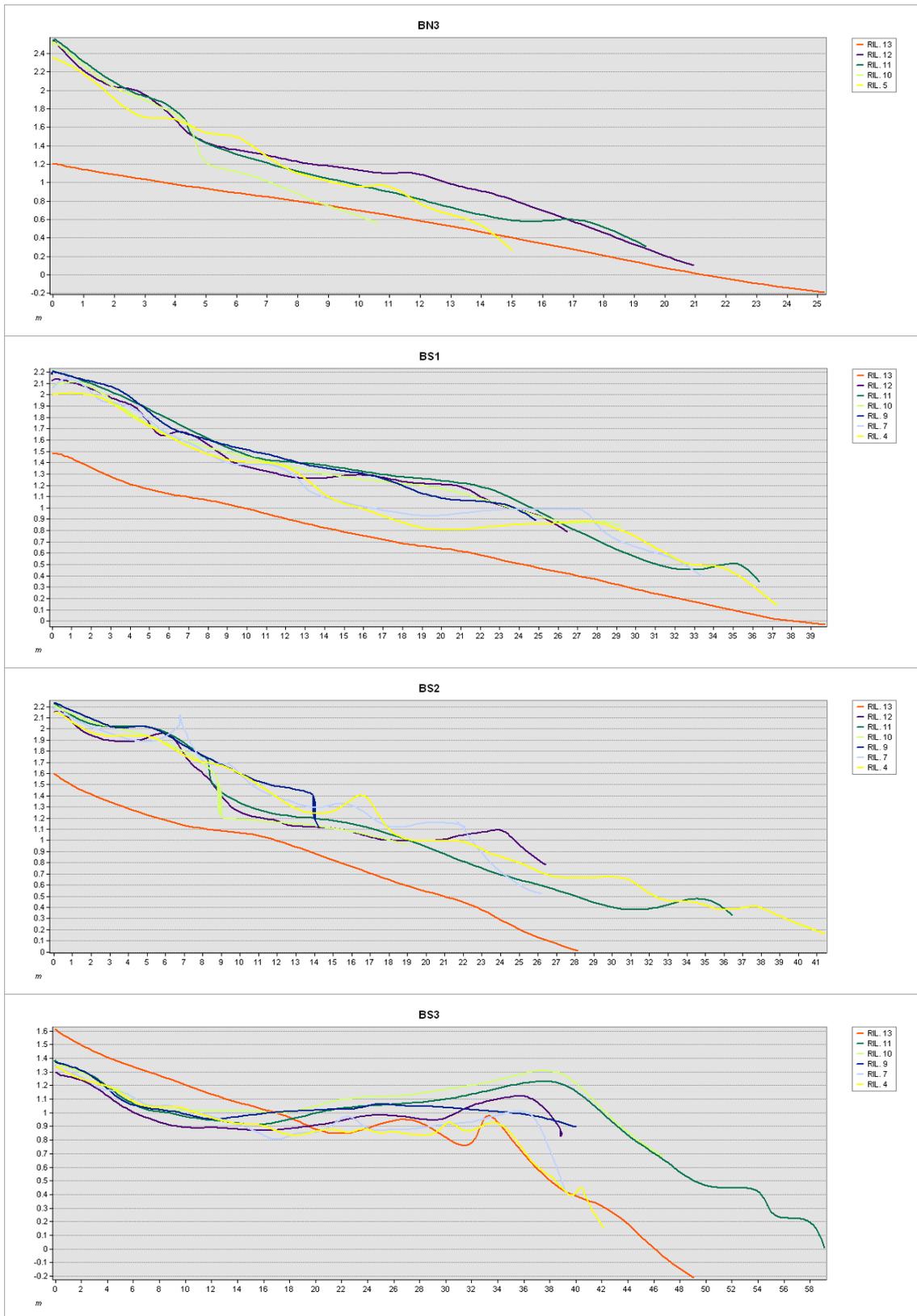


Figura 5. 23 - Profili topografici per ogni plot e relativa spiaggia antistante.

5.4.6 Analisi delle relazioni tra componenti

RDA, Geomorfologia/Meteoromario

Matrice Effetto: Geomorfologia

Matrice Causa: Meteoromario (paragrafo 5.4.1)

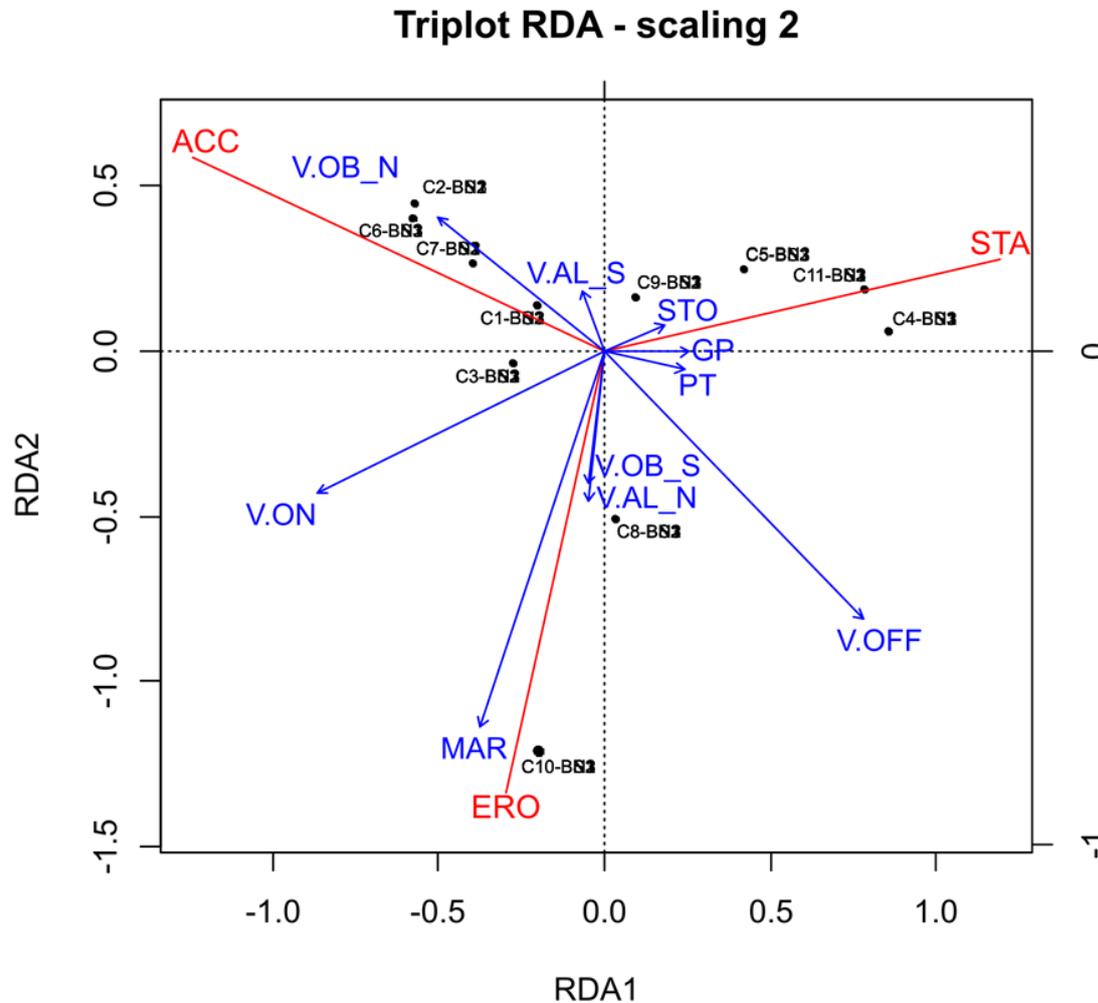


Figura 5. 24 - Triplot per l'analisi RDA tra le matrici "Geomorfologia" e "Meteoromario".

Il grafico sovrastante mostra le relazioni tra le variabili causa e valibili effetto e gli oggetti spiegati dai primi due assi canonici, RDA1 e RDA2, che sommati spiegano il 40% della variabilità totale espressa dal dataset della dinamica geomorfologica, Tabella 5.19.

Limitandoci ad interpretare le variabili con vettori più lunghi, quelle cioè che hanno maggior forza nel modello, possiamo vedere come l'Erosione sia strettamente correlata al numero di mareggiate (MAR) ed in particolare questa correlazione è evidente nel C10; l'Accumulo risulta strettamente correlato ai venti Obliqui onshore da Nord (V.OB_N) ed ai venti Onshore (V.ON), mentre mostra una quasi perfetta correlazione inversa con i venti Offshore (V.OFF); infine, il parametro Stabilità, mostra correlazione con il numero di surge (STO), a sua volta correlato con

i giorni di pioggia (GP) e la pioggia totale (PT), anche se i vettori delle variabili risultano corti, netta correlazione inversa con i venti onshore (V.ON).

Tabella 5. 19 – RDA- Partizione della varianza e test delle permutazioni

ADJUSTED R²	0.2708196					
PARTITIONING OF VARIANCE:						
	Inertia	Proportion				
<i>Total</i>	3	1				
<i>Constrained</i>	1.177	0.3923				
<i>Unconstrained</i>	1.823	0.6077				
PERMUTATION TEST FOR RDA:						
	Df	Variance	F	Pr(>F)		
<i>Model</i>	10	1.177	3.2284	0.001	***	
<i>Residual</i>	50	1.823				
<i>RDA1</i>	1	0.68193	21.3226	0.001	***	
<i>RDA2</i>	1	0.49442	15.4596	0.001	***	
<i>RDA3</i>	1	0.0007	0.0217	0.986		
<i>Residual</i>	57	1.75494				
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ''	1

Sia il modello nel suo complesso che i singoli assi sono significativi secondo il test Pseudo-F, test delle permutazioni.

I due assi (RDA1+RDA2), come abbiamo già visto, spiegano il 40% della varianza *constrained*, di conseguenza rimane il 60% di varianza residua che non è spiegata dal modello.

RDA, Geomorfologia/Vegetazione

Matrice Effetto: Geomorfologia

Matrice Causa: Vegetazione (cover medie)

Per la matrice Vegetazione è stata considerata la media delle coperture delle specie tra rilievo il iniziale e quello finale (R) di ogni confronto (C).

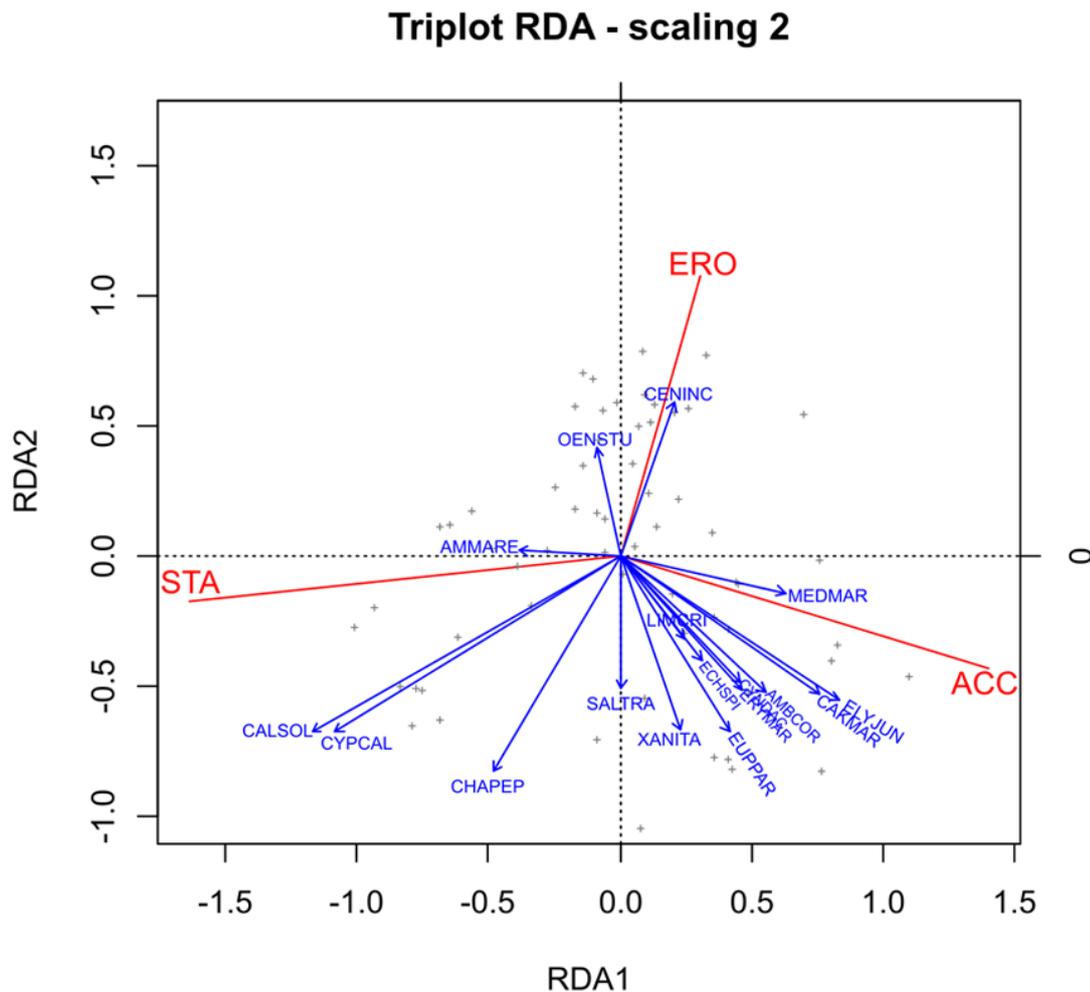


Figura 5. 25- Triplot per l'analisi RDA tra le matrici "Geomorfologia" e "Vegetazione"

La variabile Erosione mostra correlazioni inverse più o meno importanti, a seconda delle angolature dei vettori, con la maggior parte delle specie, tranne *Oenothera s.*, *Cenchrus i.* che sono due piante ruderali invasive.

La variabile Stabilità mostra correlazioni con *Cyperus c.* e *Calistegia s.* e *Ammophila a.*. Quest'ultima correlazione non è in linea con ciò che ci si aspettava e probabilmente ciò è legato al fatto che *Ammophila arenaria* nelle aree di studio è presente con piccole piante isolate e non al massimo del suo sviluppo, come succede negli ammoveletti delle avandune; il vettore è breve, quindi partecipa meno delle altre specie alla spiegazione della variabilità.

La variabile Accumulo mostra correlazioni dirette con la maggior parte delle specie tra le quali *Medicago m.*, *Cakile m.*, *Elytrigia j.*, quest'ultima con il vettore più lungo.

Modello e assi sono significativi secondo il test Pseudo-F, test delle permutazioni, in particolare i due assi canonici RDA1+RDA2 spiegano il 46% della variabilità totale che scende al 25% se consideriamo l' R^2 adjusted.

Tabella 5. 20 - RDA- Partizione della varianza e test delle permutazioni

ADJUSTED R²	0.2544715				
PARTITIONING OF VARIANCE:					
<i>Total</i>	Inertia	Proportion			
<i>Constrained</i>	3	1			
<i>Unconstrained</i>	1.397	0.4657			
	1.603	0.5343			
PERMUTATION TEST FOR RDA:					
	Df	Variance	F	Pr(>F)	
<i>Model</i>	17	1.3971	2.2047	0.002	**
<i>Residual</i>	43	1.6029			
<i>RDA1</i>	1	1.06277	37.7931	0.001	***
<i>RDA2</i>	1	0.30899	10.9881	0.001	***
<i>RDA3</i>	1	0.02535	0.9014	0.398	
<i>Residual</i>	57	1.60289			
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

RDA. Geomorfologia/Topografia

Matrice Effetto: Geomorfologia

Matrice Causa: Topografia

In quest'analisi le variabili esplicative sono variabili topografiche, ossia ampiezza del tratto di spiaggia antistante ad ogni area di studio, considerata come massima (AMPmax), media (AMPmed), e minima (AMPmin) e la pendenza media dello stesso tratto (SLOPEm).

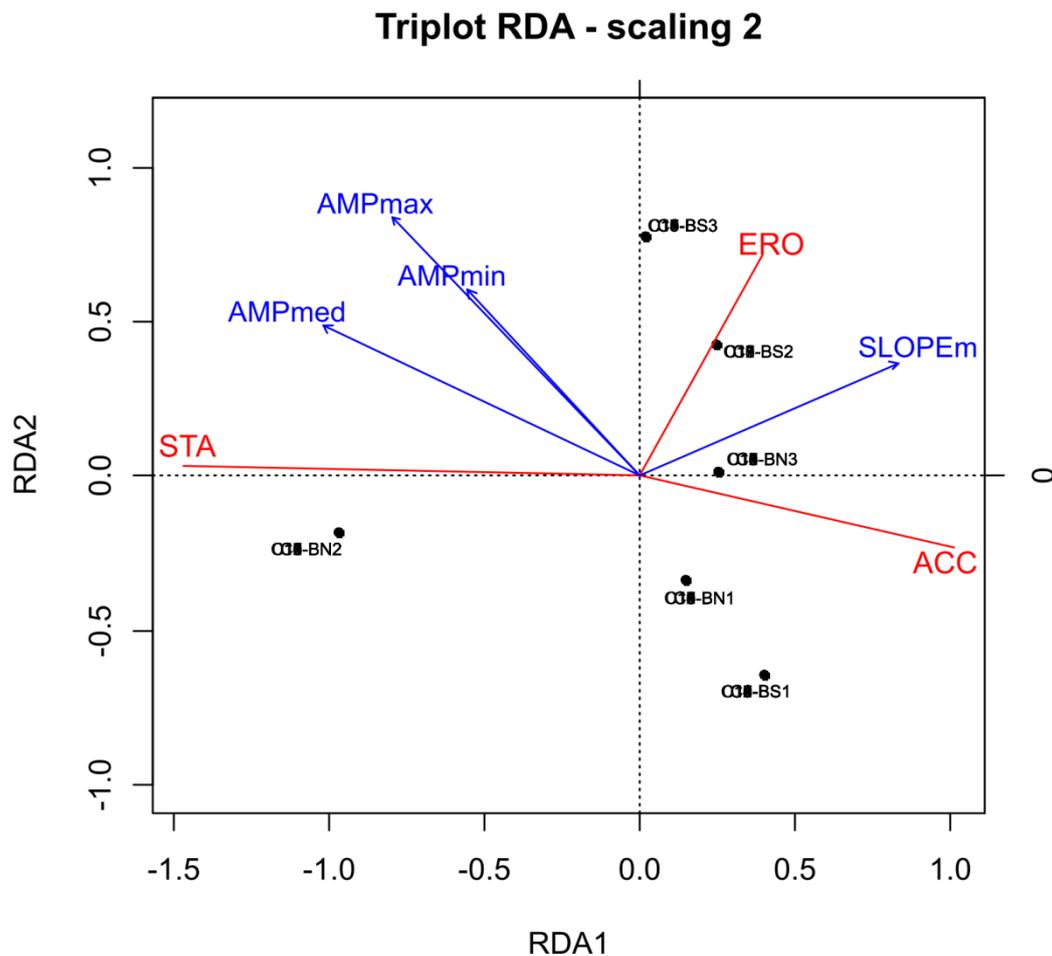


Figura 5. 26 - Triplot per l'analisi RDA tra le matrici "Geomorfologia" e "Topografia".

Nonostante l'analisi nel suo complesso risulti significativa, Tabella 5.21, i risultati sono abbastanza controversi; la variabile accumulo (ACC) risulterebbe correlata inversamente all'ampiezza della spiaggia, mentre la pendenza (SLOPEm) sembrerebbe avere una correlazione positiva sia con Ero che ACC, quindi con un qualche tipo di dinamica, ed una correlazione inversa con STA.

Effettuando gli opportuni ed ulteriori controlli effettivamente l'analisi è verosimile anche se va abbastanza contro dei concetti basilari legati al concetto di fetch, per cui una spiaggia più ampia dovrebbe mostrare i maggiori accumuli come anche una spiaggia a minore pendenza.

In realtà ciò è facilmente spiegabile con il fatto che i plots, a parità di forzanti meteo che agiscono, sono abbastanza diversi tra loro come copertura vegetazionale e specie presenti.

Il caso del plot BS3 è essere esplicativo in tal senso, poiché è il plot con il maggior tratto di spiaggia antistante ma è anche quello con la minor copertura vegetazionale cosa che ne determina comunque scarsi accumuli.

Proprio questo confronto evidenzia bene i limiti di un'analisi effettuata per componenti singole, poiché come sappiamo la dinamica geomorfologica è il risultato dall'interazione di tutte le componenti.

Modello e assi sono significativi secondo il test Pseudo-F, test delle permutazioni.

Tabella 5. 21 - RDA- Partizione della varianza e test delle permutazioni

ADJUSTED R²	0.244799				
PARTITIONING OF VARIANCE:					
<i>Total</i>	Inertia	Proportion			
<i>Constrained</i>	3	1			
<i>Unconstrained</i>	0.8854	0.2951			
	2.1146	0.7049			
PERMUTATION TEST FOR RDA:					
<i>Model</i>	Df	Variance	F	Pr(>F)	
<i>Residual</i>	4	0.88544	5.8623	0.001	***
	56	2.11456			
<i>RDA1</i>	1	0.74432	20.064	0.001	***
<i>RDA2</i>	1	0.12784	3.446	0.03	*
<i>RDA3</i>	1	0.01328	0.3579	0.72	
<i>Residual</i>	57	2.11456			
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

Rda. Geomorfologia/Granulometrie

Matrice Effetto: Geomorfologia

Matrice Causa: Granulometrie

Questa analisi non è risultata significativa dal punto di vista statistico, gli assi canonici spiegano il 9% della variabilità che scende l 3% se consideriamo l'R²ad, Tabella 5.22.

Tabella 5. 22 - RDA- Partizione della varianza e test delle permutazioni

ADJUSTED R²	0.02782488				
PARTITIONING OF VARIANCE:					
	Inertia	Proportion			
<i>Total</i>	3	1			
<i>Constrained</i>	0.2779	0.09264			
<i>Unconstrained</i>	2.7221	0.90736			
PERMUTATION TEST FOR RDA:					
	Df	Variance	F	Pr(>F)	
<i>Model</i>	4	0.27791	1.4293	0.196	
<i>Residual</i>	56	2.72209			
<i>RDA1</i>	1	0.22644	4.7416	0.015	*
<i>RDA2</i>	1	0.05049	1.0573	0.34	
<i>RDA3</i>	1	0.00098	0.0205	0.99	
<i>Residual</i>	57	2.72209			
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

Partizione della varianza. Geomorfologia/Meteomarina + Vegetazione

Matrice Effetto: Geomorfologia

Matrice Causa: Vegetazione + Meteomarina

Molto spesso si possono avere più set di variabili esplicative da testare. La tecnica della Partizione della varianza permette proprio di utilizzare più matrici contemporaneamente, quindi ogni dataset considerato è sotto il controllo dell'effetto delle altre variabili.

L'output della procedura di calcolo, in basso, mostra che i due subset considerati, X1=Meteomarina e X2= Vegetazione, determinano una frazione relativa di varianza molto simile tra loro: 0.27 e 0.25 rispettivamente.

Complessivamente il modello spiega il 54% della variabilità complessiva del dataset effetto, rimane quindi un 46% di variabilità residua, dovuta a variabili non considerate o a interazioni, Tabella 5.23.

Tabella 5. 23 – partizione della varianza tra le matrici di dati X1 (Meteomarina) e X2 (Vegetazione).

<i>Partition table:</i>					
	Df	R.squared	Adj.R.squared	Testable	
[a+b] = X1	10	0.39235	0.27082	TRUE	
[b+c] = X2	17	0.4657	0.25447	TRUE	
[a+b+c] = X1+X2	27	0.74976	0.54501	TRUE	
<i>Permutation test:</i>					
	Df	Variance	F	Pr(>F)	
<i>Model</i>	10	0.85215	3.7458	0.001	***
<i>Residual</i>	33	0.75073			
<i>Signif. codes:</i>	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' '

Nel grafico sovrastante i due cerchi indicano la porzione di variabilità espressa dai due sets, X1 e X2, mentre l'incrocio rappresenta la porzione di varianza comune alle due matrici che in questo caso è negativo, per cui non viene segnato nel grafico.

Valori negativi sono dovuti a frazioni non testabili che vengono sottratte dal modello; valori negativi hanno il significato di zero varianza condivisa tra i due dataset utilizzati come variabili esplicative.

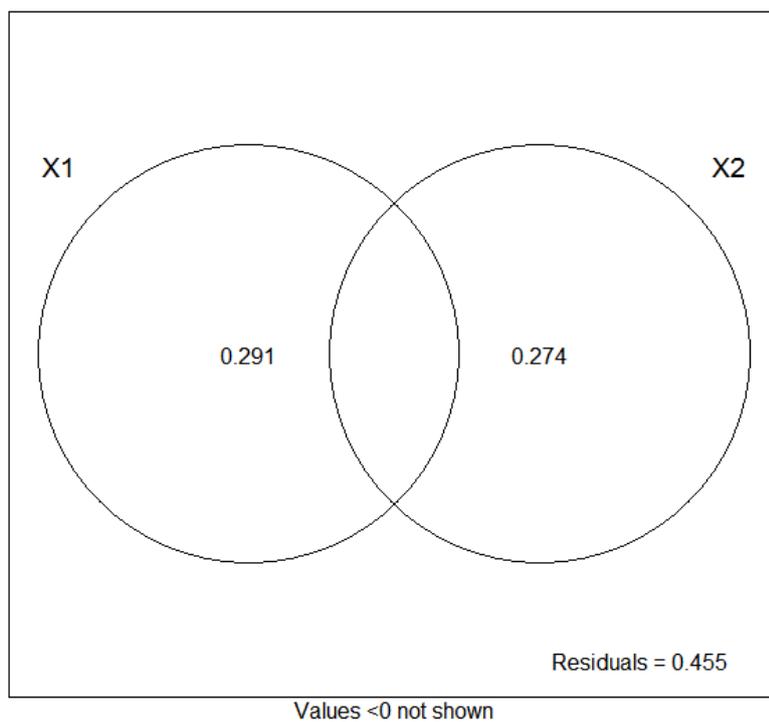


Figura 5. 27 - Grafico per la partizione della varianza. X1=matrice Meteomarina, X2= matrice Vegetazione.

5.5 CONCLUSIONI

In quest'ultima parte dello studio, l'attenzione è stata rivolta in maniera specifica alle dune embrionali, una delle porzioni più dinamiche dell'intero sistema spiaggia-duna e quindi adatte ad uno studio sul breve periodo. Sei aree di duna embrionale sono state monitorate per anno solare in un'ottica integrata, ossia considerando allo stesso tempo tutte le componenti che agiscono nella determinazione dei patterns di sedimentazione/stabilità/erosione.

In questo caso anche le metodologie sono un aspetto rilevante, in quanto sperimentali ed innovative. Per il monitoraggio geomorfologico sono state impiegate tecniche di fotogrammetria con approccio SfM, *Structure from Motion*, e rilievo *ground-based*, cioè da terra. Tale tecnica presenta numerosi vantaggi soprattutto da punto vista pratico, infatti, al contrario di altre, per il rilievo in campo è sufficiente una macchina fotografica reflex (in questo caso montata su un monopiede telescopico) per l'acquisizione di immagini dell'area di studio seguendo alcune regole di base della fotogrammetria classica e della fotografia generica. Il metodo si è rivelato adatto al tipo di lavoro che necessitava di una certa rapidità dovendo rilevare sei aree, abbastanza lontane l'una dall'altra, in una sola giornata. Lo stesso lavoro sarebbe risultato molto più difficoltoso con attrezzature pesanti ed ingombranti che oltretutto spesso necessitano l'impiego di più persone. Unico limite, almeno in relazione al tipo di rilievo effettuato (scatti dall'alto con f 50mm per non avere distorsioni), è che si presta bene solo al monitoraggio di aree piccole, anche se recentemente una simile metodologia è stata applicata anche al monitoraggio di spiagge di circa 150 m (Pikelj *et al.*, 2015); d'altra parte per aree di maggiore estensione indubbiamente può risultare più semplice l'impiego di mezzi UAV (*Unmanned aerial vehicle* o droni).

Le PC ottenute sono di grande precisione, Tabella 5.12, e nel complesso sommando tutte le fasi del processo, inclusa la comparazione delle PC, si è stimato un errore di ± 5 mm, lavorando in un sistema di riferimento locale x,y,z cioè senza georeferenziare le PC.

Inoltre l'utilizzo delle ortofoto, esportate dal modello 3D, si è rivelato molto utile anche nella definizione delle coperture della vegetazione mediante analisi d'immagine, anche se in questo caso è importante effettuare comunque il classico rilievo in campo per la determinazione delle specie.

I rilievi fotogrammetrici, in forma di PC, sono stati quindi comparati per rilievi successivi restituendone la differenza topografica, questi valori sono stati quindi classificati come aree (m²) di accumulo/stabilità/erosione. Nelle aree in cui si verifica accumulo le elevazioni di quota sono sempre nell'ordine di qualche cm (1-5 cm), meno frequenti ma non rare sono le elevazioni tra 5 e 10 cm (20 confronti) ed in un solo caso sono state identificate elevazioni maggiori di 10 cm.

Questi stessi dati, ordinati in forma di matrici, sono stati quindi comparati con le matrici relative alle altre componenti (meteomarina, vegetazione e topografia).

Per quanto riguarda le variabili meteo bisogna premettere che il regime eolico nel periodo di studio è risultato nella media; le precipitazioni al contrario sono state ben più abbondanti rispet-

to alle medie climatiche, soprattutto in giugno e luglio 2014 con quasi il triplo dei mm/mese; gli eventi di storm surge registrati sono stati numerosi e leggermente superiori alla media, soprattutto in novembre e dicembre 2014; il moto ondoso è risultato nella media e sono stati registrati eventi di mareggiata solo in Settembre (1) e in Dicembre (3); surge e mareggiate non si sono mai verificati simultaneamente fino all'evento di eccezionale intensità del 5-6 febbraio 2015 (4.85 Hs max e 1.21 m LIV) che ha asportato completamente la fascia di dune embrionali, intaccando pesantemente anche l'avanduna (retrocessione del fronte dunoso di circa 10 m in corrispondenza del plot BN3).

I suddetti parametri meteo-marini, analizzati sui periodi trascorsi tra rilievi successivi, sono stati messi in relazione alla dinamica geomorfologica evidenziando che :

- Le condizioni d'erosione si sono verificate essenzialmente in concomitanza di mareggiate e non degli storm surge; questi ultimi fenomeni, a loro volta correlati positivamente con le precipitazioni, vanno messi in relazione a condizioni di stabilità, in altre parole essi sembrano essere legati ad un blocco della dinamica ma non ad una netta erosione. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la risalita dell'acqua sulla spiaggia dovuta solo al surge/marea indubbiamente crea una condizione di allagamento e relativa umidità residua nelle ore successive che blocca la deflazione eolica ma allo stesso tempo non ha la stessa energia di una mareggiata necessaria per erodere ed esportare il sedimento. Quando invece i due eventi si verificano simultaneamente la potenzialità erosiva è amplificata in modo eccezionale come è accaduto durante nella suddetta mareggiata del 5-6 febbraio 2015.
- Gli accumuli invece mostrano una stretta correlazione positiva con la prevalenza dei venti Obliqui-Onshore da Nord (0° - 20° N), oltre che con gli Onshore diretti (20° - 140° N), in accordo con la teoria *fecht effect* (paragrafo 1.2.1) secondo la quale su spiagge strette l'apporto eolico alle dune sarebbe favorito maggiormente dai venti obliqui in ragione della maggior superficie di deflazione.

Allo stesso modo la dinamica geomorfologica è stata messa in relazione con la vegetazione, intesa come copertura delle diverse specie. In ogni plot le specie si aggregano diversamente pur facendo parte della stessa associazione, l'agropireto, tipica di duna embrionale. Ciò che è possibile evidenziare è una stretta correlazione tra la presenza della maggior parte delle specie rinvenute con gli accumuli; tra queste spicca *Elitrygia j.*, caratteristica pianta edificatrice, a conferma di quanto già noto. Anche in questo caso l'analisi degli ordinamenti evidenzia la relazione tra condizioni di stabilità e la presenza di *Cyperus capitatus* a riconferma di quanto valutato sul ruolo di questa pianta nel capitolo 4 (paragrafo 4.5).

Il confronto, sempre della dinamica geomorfologica, con la matrice delle composizioni granulometriche non è risultata significativa anche perché i plot non hanno mostrato particolari variazioni (mix di sabbia media e fine con proporzioni simili), tranne in BN1 in cui prevale nettamente la sabbia media.

Un ultimo confronto è stato effettuato con le variabili topografiche, pendenza e ampiezza della spiaggia. In particolare per l'ampiezza è stato molto interessante poter osservare la grande variabilità della spiaggia in relazione al livello del mare, Tabella 5.18, nell'ordine dei 20 m. In questo caso l'analisi RDA ha messo in luce delle relazioni completante opposte a quanto ci si poteva aspettare, nello specifico una relazione inversa tra ampiezza ed accumuli; tale relazione sebbene meriti ulteriori approfondimenti può trovare spiegazione nei limiti imposti dai confronti lineari, che come già sottolineato (paragrafo 5.4.6) non riescono a spiegare la complessità del fenomeno che invece è governato simultaneamente da più fattori. Ad ogni modo, questi risultati possono far ipotizzare che il ruolo dell'ampiezza trasversale della spiaggia sia più importante come fattore di difesa dalle mareggiate piuttosto che come fattore d'incremento del tasso di deposizione, ruolo che può essere integrato dalle estensioni in senso obliquo. In altre parole la presenza di una spiaggia ampia, antistante la fascia dunosa, può considerarsi una condizione favorevole (maggiore apporto eolico e difesa dalle mareggiate) ma non strettamente necessaria. Al contrario la presenza della vegetazione, in particolare di alcune specie (*Elytrigia j* in primis), e la grado di copertura, si confermano come condizioni necessarie per la crescita della duna; la stessa considerazione vale per la prevalenza dei venti onshore, obliqui da Nord e diretti.

CONCLUSIONI GENERALI

Lo studio sin qui proposto ha avuto come obiettivo principale quello di fornire un contributo alla conoscenza delle dinamiche nell'ambiente costiero e in particolare nella formazione delle dune.

A tal fine, lo studio è stato sviluppato partendo da una valutazione generale dei trend evolutivi dei sistemi dunosi, per l'area costiera ravennate, a scala secolare. Il trend riscontrato è una progressiva scomparsa delle aree dunose che si è articolata principalmente in due fasi, ascrivibili rispettivamente alla prima ed alla seconda metà del Novecento fino ai giorni nostri. Nella prima fase le aree dunose hanno subito un primo e cospicuo dimezzamento a causa della crisi erosiva delle cuspidi fluviali e degli impianti delle pinete litoranee. Nella seconda fase il processo si realizza attraverso una forte frammentazione dei cordoni residui a causa della crescente urbanizzazione con insediamenti urbani e attività turistiche a ridosso dell'arenile. Tale situazione determina oltretutto un vero e proprio degrado dell'habitat dunoso stretto tra l'assidua frequentazione delle spiagge e un'accentuata crisi erosiva, determinata in primis dallo scarso apporto solido dei fiumi.

L'inquadramento del territorio è proceduto con la definizione del quadro meteomarinario effettuato con particolare riguardo alla caratterizzazione dei fenomeni potenzialmente erosivi, quali mareggiate e storm surge. Tali fenomeni, per i quali è previsto un aumento in frequenza e magnitudo a causa dei cambiamenti climatici, determinano ormai annualmente pesanti danni alle strutture e agli habitat costieri che raramente riescono poi a recuperare una condizione di equilibrio. Di tali fenomeni sono state studiate le frequenze attuali in relazione ai dataset disponibili per il territorio ed i valori estremi, ossia i valori stimati per determinati livelli di pericolosità, definita dalla probabilità di accadimento in un anno o in tempi di ritorno. Tali valori sommati tra loro (marea+ surge+ runup) determinano la sopraelevazione totale marina, lo scenario peggiore possibile, che sta alla base delle analisi del rischio d'ingressione marina. Inoltre, come proposto in diverse occasioni (Protocollo GIZC del Mediterraneo e Progetto MAREMED) i livelli con Tr5 anni potrebbe rappresentare il limite della *set-back zone*, vale a dire il limite verso mare oltre il quale non dovrebbero esserci costruzioni in un'ottica di adattamento ai cambiamenti climatici e prevenzione del rischio.

Uno sguardo più specifico sulla vegetazione ha permesso di definire situazioni di disturbo/naturalità in relazione al grado di sviluppo della caratteristica successione spaziale psammofila, all'aggregazione ed alla numerosità delle specie. Tale studio ha evidenziato che malgrado la presenza di fattori di criticità (specie alloctone, erosione) solo nelle aree naturali e prive d'impatto antropico la vegetazione riesce a svilupparsi secondo la dinamica naturale, evolvendo come copertura e numerosità specifica in relazione al grado di compattazione della sabbia ed alla diminuzione degli stress ambientali dovuti alla presenza del mare. Dallo studio emerge poi il ruolo particolare della pianta *Cyperus capitatus* che spesso sostituisce l'ammofileto e

l'agropireto con aggregazioni quasi monospecifiche; tali raggruppamenti possono probabilmente essere causa di una minor crescita della duna, poiché nonostante la pianta contribuisca alla stabilità della duna non è altrettanto efficace nell'incrementare l'accumulo di sabbia, come avviene in presenza di *Elitrigia j.* e *Ammophila a.* Per quest'ultima specie, la comparazione delle coperture vegetazionali con i relativi parametri morfo-topografici evidenzia una correlazione positiva con l'altezza l.m.m, una relazione comunque già nota e quindi confermata. La valutazione delle successioni vegetazionali nei siti antropizzati evidenzia situazioni dove le cause di disturbo possono essere molto diverse: netta dominanza di specie alloctone; calpestio e quindi totale scomparsa della vegetazione; mancanza delle prime comunità a causa della presenza di strutture al piede dunale e rinfilatura con mezzi meccanici.

Infine, il vero e proprio studio integrato ha riguardato più nello specifico lo sviluppo delle dune embrionali nell'area di foce Bevano. La fase di monitoraggio, durata un anno, ha permesso la raccolta di un numero considerevole di dati riguardando alla dinamica geomorfologica e vegetazionale, granulometrie, topografia e variabili meteorologiche.

Per il monitoraggio geomorfologico, l'impiego della fotogrammetria terrestre si è rivelata una scelta adatta al tipo di studio, che richiedeva lo svolgimento di numerosi rilievi nella stessa giornata e nell'arco dell'intero periodo, grazie alla velocità del rilievo e alla semplicità dei mezzi impiegati (macchina fotografica) quindi una metodologia semplice, efficace e *low-cost*. Il metodo si adatta perfettamente al monitoraggio di piccole aree, mentre su aree più grandi indubbiamente è necessario l'impiego di mezzi diversi, tipo UAV.

Il monitoraggio ha mostrato che le neoformazioni dunose non sono poi così precarie, resistendo a numerosi eventi potenzialmente erosivi, quali mareggiate e surge invernali; se ne deduce che i fenomeni erosivi e la scomparsa delle dune sia legata più che altro all'impatto di singoli eventi catastrofici (5-6 febbraio 2015) piuttosto che alla loro frequenza; inoltre, i fenomeni erosivi documentati sembrano essere legati esclusivamente all'impatto delle mareggiate e non ai fenomeni di storm surge; quando però i due fenomeni si verificano contemporaneamente l'impatto erosivo è estremamente amplificato.

Inoltre, come meglio esplicitato nel paragrafo 5.5 le componenti vegetazione (copertura) e meteorologiche (venti obliqui-onshore e onshore diretti) hanno indubbiamente un ruolo determinante e necessario, al contrario dei parametri topografici (ampiezza della spiaggia) che invece possono avere un ruolo importante ma non direttamente legato ai tassi di deposizione e quindi della crescita della duna.

Concludendo, dal punto di vista dei risultati finali questo lavoro ha messo in luce diverse importanti relazioni, alcune delle quali già note (cover specie-accumulo) altre meno (complessità dei fenomeni erosivi). I confronti effettuati tra i diversi set di variabili si limitano ad evidenziare relazioni di tipo lineare tra due o più componenti per volta. Tale modello obiettivamente non

può spiegare la totalità della variabilità espressa nel sistema naturale costiero ma si limita a dare informazioni parziali, utili in ogni caso ad una maggiore comprensione delle dinamiche oggetto di studio. La valutazione quantitativa di un ambiente così dinamico e complesso, come quello costiero, in un'ottica il più possibile complessiva è un obiettivo di difficile risoluzione, proprio perché ogni componente è governata da meccanismi diversi ed ognuna di queste può interagire con il resto del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2013. Progetto “Be-Natur Better management and implementation of Natura 2000 sites” (WP4.2 – Pilot project PP7-RVE): Piano di Gestione dei siti “IT3250003 Biotopi litoranei della penisola del Cavallino”, “IT3250013 Laguna del Mort e Pinete di Eraclea” e “IT3250023 Lido di Venezia: biotopi litoranei”
- ACOSTA A., BLASI C., STANISCI A., 2000. Spatial connectivity and boundary patterns in coastal dune vegetation in the Circeo National Park, Central Italy. *Journal of Vegetation Science* 11: 149-154, 2000
- AGISOFT LLC, 2013. Agisoft PhotoScan. User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0.
- AMOROSI A., 1999 (a cura di). Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia 1:50000 - Foglio 223 Ravenna. Servizio Geologico d'Italia. Regione Emilia-Romagna
- AMOROSI A., COLALONGO ML, PASINI G, PRETI D. 1999. Sedimentary response to late Quaternary sea level changes in the Romagna coastal plain (Northern Italy): *Sedimentology* 46 : 99–121.
- AMOROSI A., CENTINEO MC, COLALONGO ML, FIORINI F. 2005. Millennial scale depositional cycles from the Holocene of the Po plain, Italy. *Marine geology* 222-223 (2005) 7-18
- ANTONELLINI M., MOLLEMA P., GIAMBASTIANI B., BISHOP K., CARUSO L, MINCHIO A., PELLEGRINI L., SABIA M., ULAZZI E., GABBIANELLI G. Salt water intrusion Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal* (2008) 16: 1541–1556
- ARCHETTI R., 2014. Modellazione del paraggio costiero lido di dante – bevano finalizzata all'individuazione di proposte di interventi integrati di difesa costiera su tutta l'area.
- ARENS, S.M., VAN KAAM-PETERS, H.M.E., VAN BOXEL, J.H., 1995. Airflow over foredunes and implications for sand transport. *Earth Surface Processes and Landforms* 20 (4), 315 – 332.
- ARENS, S.M., 1996. Patterns of sand transport on vegetated foredunes. *Geomorphology* 17, 339 – 350.
- ARMAROLI C., CIAVOLA P., MASINA M., AND PERINI L., 2009. Run-up computation behind emerged breakwaters for marine storm risk assessment, *J. Coastal Res.*, SI 56, 1612–1616.
- ARMAROLI C., CIAVOLA P., PERINI L., CALABRESE L., LORITO S., VALENTINI A., MASINA M., 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the emilia-romagna coastline, italy. *geomorphology*, vol. 143-144, pp 34–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.09.006>
- ARMAROLI C., GROTTOLI E., HARLEY M.D.; CIAVOLA P., 2013. Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 199 (2013) 22–35.
- AUDISIO P., MUSCIO G, PIGNATTI S., 2002. Problemi di conservazione e gestione. In: *Dune e spiagge sabbiose-Ambienti fra terra e mare* (a cura di S. Ruffo). Quaderni habitat. Museo Friulano di Storia Naturale, Udine.
- BATTJES, J.A., 1974. Surf similarity. *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 446-480.
- BAUER, B.O. & DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D., 2003. A general framework for modelling sediment supply to coastal dunes including wind angle, beach geometry and fetch effects. *Geomorphology* 49, 89–108.

- BAUER, B.O., DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D., HESP, P.A., NAMIKAS, S.L., OLLERHEAD, J., WALKER, I.J., 2009. Aeolian sediment transport on a beach: surface moisture, wind fetch, and mean transport. *Geomorphology* 105, 106–116.
- BENAVENTE, J., DEL RÍO, L., ANFUSO, G., GRACIA, F.J. AND REYES, J.L. 2002. Utility of morphodynamic characterisation in the prediction of beach damage by storms. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 36, 2002
- BIONDI E., BLASI C., BURRASCANO S., CASAVECCHIA S., COPIZ R., DEL VICO E., GALDENZI D., GIGANTE D., LASEN C., SPAMPINATO G., VENANZONI R. & ZIVKOVIC L., 2009. Manuale Italiano di interpretazione degli habitat della Direttiva 92/43/CEE. Società Botanica Italiana. Ministero dell’Ambiente e della tutela del territorio e del mare, D.P.N. - <http://vnr.unipg.it/habitat>.
- BLASI C., 2010. La vegetazione d’Italia, Carta delle Serie di Vegetazione, scala 1:500.000. Palombi & Partner S.r.l. Roma.
- BLOTT, S.J. 2010. GRADISTAT v8.0. A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. <http://www.kpal.co.uk/gradistat.html>
- BONDESAN M., CALDERONI G. E DAL CIN R., 1978. Il litorale delle province di Ferrara e Ravenna (Alto Adriatico); evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti. *Bol.Soc. Geol. It.*, 97, 247-287.)
- BONDESAN M., 1989. Geomorphological hazard in the Po Delta and adjacent areas. Supplementi di geografia fisica e dinamica quaternaria. Supplemento II, 1989.
- BONDESAN M., 1990. Le zone umide salmastre dell’Emilia-Romagna: aspetti geografici e morfologici. In: Corbetta F.(ed) *Aspetti naturalistici delle zone umide salmastre dell’Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Bologna.
- BONDESAN M., FAVERO V., VIÑALS M. J., 1995. New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene. *Quaternary International* Vol 29/30, 105>110.
- BORCARD D., GILLET F., LEGRENDE P., 2011. Numerical ecology with R. http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/Biblio/R_eng/Numerical%20Ecology%20with%20R%20%28use%20R%29.pdf
- BOVINA G. & SINAPI L., 2009. in: ISPRA, 2009 (a cura di L. Onori). Il ripristino degli ecosistemi marino-costieri e la difesa delle coste sabbiose nelle Aree protette. ISPRA, Rapporti 100/2009. ISBN 978-88-448-0404-6
- BRACA G., BUSSETTINI M., LASTORIA B., MARIANI S., 2013a. Linee guida per l’analisi statistica di base delle serie storiche di dati idrologici, Ispra, manuali e linee guida n. 84/13, Roma. http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/manuali-lineeguida/mlg_84_2013.pdf
- BRACA G., BUSSETTINI M., LASTORIA B., MARIANI S., 2013b. Anabasi – analisi statistica di base delle serie storiche di dati idrologici – macro a supporto delle linee guida Ispra – manuale d’uso, allegato a "Linee guida per l’analisi statistica di base delle serie storiche di dati idrologici", Ispra, manuali e linee guida n. 84/13, Roma.
- BRAUN-BLANQUET J., 1932. *Plant Sociology*. New York.
- BRULLO S., GIUSSO DEL GALDO G., SIRACUSA G., SPAMPINATO G., 2001. Considerazioni fitogeografiche sulla vegetazione psammofila dei litorali italiani. *Biogeographia* vol. XXII- 2001. *Biogeografia degli ambienti costieri*.
- BRUUN P., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*, 88, 117–130.
- BUFFA G., L. FILESI, U. GAMPERI G. SBURLINO1, 2007. Qualità e grado di conservazione del paesaggio vegetale del litorale sabbioso del Veneto (Italia settentrionale). *Fitosociologia* vol. 44 (1): 49-58, 2007 49

- CALABRESE L., CIBIN U., LORITO S., PERINI L., 2010. Physical classification of the Emilia-Romagna coast (Italy). *Geology of the Adriatic area. GeoActa, Special Publication 3* (2010), pp. 89-101.
- CARBONI M., CARRANZA M.L., ACOSTA A., 2009. Assessing conservation status on coastal dunes: A multiscale approach. *Landscape and Urban Planning* 91 (2009) 17–25
- CARBONI M., SANTORO R., ACOSTA A., 2010. Are some communities of the coastal dune zonation more susceptible to alien plant invasion? *Journal of Plant Ecology*. Volume 3, Number 2, Pages 139–147. June 2010 doi: 10.1093/jpe/rtp037
- CAZZIN L. & GAMPER U., 2007. Rilievo della vegetazione presente sulle isole di Cà Roman, Pellestrina e Lido (comune di Venezia) e sulla penisola del Cavallino (comune di Cavallino tre porti) ed individuazione del suo valore naturalistico a fini gestionali.
- CENCINI C., 1980, L'evoluzione delle dune del litorale romagnolo nell'ultimo secolo; a cura della Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura di Forlì
- CICCARELLI D., BACARO G., CHIARUCCI A., 2012. Coastline Dune Vegetation Dynamics: Evidence of No Stability. *Folia Geobot* (2012) 47:263–275.
- CLOUD COMPARE. Version 2.6.2. User manual <http://www.danielgm.net/cc/>
- COLANTONI P., GALLIGNANI P. & LENAZ R., 1979. Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic shelf. *Marine Geology*, 33.
- CONTI E., ABBATE G., ALESSANDRINI A. & BLASI C., 2005 - An annotated checklist of the Italian vascular flora. Palombi Editori, Roma
- COOPER W., 1958. Coastal sand dunes of Oregon and Washington. *Geologic society of American Memoir* 72, New York, NY.
- CORBAU C., SIMEONI U., ARCHETTI R., PERETTI A., FARINA M., 2009. Winter sandy protections of the northern Adriatic coast against flooding: Preliminary result. *Journal of Coastal Research* SI 56 :1194–1198. Portugal. ISSN 0749- 0258
- CORSINI S., INGHILESI R., FRANCO L., PISCOPIA R., 2004. Atlante delle onde nei mari italiani- Italian wave atlas. APAT, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Dipartimento tutela acque interne e marine, Servizio mareografico[Roma] : Università degli studi di Roma Tre, Dipartimento di scienze dell'ingegneria civile, stampa 2004.
- thresholds, intermittency, and high frequency variability. *Geomorphology* 105, 117–126.
- DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D. & LAW, M.N., 1990. Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie. In: Nordstrom, K.F., Psuty, N.P., Carter, R.W.G. (Eds.), *Coastal Dunes: Forms and Processes*. Wiley, Chichester, pp. 177–200.
- DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D. & DAWSON, J.D., 2001. Moisture and fetch effects on rates of aeolian sediment transport, Skallingen, Denmark. In: *Proceedings, Canadian Coastal Conference, Quebec City*. National Research Council, Ottawa, pp. 309–321
- DAVIDSON-ARNOTT R.G.D., 2005. Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research* 21, 6 :1166–1172 West Palm Beach, Florida November 2005.
- DAVIDSON-ARNOTT R.G.D., YANG Y., OLLERHEAD J., HESP P.A., WALHER I.J., 2008; The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. *Earth Surf. Process. Landforms* 33, 55–74 (2008)
- DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D. & BAUER, B.O., 2009. Aeolian sediment transport on a beach:
- DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D., HESP, P.A., NAMIKAS, S.L., OLLERHEAD, J., WALKER, I.J., 2009. Aeolian sediment transport on a beach: surface moisture, wind fetch, and mean transport. *Geomorphology* 105, 106–116.

- DELGADO-FERNANDEZ I., 2010. A review of the application of the fetch effect to modelling sand supply to coastal foredunes *Aeolian Research* 2 (2010) 61–70
- DIRETTIVA ALLUVIONI 2007/60/CE
- DURAN O. & MOORE L.J., 2013. Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes. *PNAS*. October 22, 2013. vol. 110. no. 43. 17217–17222. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1307580110
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY), 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. EEA Report, No 12/2012. ISSN 1725-9177.
- ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W. & PAULISSEN, D. 1991. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 18, 1–248
- EU (EUROPE UNION), 2009. Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean. Official Journal of the European Union, 2009.
- FABBRI S., 2015. Geomorphological and statistical analysis on Ravenna dune fields changes, based on Terrestrial Laser Technology. Tesi di dottorato.
- FARRIS E., PISANU S., CECCHERELLI G. & FILIGHEDDU R., 2013. Human trampling effects on Mediterranean coastal dune plants. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology: Official Journal of the Societa Botanica Italiana*. Volume 147, Issue 4, 2013
- FENU G., COGONI D., FERRARA C., PINNA M., BACCHETTA G., 2012. Relationships between coastal sand dune properties and plant community distribution: The case of Is Arenas (Sardinia). *Plant Biosystems*, Vol. 146, No. 3, September 2012, pp. 586–602
- FERRARI C., 1980. Flora e vegetazione dell'Emilia Romagna; a cura di Regione Emilia-Romagna
- FONSTAD, M.A. DIETRICH, J.T., COURVILLE, B.C., JENSEN, J.L.; CARBONNEAU, P.E., 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landf.* **2013**, 38, 421–430.
- GABBIANELLI G., ANTONELLINI M., BALUGANI E., LAGHI M., MARCONI V., MINCHIO A., MOLLENAA P., STECCHI F., 2008. La gestione strategica della difesa dei litorali per lo sviluppo sostenibile della zona costiera del Mediterraneo – Quaderni Tecnici FASE C - Misura 3.4 Sistemi di difesa naturali – Programma POSIDUNE “Falda acquifera”. Interreg 3C BEACHMEDe.
- GAMPER U., FILESI L., BUFFA G., SBURLINO G., 2008. Diversità fitocenotica delle dune costiere nord-adriatiche. 1 – Le comunità fanerofitiche. *Fitosociologia* vol. 45 (1): 3-21, 2008
- GARCIA-MORA M.R., GALLEGO-FERNANDEZ J.B., GARCIA-NOVO F., 2000. Plant Diversity as a Suitable Tool for Coastal Dune Vulnerability Assessment. *Journal of coastal Research* 16-4:990-995.
- GARDELLI, M., CALEFFI, S., CIAVOLA, P., 2007. Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano. *Studi Costieri*, 13, 1–21.
- GIAMBASTIANI BMS, ANTONELLINI M, OUDE ESSINK GP, STUURMAN RJ, 2007. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *J Hydrol* 340:91–104
- GNRAC, 2006. Lo stato dei litorali in Italia. Le spiagge dell'Emilia-Romagna. *Studi Costieri* n°10.
- GROTTOLI E. & CIAVOLA P., 2012. Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA). *Studi Costieri* 2012 – 20: 25-46.

- GUZA, R.T. & INMAN, D.L., 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 80, 2997- 3012.
- HALLERMEIER R.J., 1978. Uses for a calculated limit depth to beach erosion. *Proceedings 16th Coastal Engineering Conference*, pp 1493-1512.
- HATTON T.J., WEST N. E., JOHNSON P.S., 1986. Relationships of the Error Associated with Ocular Estimation and Actual Total Cover. *Journal of range management* 39(1), January 1986
- HESP, P.A., 1982. Morphology and Dynamics of Foredunes in S.E. Australia. Unpubl. Ph.D Thesis, Dept. Geography, University of Sydney
- HESP, P.A., 1983. Morphodynamics of incipient foredunes in New South Wales, Australia. In: Brookfield, M.E., Ahlbrandt, T.S. (Eds.), *Eolian Sediments and Processes. Developments in Sedimentology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 325 –342.
- HESP P.A., 1988. Surfzone, beach, and foredune interactions on the Australian South East Coast. *J Coast Res (Special issue 3)*:15–23.
- HESP, P.A., 1989. A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 96B, 181 – 201
- HESP PA. 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48: 245–268.
- HESP, P.A., 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48, 245 – 268.
- HESP, P.A., DAVIDSON-ARNOTT, R.G.D., WALKER, I.J., OLLERHEAD, J., 2005. Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island, Canada. *Geomorphology* 65, 71–84.
- HESP P.A., 2011. Dune Coasts. In: Wolanski E. & Mclusky DS. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*.
- HESP P.A., 2012. Surfzone-beach-dune interactions. *Jubilee Conference Proceedings, NCK-Days*. 35-40
- HOUSER C. & MATHEW S., 2011. Alongshore variation in foredune height in response to transport potential and sediment supply: South Padre Island, Texas. *Geomorphology* 125(1):62–72.
- HSU, S. A. 1988. *Coastal Meteorology*, Academic Press, San Diego, CA.
- IDROSER, 1982. Piano progettuale per la difesa della costa emiliano-romagnola – aspetti meteorologici e determinazione del trasporto litoraneo, vol. III, regione Emilia-Romagna, Bologna, 57 pp.
- IDROSER, 1996. Progetto di piano per la difesa del mare e la riqualificazione ambientale del litorale della regione Emilia-romagna, regione Emilia-romagna, Bologna, Italia, 365 pp.
- IPCC, 2015. *Climate change 2014. Synthesis report*.
- IRIBARREN, R. & NOGALES, C., 1949. Protection des ports. *Proceedings of the 17th International Naval Congress (Lisboa)*, Sec. II-4, pp. 31-82.
- ISPRA, 2015. *Annuario dei dati ambientali 2014-2015. Tematiche in primo piano*. <http://annuario.isprambiente.it/pdf/edizione-2014-2015-pdf>
- JACKSON N. L. & NORDSTROM K.F., 1998. Aeolian transport of sediment on a beach during and after rainfall, Wildwood, NJ, USA. *Geomorphology* 22 (1998) 151-157.
- KEIJERS J.G.S., DE GROOT A.V., RIKSEN M.J.P.M., 2015. Vegetation and sedimentation on coastal foredunes. *Geomorphology* 228 (2015) 723–734
- KLEIN, R.J.T., NICHOLLS, R.J., RAGOONADEU, S., CAPOBIANCO, M., ASTON, J., BUCKLEY, E.N., 2001. Technological options for adaptation to climate change in coastal zones. *Journal of Coastal Research* 17 (3), 531–543.

- KOMAR, P. & GAUGHAN, M.K., 1972. Airy wave theory and breaker height prediction. Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 405-418.
- KÖPPEN W , 1936. Das geographische System der Klimate. In: Köppen W, Geiger R (eds) Handbuch der Klimato - logie. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- LAGUE D., BRODU N., LEROUX J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : application to the Rangitikei canyon (N-Z)
- LAZZARI G., MERLONI N., SAIANI D., 2008 - Flora della Bassa del Bardello e delle dune litoranee di Ravenna. Parco Delta del Po. Quaderni dell'Ibis, n. 2, Tipografia Moderna, Ravenna.
- LAZZARI G., MERLONI N., SAIANI D., 2012 . Siti della Rete Natura 2000 della fascia costiera ravennate Parco Delta del Po - Emilia Romagna. Quaderni dell'Ibis, n. 6, Tipografia Moderna, Ravenna.
- LUPINO P. & SCALONI P., 2013. MAREMED N. 2G MED09-209. MARitime REGions cooperation for the MEDiterranean – MAREMED. Adaptation to Climate Change on Coastal Area. Book 1: Compared analysis between coastal vulnerability maps.
- MANCINI F., DUBBINI M., GATTELLI M, STECCHI F., FABBRI S., GABBIANELLI G., 2013. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for high resolution reconstruction of topography: the Structure from Motion approach on coastal environments. Remote Sensing. ISSN 2072-4292. 6880-6898.
- MARTINEZ M.L., PSUTY N.P., LUBKE R.A., 2004. A Perspective on Coastal Dunes. In: MARTINEZ M.L. & PSUTY N.P., 2004. Coastal Dunes. Ecology and Conservation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- MASINA M. & CIAVOLA P., 2011. Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate. Studi costieri, 18, 87–101.
- MATHEW S, DAVIDSON-ARNOTT RGD, OLLERHEAD J. 2010. Evolution of a beach–dune system following a catastrophic storm overwashing event: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, 1936–2005. Canadian Journal of Earth Sciences 47: 273–290 DOI. 10.1139/E09-078
- MAUN M.A., 2004. Burial of Plants as a Selective Force in Sand Dunes. In: MARTINEZ M.L. & PSUTY N.P., 2004. Coastal Dunes. Ecology and Conservation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- MAUN M.A., 2009. The Biology of Coastal Sand Dunes. Oxford UK: Oxford University Press. 1-22
- MCLEAN R. & SHEN J-S. 2006. From foreshore to foredune: foredune development over the last 30 years at Moruya Beach, New South Wales, Australia. Journal of Coastal Research 22: 28–36.
- MERLONI, N., & PICCOLI, F., 2007 - Comunità vegetali rare e minacciate delle stazioni ravennate del Parco del Delta del Po (Regione Emilia-Romagna). In: Conservazione e recupero degli habitat costieri. Analisi e metodologie a confronto. Fitosociologia, 44 (1): 67-76
- MERLONI N., RIGONI P., ZANNI F., 2015. La vegetazione delle dune litoranee del Ravennate Carte della Vegetazione e degli Habitat. In : PROGETTO RIGED-RA. Relazione tecnica, 2015.
- MERLONI N., RIGONI P., ZANNI F., 2015. La vegetazione delle dune litoranee nella Riserva di Foce Bevano. In: AA.VV. (a cura di Nobili G.), 2015. Spiagge e dune dell'Alto Adriatico. Corpo Forestale dello Stato – Ufficio territoriale per la Biodiversità, Punta Marina Terme – Ravenna.
- MIOT DA SILVA G. & HESP P.A., 2010. Coastline orientation, aeolian sediment transport and foredune and dunefield dynamics of Moçambique Beach, Southern Brazil. Geo-morphology 120(3-4):258–278.

- MONTANARI M., 2012. Statistica ambientale. Analisi multivariata, metodologie di ordinamento. Versione 1.0 SISSAD.
- MONTANARI R. & MARASMI C. (a cura di), 2014. Il sistema gestionale delle celle litoranee-SICELL. Aggiornamento 2006-2012. Regione Emilia- Romagna 2014.
- NICHOLLS R.J., BIRKEMEIER W.A., HALLERMEIER R.J., 1996. Application of the depth of closure concept. Proc. 25th ICCE. Orlando, FL, ASCE, New York, pp 3874-3887.
- NICHOLLS, R.J., KLEIN, R.J.T., 2003. Climate change and coastal management on Europe's coast. EVA Working Paper no. 3, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany.
- NORDSTROM, K.F. 1988. Effects of shore protection and dredging projects on beach configuration near tidal inlets in New Jersey. In D.G. Aubrey and L. Weishar eds. Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets. New York: Springer-Verlag, pp.440-454.
- NORDSTROM K.F., PSUTY N.P., CARTER R.W.G, 1990. Coastal dunes. Form and process. Wiley & Sons, Chichester, 392 pp
- NORDSTROM, K.F. & JACKSON, N.L., 1993. The role of wind direction in eolian transport on a narrow sand beach. Earth Surface Processes and Landforms 18, 675–685.
- NORDSTROM F.N., 1994. Beach and sand dunes of human-altered coasts. Progress in Physical Geography 1994; 18; 497 DOI: 10.1177/030913339401800402.
- OKSANEN J., 2013. Multivariate Analysis of Ecological Communities in R: vegan tutorial
- OKSANEN J, BLANCHET FG, KINDT R, LEGENDRE P, MINCHIN PR, O'HARA RB, SIMPSON GL, SOLYMOS P, STEVENS MHH, WAGNER H. 2013. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-7. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- OLIVIER MJ, & GARLAND GG. 2003. Short-term monitoring of foredune formation on the east coast of south Africa. Earth Surface Processes and Landforms 28: 1143–1155.
- PERINI L., CALABRESE L., DESERTI M., VALENTINI A., CIAVOLA P., ARMAROLI C. (a cura di), 2011. Le mareggiate e gli impatti sulla costa in ER 1946/2010. I quaderni di Arpa. Arpa Emilia-Romagna. ISBN 88-87854-27-5 http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/quaderni_arpa/atlantemareggiategcompleteweb.pdf
- PERINI L., CALABRESE L., SALERNO G., CIAVOLA P., ARMAROLI C., 2015a. Evaluation of coastal vulnerability to flooding: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia-Romagna Region (Italy). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 3, 4315–4352, 2015. www.nat-hazards-earth-syst-sci-discuss.net/3/4315/2015/
- PERINI L., CALABRESE L., LORITO S., LUCIANI P., SALERNO G., 2015b. Mareggiate, pericolosità in Emilia-Romagna. Ecoscienza, Numero 3, anno 2015.
- PIGNATTI S., 1952, Introduzione allo studio fitosociologico della pianura veneta orientale con particolare riguardo alla vegetazione litoranea. Arch. Bot. 28: 265-329.
- PIGNATTI S. ELLENBERG H., S. PIETROSANTI S., 1996. Ecograms for phytosociological tables based on Ellenberg's Zeigerwerte. ANNALI DI BOTANICA Vol. LIV-1996
- PIGNATTI S., 2002. La vegetazione delle spiagge. In: Dune e spiagge sabbiose-Ambienti fra terra e mare (a cura di S.Ruffo). Quaderni habitat. Museo Friulano di Storia Naturale, Udine.
- PIKELJ K., ILIC S., JAMES M. R., BRANKO KORDIC B., 2015. Application of SfM photogrammetry for morphological changes on gravel beaches: Dugi Rat case study (Croatia). CM2 – 3° Coastal and Maritime Mediterranean Conference. 25-27 Novembre 2015, Ferrara.
- PIRONE G., 2014. Notes on the vegetation diversity on the Adriatic and Ionian Italian coasts: the dunes and cliffs. Plant Sociology, Vol. 51, Suppl. 1, December 2014, pp. 7-18

- POLLI S., 1960. La propagazione delle maree nell'Adriatico, Istituto sperimentale talassografico, Trieste, pubblicazione n. 370.
- PRANZINI E. & WETZEL L. (a cura di), 2008. Beach erosion monitoring. Result from BEACHMED-e/OPTIMAL project.
- PRANZINI E., 2004. La forma delle coste. Zanichelli, 2004.
- PRETI M., (a cura di), 2009. Lo stato del litorale Emiliano-romagnolo all'anno 2007 e Piano decennale di gestione. Arpa Emilia-romagna e Regione Emilia-Romagna 2009.
- RAUNKIAER C., 1934 - *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford University Press.
- RIVAS-MARTÍNEZ S., 2004. Global Bioclimatics. Classificación Bioclimática de la Tierra. Versione 27-08-04. (<http://www.globalbioclimatics.org/>).
- RIZZINI A. 1974. Holocene sedimentary cycle and heavy mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy. *Sedimentary Geology*, 11, 17-37.
- SANTORO R., JUCKER T., PRISCO I., CARBONI M., BATTISTI C., ACOSTA A., 2012. Effects of trampling limitation on coastal dune plant communities. *Environmental Management*. March 2012, Volume 49, Issue 3, pp 534-542
- SBURLINO G., BUFF G., FILESI L., GAMPER U., GHIRELLI L., 2013. Phytocoenotic diversity of the N-Adriatic coastal sand dunes - The herbaceous communities of the fixed dunes and the vegetation of the interdunal wetlands. *Plant Sociology*, Vol. 50, No. 2, December 2013, pp. 57-77. DOI 10.7338/pls2013502/04
- SEYMOUR R.J., 1977. Estimating wave generation on restricted fetches. In: *Journal of the Waterway Port, Coastal and Ocean Division, Proc. ASCE*, No. 103.20.
- SHORT AD & HESP PA, 1982. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Mar Geol* 48:259–284.
- SIMEONI U., VALPREDÀ E., SCHIAVI C., CORBAU C, 2006. Le dune costiere dell'Emilia-Romagna. *Studi costieri* Numero 11.
- SISTILLI F., 2011. La conservazione delle dune costiere: proposte di ripristino e gestione nell'area ravennate. Tesi di laurea specialistica. Università di Bologna.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.N., SZELISKI, R., 2006. Photo Tourism: Exploring Image Collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, New York, pp. 1–12.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.N., SZELISKI, R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80, 189–210.
- STOCKDON, H. F., HOLMAN, R. A., HOWD, P. A., SALLENGER, A. H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588.
- SUANEZ S, CARIOLET J-M, CANCOUËT R, ARDHUIN F, DELACOURT C. 2012. Dune recovery after storm erosion on a high-energy beach: Vougot Beach, Brittany (France). *Geomorphology* 139–140: 16–33.
- SZELISKI, R., 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications*; Springer-Verlag: London, UK, 2010.
- TEATINI P., FERRONATO M., GAMBOLATI G., BERTONI W., GONELLA M., 2005. A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environ. Geol*, 47, 831–846.
- TSIMPLIS M. N., MARCOS M., PEREZ B., CHALLENOR P., GARCIA-FERNANDEZ M. J., RAICICH F., 2009. On the effect of the sampling frequency of sea level measurements on return period estimate of extremes-southern european examples. in: *continental shelf research*, vol. 29 (18) pp. 2214 - 2221.
- UKHO, 2000. Admiralty Tide Tables, 2001

- VAN DIJK PM, ARENS SM, VAN BOXEL JH, 1999. Aeolian processes across transverse dunes. II: Modelling the sediment transport and profile development. *Earth Surf Process Landf* 24(4):319–333.
- VEGGIANI A., 1974. Le ultime vicende geologiche del Ravennate. In: *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale. Studio sulla pineta di S. Vitale di Ravenna*. Ed.. Compositori, Bologna, 48-58.
- VILIBIC I., 2006. The role of the fundamental seiche in the Adriatic coastal floods. *Continental Shelf Research* 26 (2006) 206–216
- WESTOBY M.J, BRASINGTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M., 2012. “Structure-from-Motion” photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Vol. 179, pp 300–314.
- WMO, WORLD METEREEOLOGICAL ORGANIZATION, 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No. 8 2008 edition Updated in 2010*.
- WRIGHT, L.D. & SHORT, A. D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- YU, C. S., DECOUTTERE, C., & BERLAMONT, J., 1998. Storm surge simulations in the Adriatic Sea. In: MASINA M. & CIAVOLA P., 2011. *Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate*. Studi costieri, 18, 87–101.

ALLEGATO I – MISURE TRA TARGET RILEVATE AD OGNI RILIEVO

Tabella I - Misure tra target rilevate ad ogni rilievo (R) mediante un metro. In rosso sono state evidenziate le misure che differiscono dal precedente rilievo a causa dello scollamento fisico del target dal paletto. R1-R7.

R	1		2		3		4		5		6		7	
DATA	05.05.14		29.05.14		20.06.14		07.07.14		28.07.14		25.08.14		19.09.14	
PLOT	TARGET	DIST. [m]												
BN1	1 - 2	2.384	1 - 2	2.377	1 - 2	2.377	1 - 2	2.377	1 - 2	2.377	1 - 2	2.377	1 - 2	2.377
	2 - 3	2.244	2 - 3	2.226	2 - 3	2.226	2 - 3	2.226	2 - 3	2.226	2 - 3	2.226	2 - 3	2.226
	3 - 4	2.436	3 - 4	2.428	3 - 4	2.428	3 - 4	2.428	3 - 4	2.428	3 - 4	2.428	3 - 4	2.428
	4 - 1	2.469	4 - 1	2.461	4 - 1	2.461	4 - 1	2.461	4 - 1	2.461	4 - 1	2.461	4 - 1	2.461
BN2	1 - 2	2.427	1 - 2	2.427	1 - 2	2.427	1 - 2	2.427	1 - 2	2.427	1 - 2	2.427	1 - 2	2.427
	2 - 3	2.726	2 - 3	2.726	2 - 3	2.726	2 - 3	2.726	2 - 3	2.726	2 - 3	2.726	2 - 3	2.726
	3 - 4	2.251	3 - 4	2.251	3 - 4	2.251	3 - 4	2.251	3 - 4	2.251	3 - 4	2.251	3 - 4	2.251
	4 - 1	2.458	4 - 1	2.458	4 - 1	2.458	4 - 1	2.458	4 - 1	2.458	4 - 1	2.458	4 - 1	2.458
BN3	1 - 2	2.346	1 - 2	2.346	1 - 2	2.346	1 - 2	2.346	1 - 2	2.346	1 - 2	2.346	1 - 2	2.346
	2 - 3	2.340	2 - 3	2.340	2 - 3	2.340	2 - 3	2.340	2 - 3	2.340	2 - 3	2.340	2 - 3	2.340
	3 - 4	2.209	3 - 4	2.209	3 - 4	2.209	3 - 4	2.209	3 - 4	2.209	3 - 4	2.209	3 - 4	2.209
	4 - 1	2.504	4 - 1	2.504	4 - 1	2.504	4 - 1	2.504	4 - 1	2.504	4 - 1	2.504	4 - 1	2.504
BS1	1 - 2	2.050	1 - 2	2.050	1 - 2	2.050	1 - 2	2.050	1 - 2	2.050	1 - 2	2.053	1 - 2	2.053
	2 - 3	2.077	2 - 3	2.077	2 - 3	2.077	2 - 3	2.077	2 - 3	2.077	2 - 3	2.072	2 - 3	2.072
	3 - 4	2.095	3 - 4	2.095	3 - 4	2.084	3 - 4	2.084	3 - 4	2.084	3 - 4	2.089	3 - 4	2.089
	4 - 1	2.292	4 - 1	2.292	4 - 1	2.285	4 - 1	2.285	4 - 1	2.285	4 - 1	2.290	4 - 1	2.290
BS2	1 - 2	2.588	1 - 2	2.588	1 - 2	2.588	1 - 2	2.588	1 - 2	2.579	1 - 2	2.579	1 - 2	2.582
	2 - 3	2.337	2 - 3	2.337	2 - 3	2.337	2 - 3	2.337	2 - 3	2.327	2 - 3	2.327	2 - 3	2.322
	3 - 4	2.314	3 - 4	2.314	3 - 4	2.314	3 - 4	2.314	3 - 4	2.316	3 - 4	2.316	3 - 4	2.313
	4 - 1	2.337	4 - 1	2.337	4 - 1	2.337	4 - 1	2.337	4 - 1	2.328	4 - 1	2.328	4 - 1	2.335
BS3	1 - 2	2.673	1 - 2	2.673	1 - 2	2.670	1 - 2	2.670	1 - 2	2.670	1 - 2	2.670	1 - 2	2.670
	2 - 3	2.174	2 - 3	2.174	2 - 3	2.166	2 - 3	2.166	2 - 3	2.166	2 - 3	2.166	2 - 3	2.166
	3 - 4	2.297	3 - 4	2.297	3 - 4	2.290	3 - 4	2.290	3 - 4	2.290	3 - 4	2.290	3 - 4	2.290
	4 - 1	2.195	4 - 1	2.195	4 - 1	2.187	4 - 1	2.187	4 - 1	2.187	4 - 1	2.187	4 - 1	2.187

ALLEGATO II – RISULTATI DELLE ANALISI GRANULOMETRICHE

Tabella III – Risultati delle analisi granulometriche effettuate mediante il foglio di calcolo GRADISTAT V8.0 (Blott, 2010) per i plots BN1, BN2, BN3.

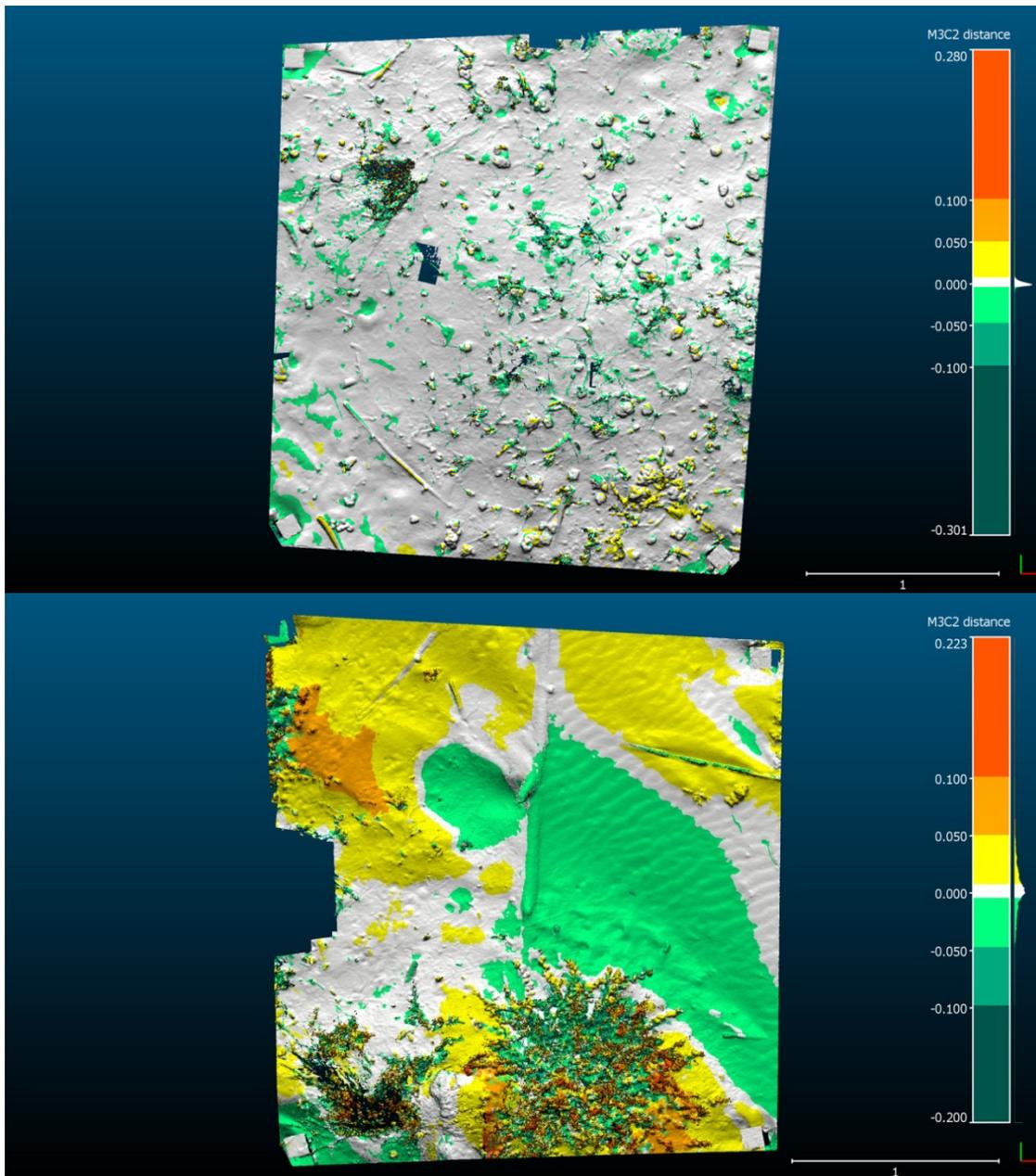
	BN1			BN2			BN3		
	MEAN (μm)	MEAN	SORTING	MEAN (μm)	MEAN	SORTING	MEAN (μm)	MEAN	SORTING
R1	276.6	Medium Sand	Well Sorted	258.1	Medium Sand	Well Sorted	255.6	Medium Sand	Well Sorted
R2	266.8	Medium Sand	Very Well Sorted	235.6	Fine Sand	Well Sorted	257.1	Medium Sand	Well Sorted
R3	310.2	Medium Sand	Well Sorted	266.7	Medium Sand	Well Sorted	263.5	Medium Sand	Very Well Sorted
R4	255.9	Medium Sand	Very Well Sorted	246.4	Fine Sand	Well Sorted	263.1	Medium Sand	Very Well Sorted
R5	300.7	Medium Sand	Well Sorted	244.6	Fine Sand	Well Sorted	248.2	Fine Sand	Well Sorted
R6	274.8	Medium Sand	Well Sorted	252.7	Medium Sand	Well Sorted	253.8	Medium Sand	Well Sorted
R7	283.8	Medium Sand	Well Sorted	267.2	Medium Sand	Well Sorted	244.0	Fine Sand	Well Sorted
R8	-	-	-	-	-	-	271.4	Medium Sand	Well Sorted
R9	275.8	Medium Sand	Very Well Sorted	256.0	Medium Sand	Well Sorted	265.1	Medium Sand	Well Sorted
R10	276.7	Medium Sand	Well Sorted	254.0	Medium Sand	Well Sorted	257.6	Medium Sand	Well Sorted
R11	273.3	Medium Sand	Well Sorted	249.5	Fine Sand	Well Sorted	265.4	Medium Sand	Well Sorted
R12	268.7	Medium Sand	Well Sorted	253.3	Medium Sand	Well Sorted	222.3	Fine Sand	Moderately Well Sorted

Tabella IV - Risultati delle analisi granulometriche effettuate mediante il foglio di calcolo GRADISTAT per i plots BS1, BS2, BS3.

	BS1			BS2			BS3		
	MEAN (μm)	MEAN	SORTING	MEAN (μm)	MEAN	SORTING	MEAN (μm)	MEAN	SORTING
R1	234.9	Fine Sand	Well Sorted	263.4	Medium Sand	Well Sorted	253.9	Medium Sand	Well Sorted
R2	246.4	Fine Sand	Well Sorted	239.5	Fine Sand	Well Sorted	263.4	Medium Sand	Well Sorted
R3	272.9	Medium Sand	Well Sorted	239.9	Fine Sand	Well Sorted	264.9	Medium Sand	Well Sorted
R4	263.0	Medium Sand	Well Sorted	269.0	Medium Sand	Well Sorted	253.3	Medium Sand	Well Sorted
R5	255.4	Medium Sand	Well Sorted	241.8	Fine Sand	Well Sorted	263.8	Medium Sand	Well Sorted
R6	256.4	Medium Sand	Well Sorted	247.0	Fine Sand	Well Sorted	263.5	Medium Sand	Well Sorted
R7	250.6	Medium Sand	Well Sorted	244.0	Fine Sand	Well Sorted	244.0	Fine Sand	Well Sorted
R8	-	-	-	-	-	-	242.1	Fine Sand	Well Sorted
R9	249.2	Fine Sand	Well Sorted	258.9	Medium Sand	Well Sorted	261.0	Medium Sand	Well Sorted
R10	260.4	Medium Sand	Well Sorted	251.0	Medium Sand	Well Sorted	238.5	Fine Sand	Well Sorted
R11	249.5	Fine Sand	Well Sorted	267.9	Medium Sand	Well Sorted	238.3	Fine Sand	Well Sorted
R12	252.1	Medium Sand	Well Sorted	248.5	Fine Sand	Well Sorted	242.1	Fine Sand	Well Sorted

ALLEGATO III - SERIE DELLE COMPARAZIONI TRA PC, ORDINATE PER CONFRONTI (C) SUCCESSIVI.

Confronto C1 tra i rilievi R1-R2 (05.05.14-29.05.14)



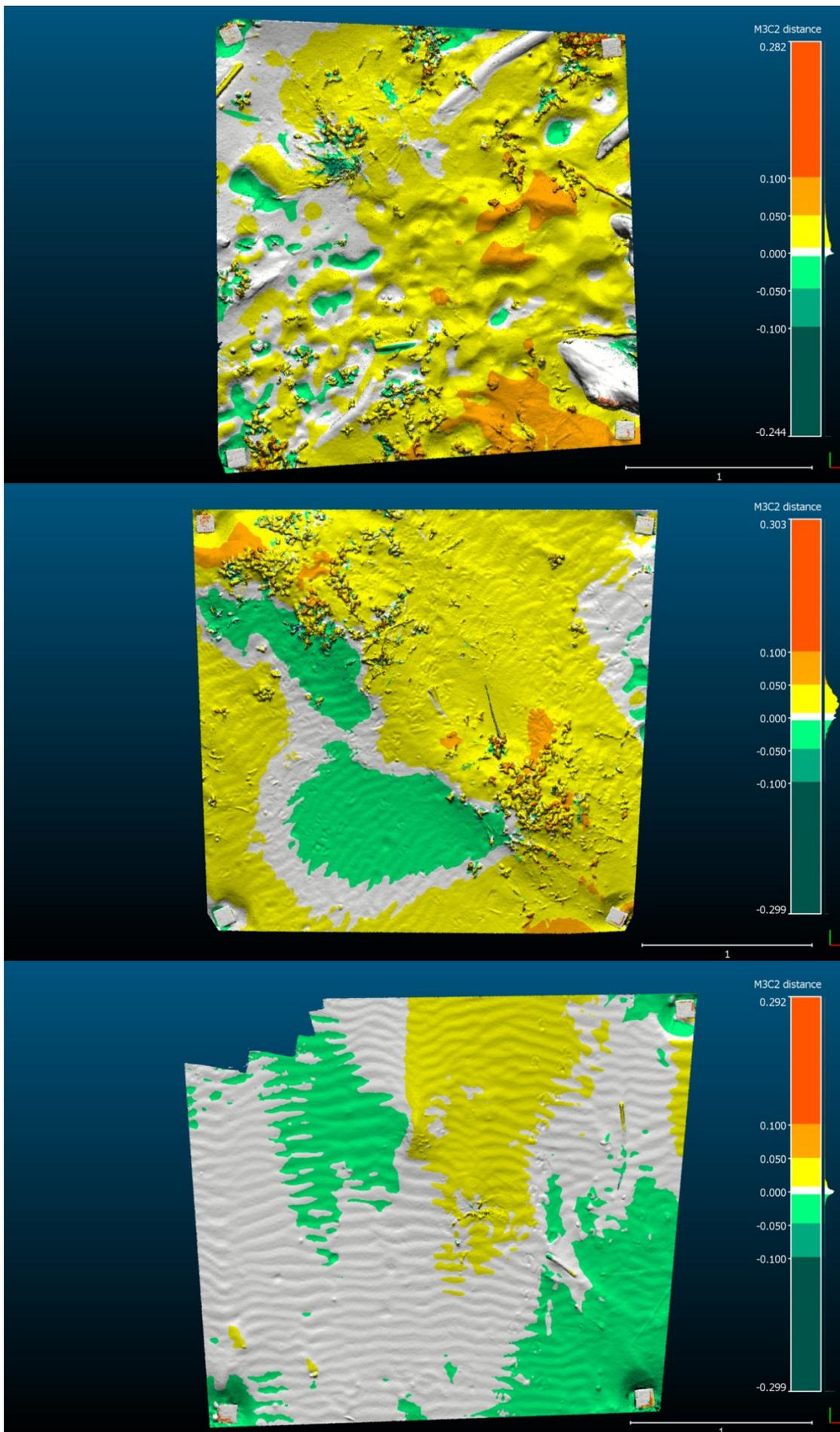
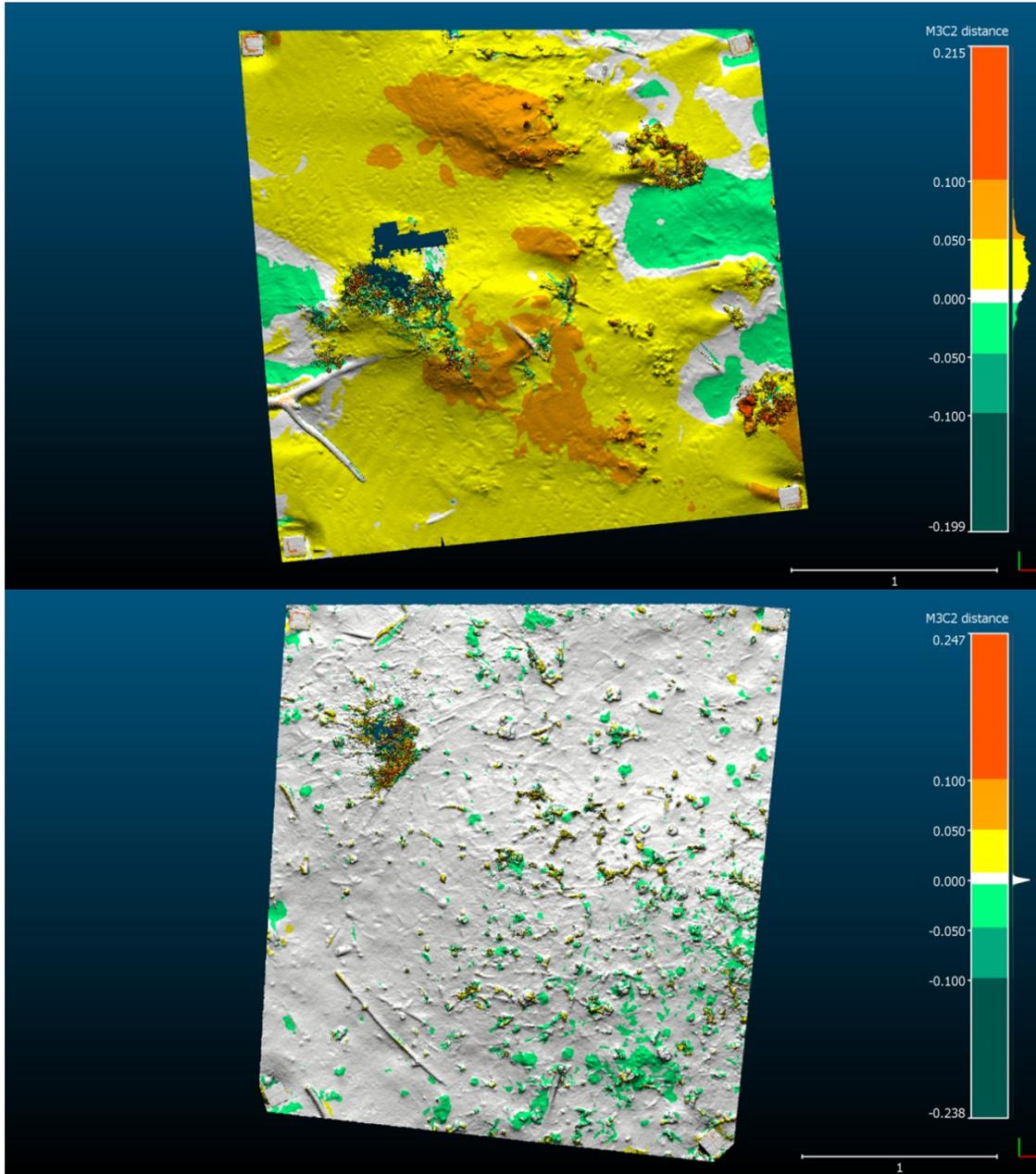


Figura I – Confronto C1. Dall’alto in basso BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

Confronto C2 tra i rilievi R2-R3 (29.05.14-20.06.14)



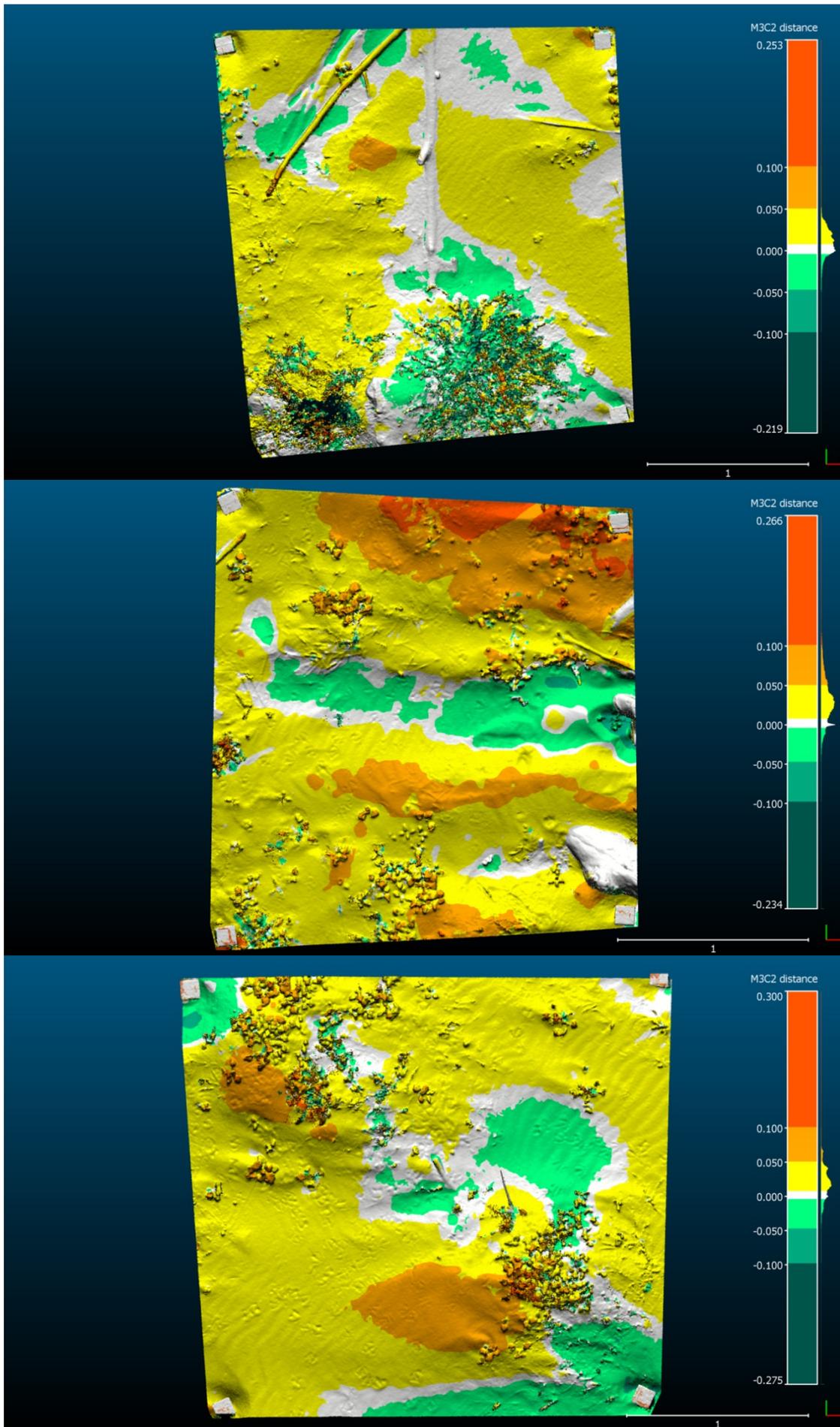
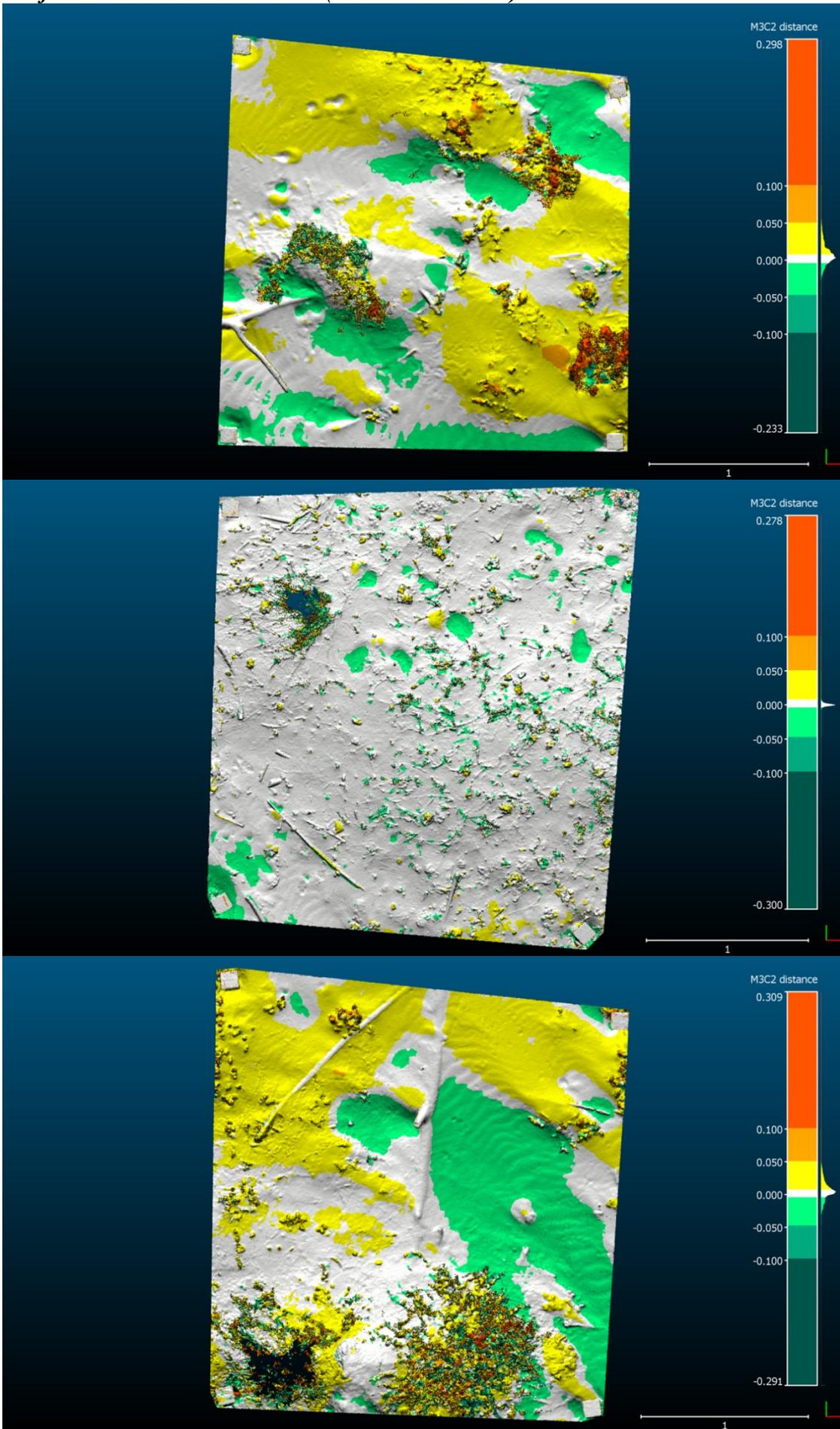


Figura II - Confronto C2. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2.

Confronto C3 tra i rilievi R3-R4 (20.06.14-07.07.14)



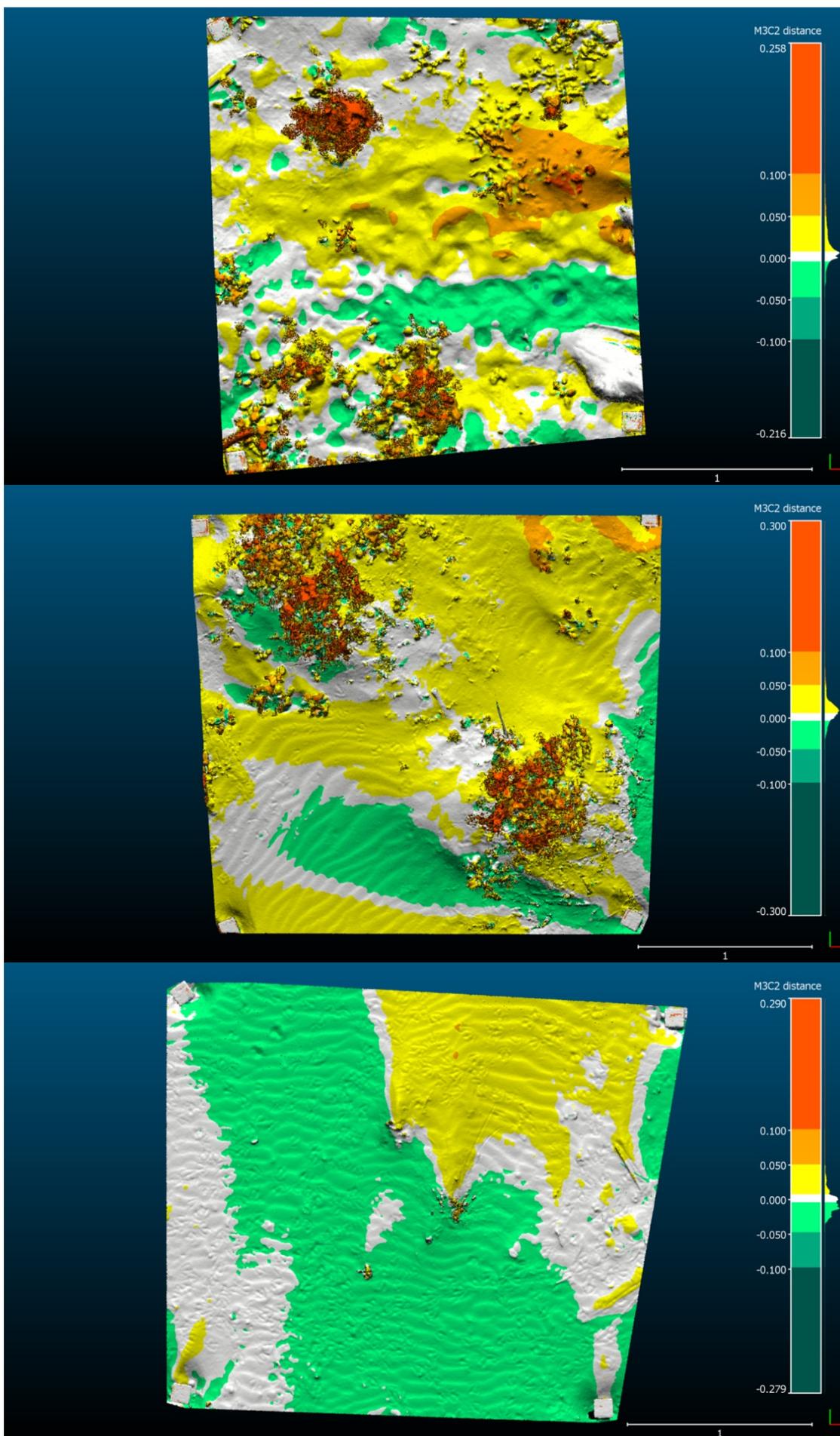
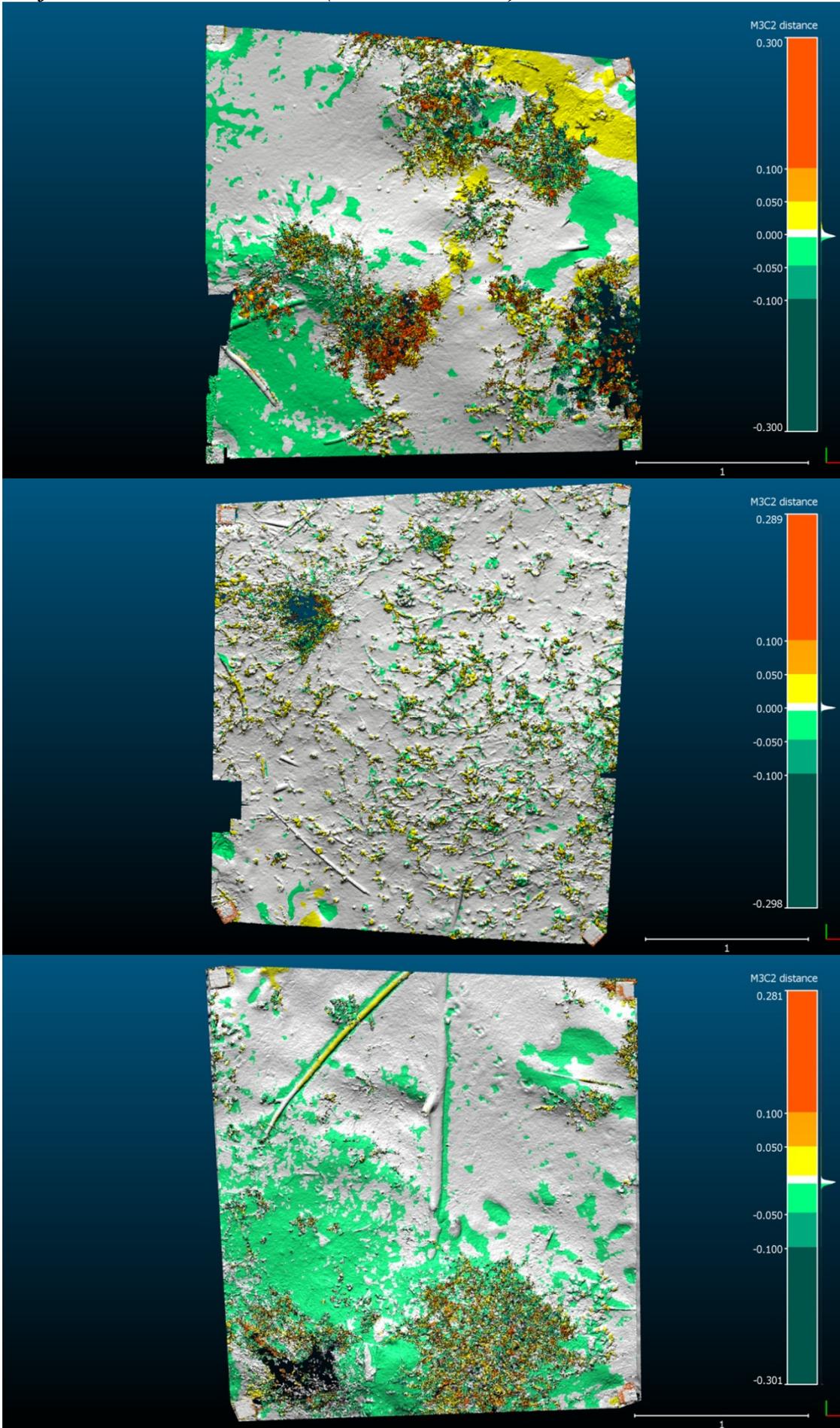


Figura III - Confronto C3. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

Confronto C4 tra i rilievi R4-R5 (07.07.14-28.07.14)



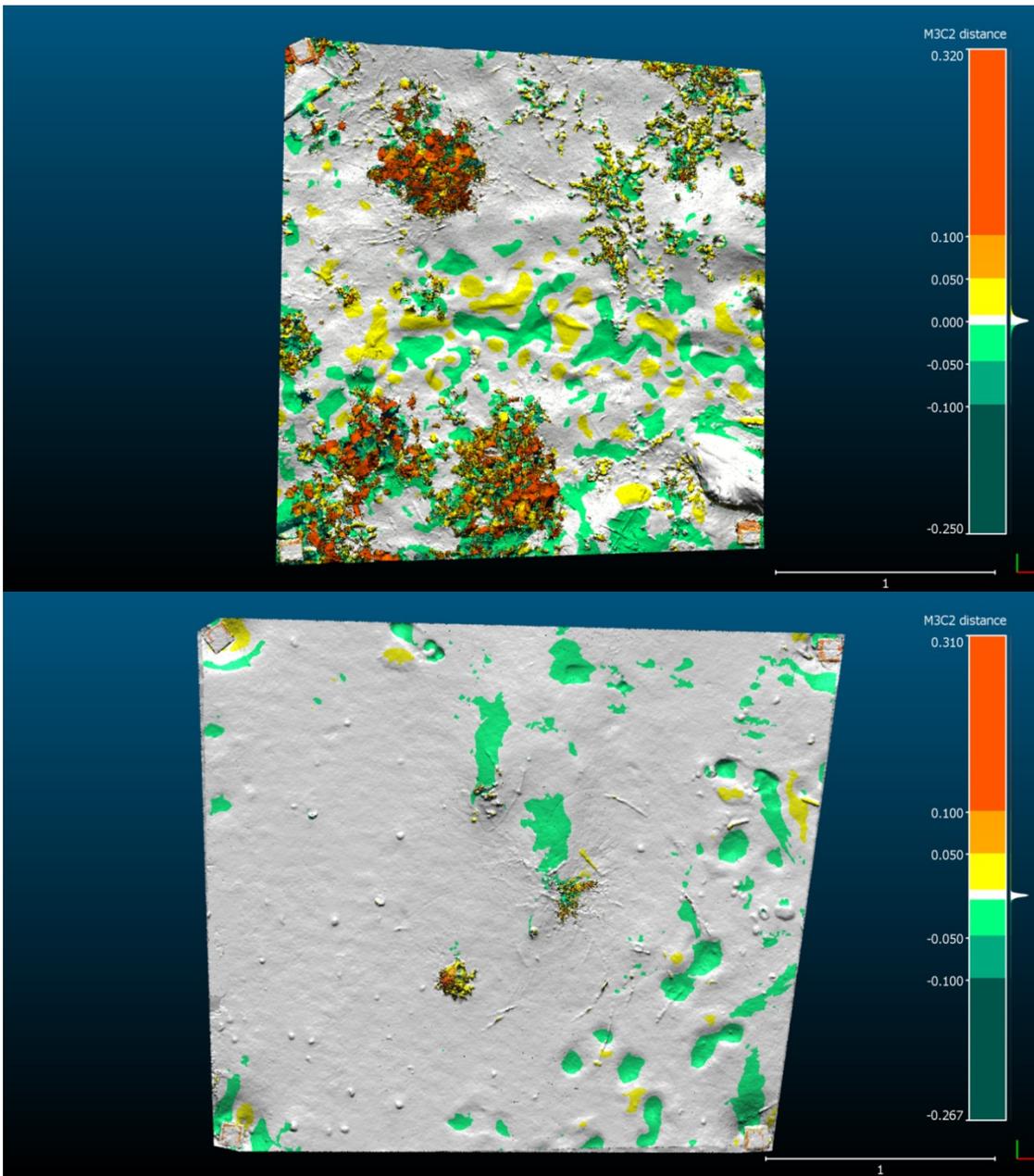
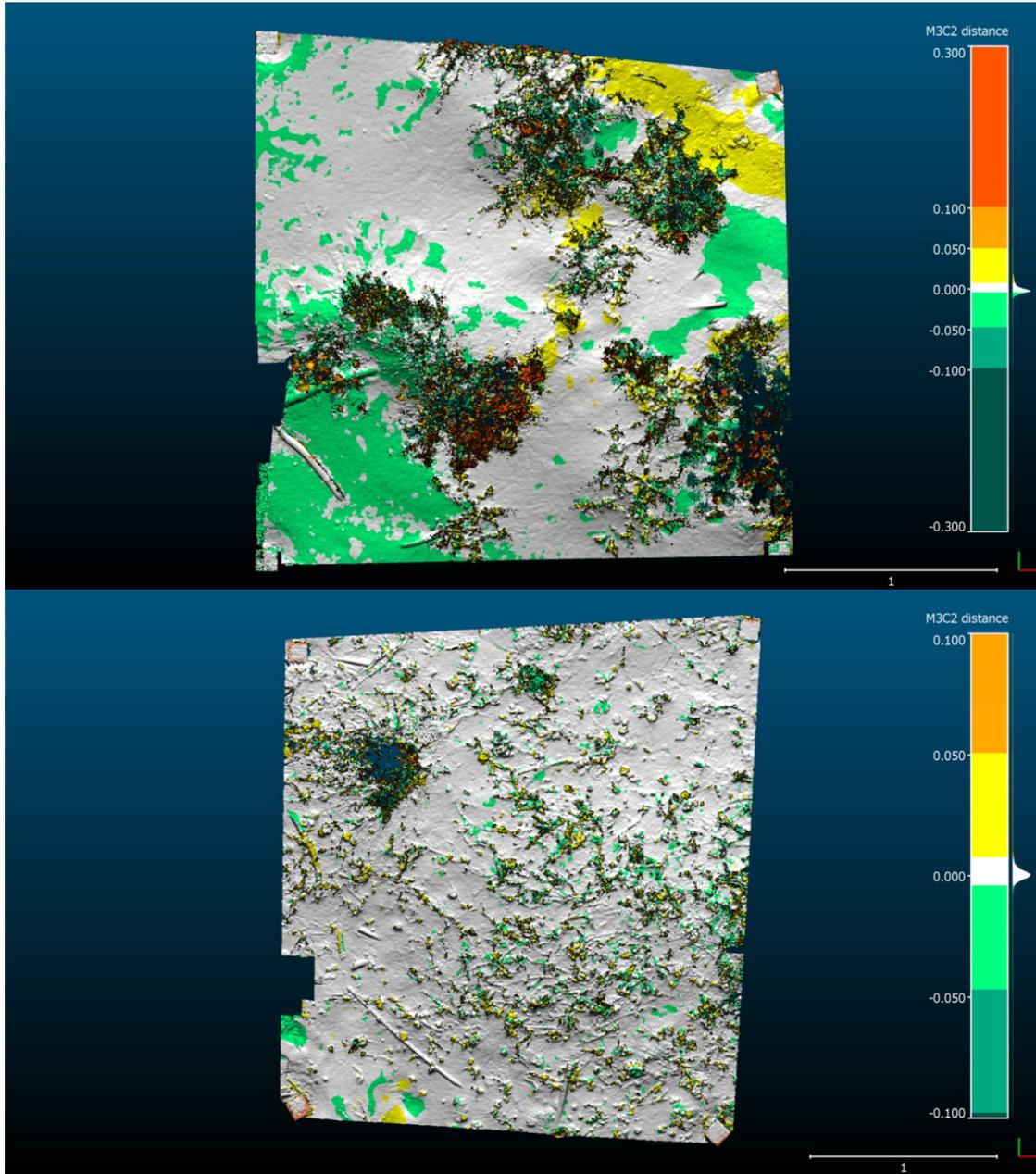


Figura IV - Confronto C4. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS3.

Confronto C5 tra i rilievi R5-R6 (28.07.14-25.08.14)



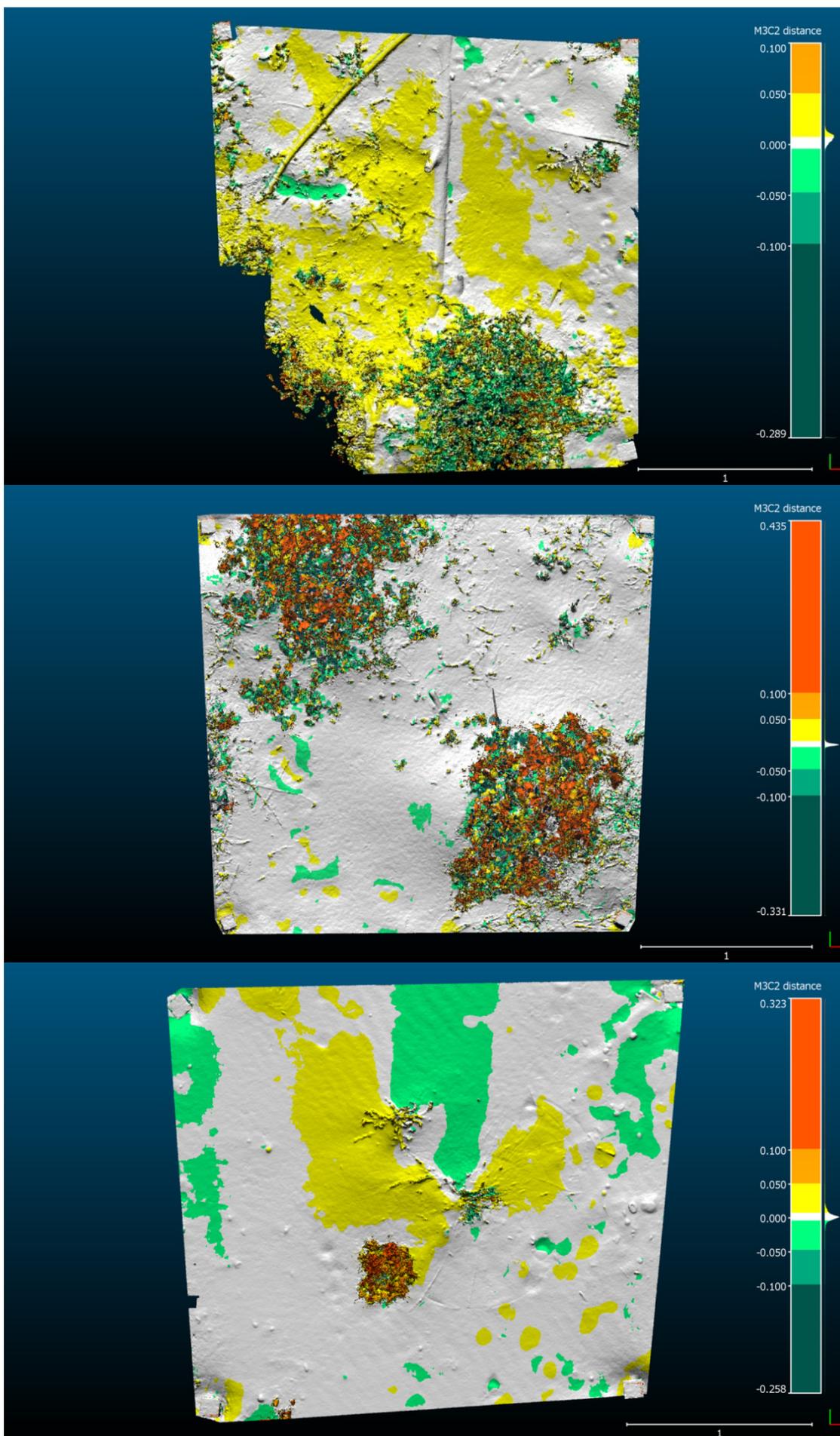
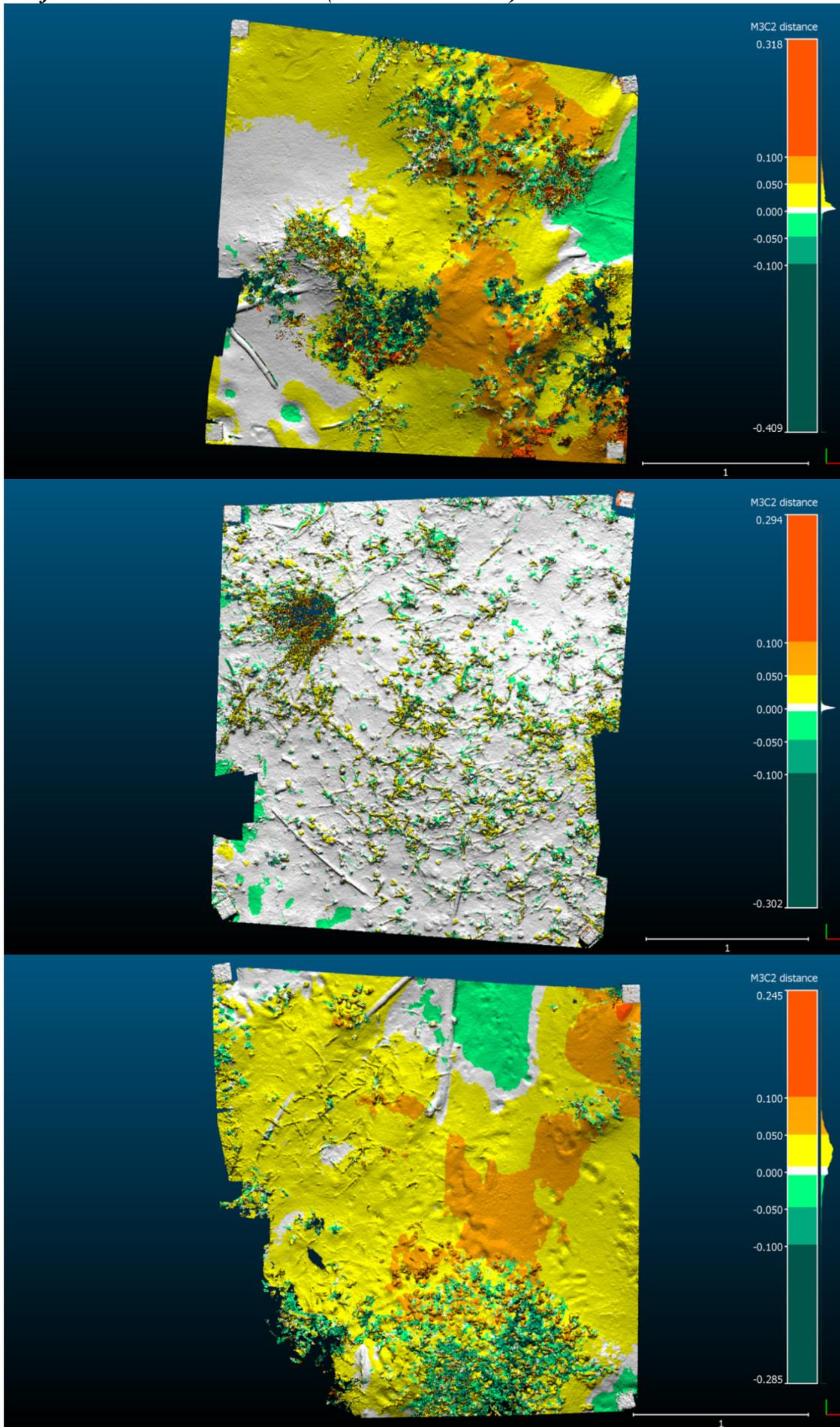


Figura V - Confronto C5. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS2, BS3.

Confronto C6 tra i rilievi R6-R7 (25.08.14-19.09.14)



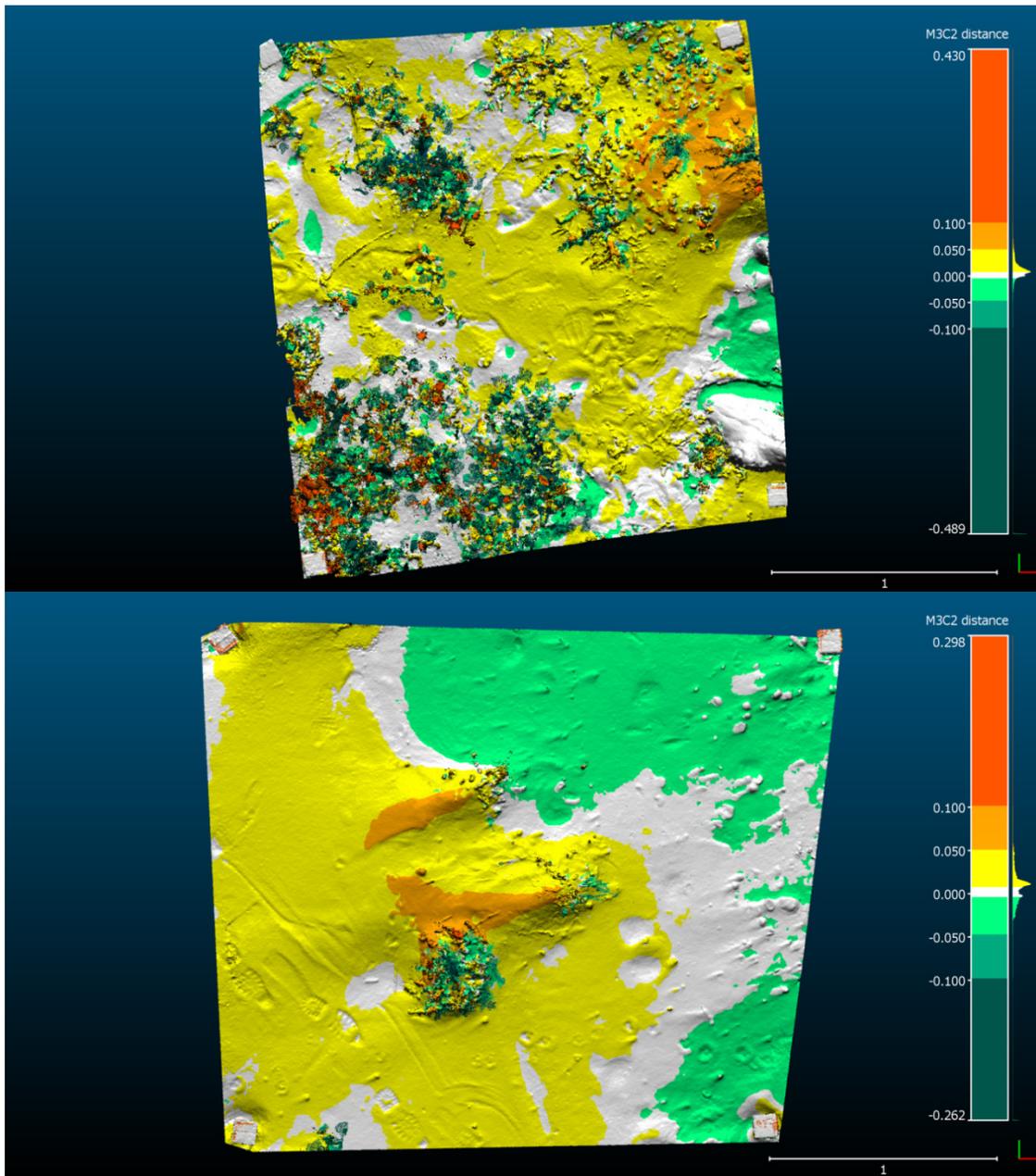
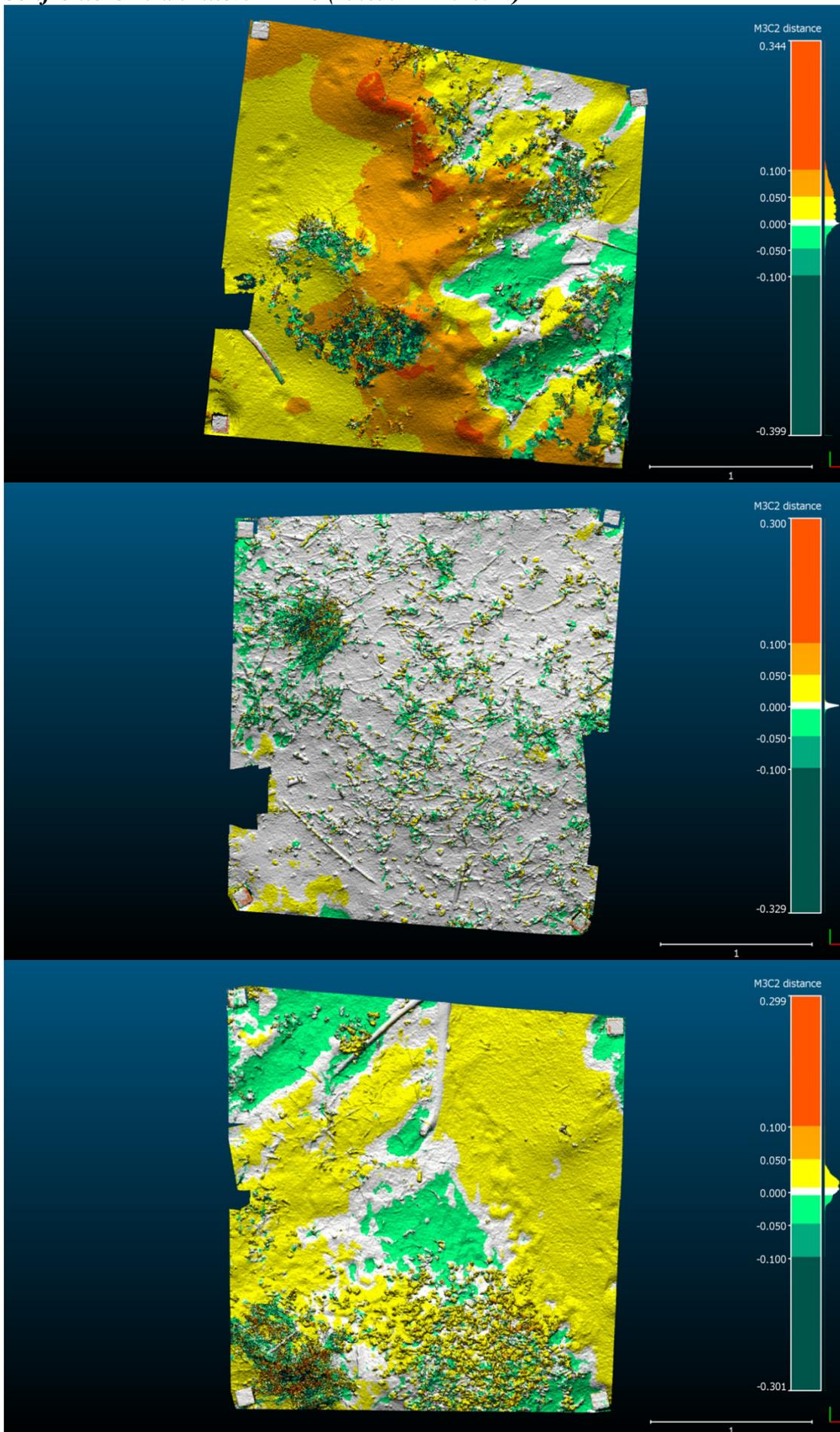


Figura VI - Confronto C6. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS3.

Confronto C7 tra i rilievi R7-R8 (19.09.14-14.10.14)



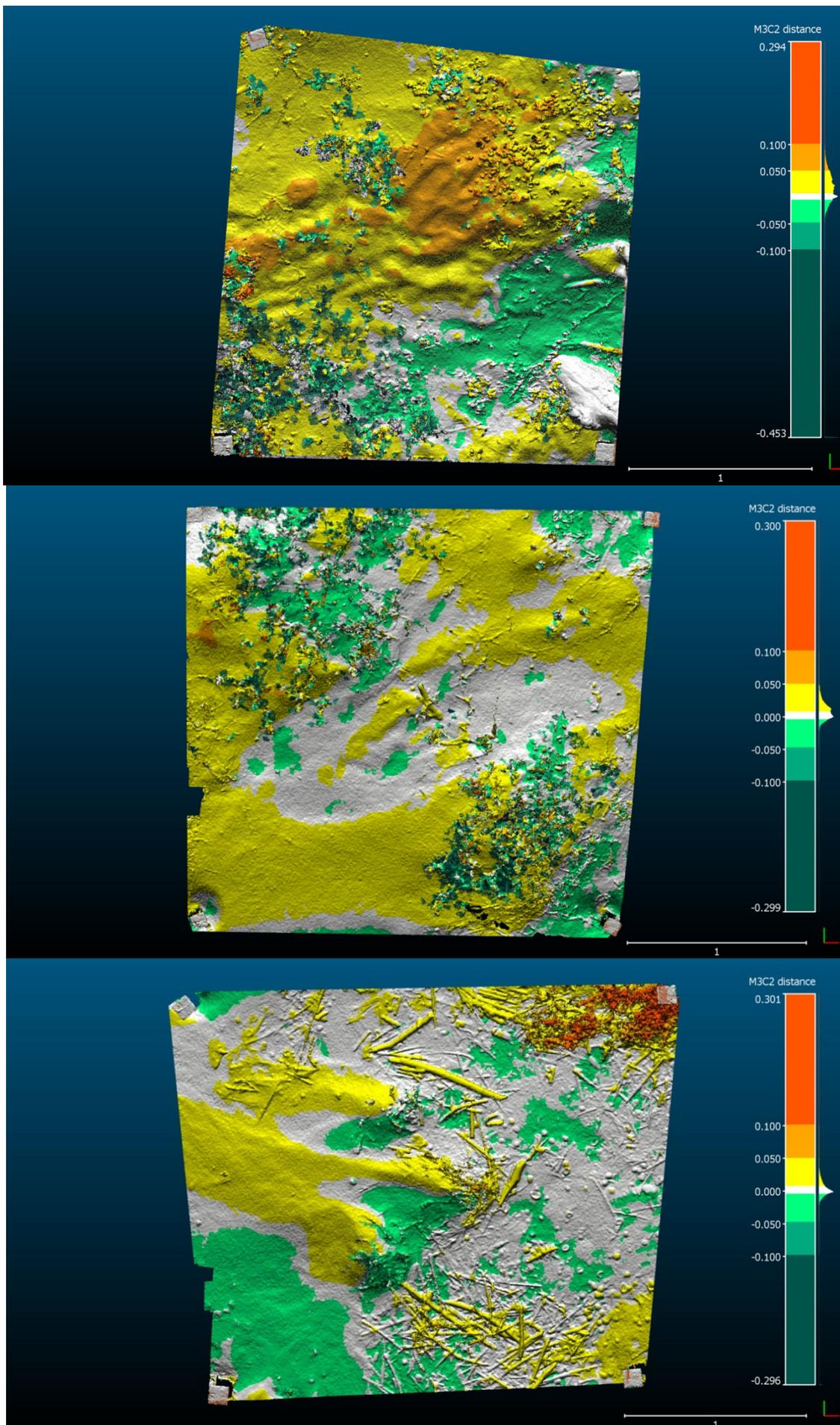
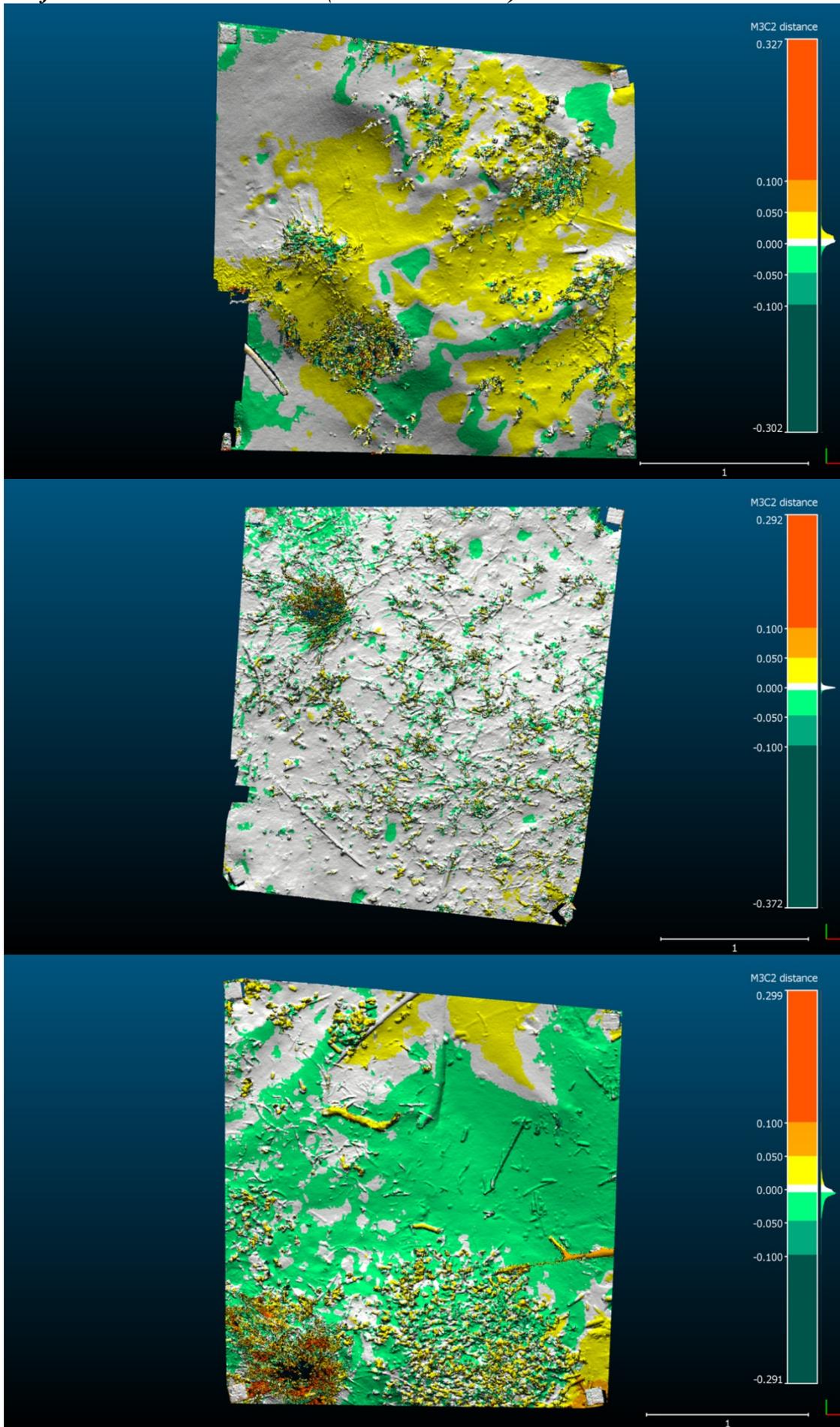


Figura VII - Confronto C7. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

Confronto C8 tra i rilievi R8-R9 (14.10.14-12.11.14)



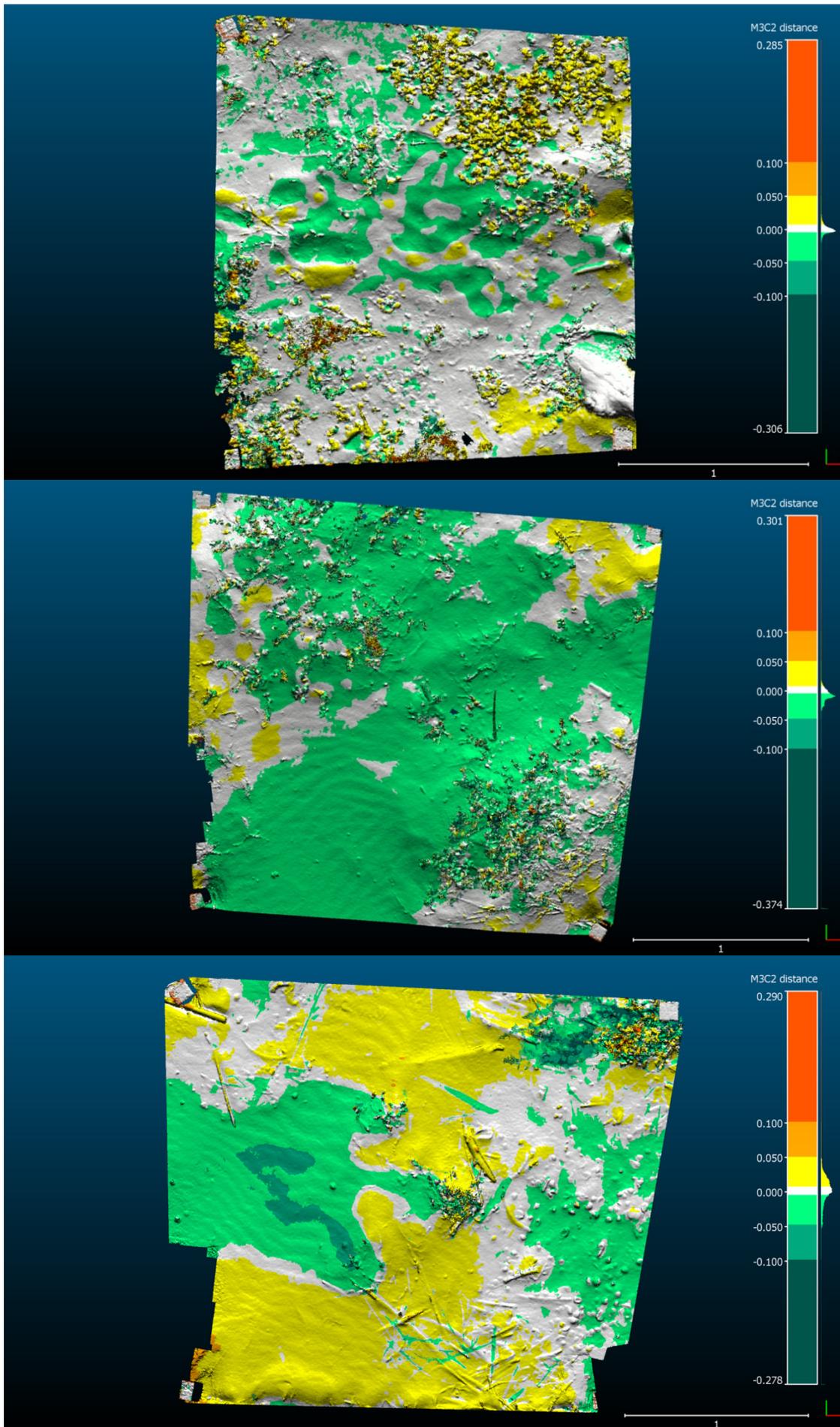
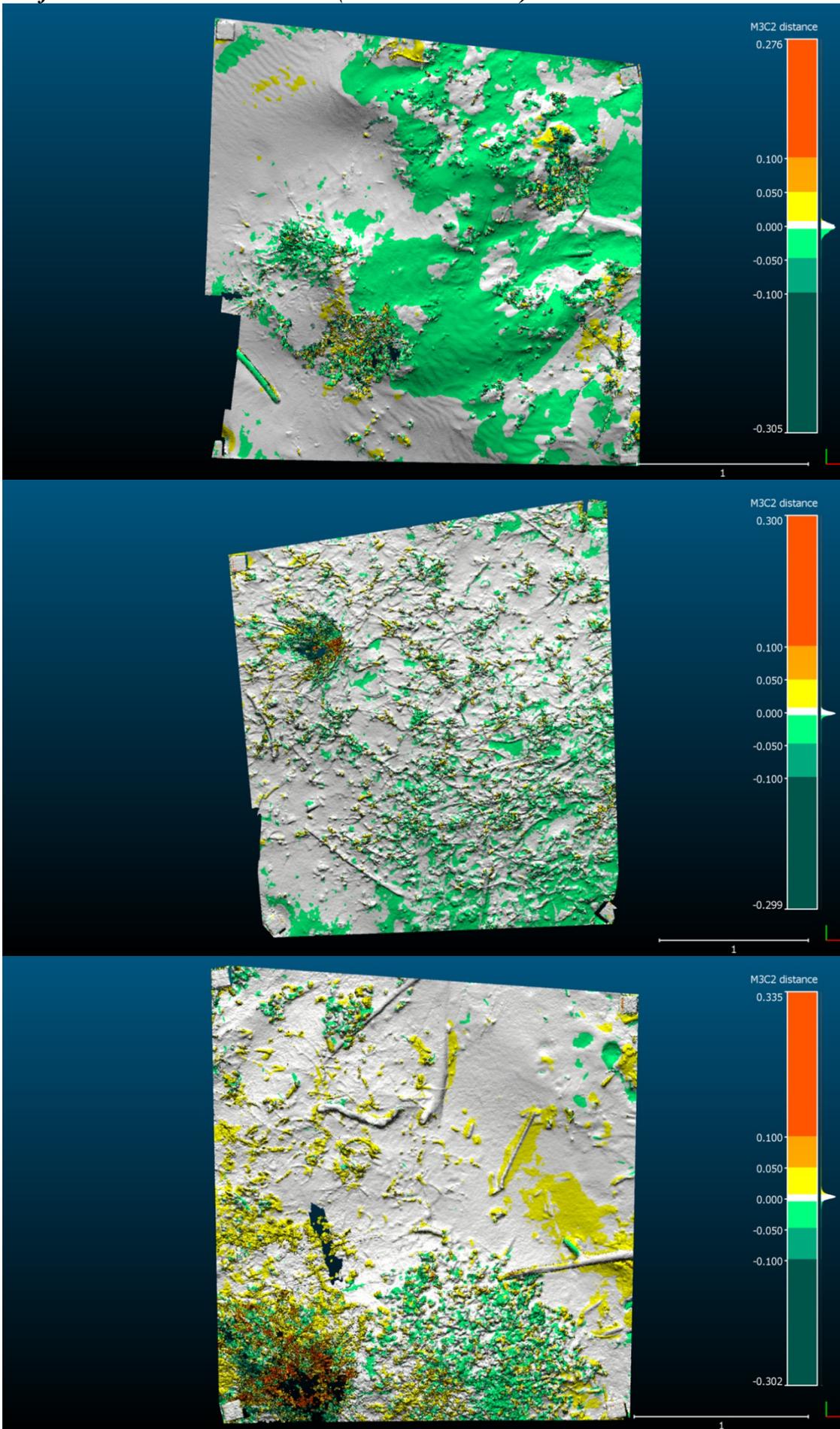


Figura VIII - Confronto C8. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

Confronto C9 tra i rilievi R9-R10 (12.11.14-10.12.14)



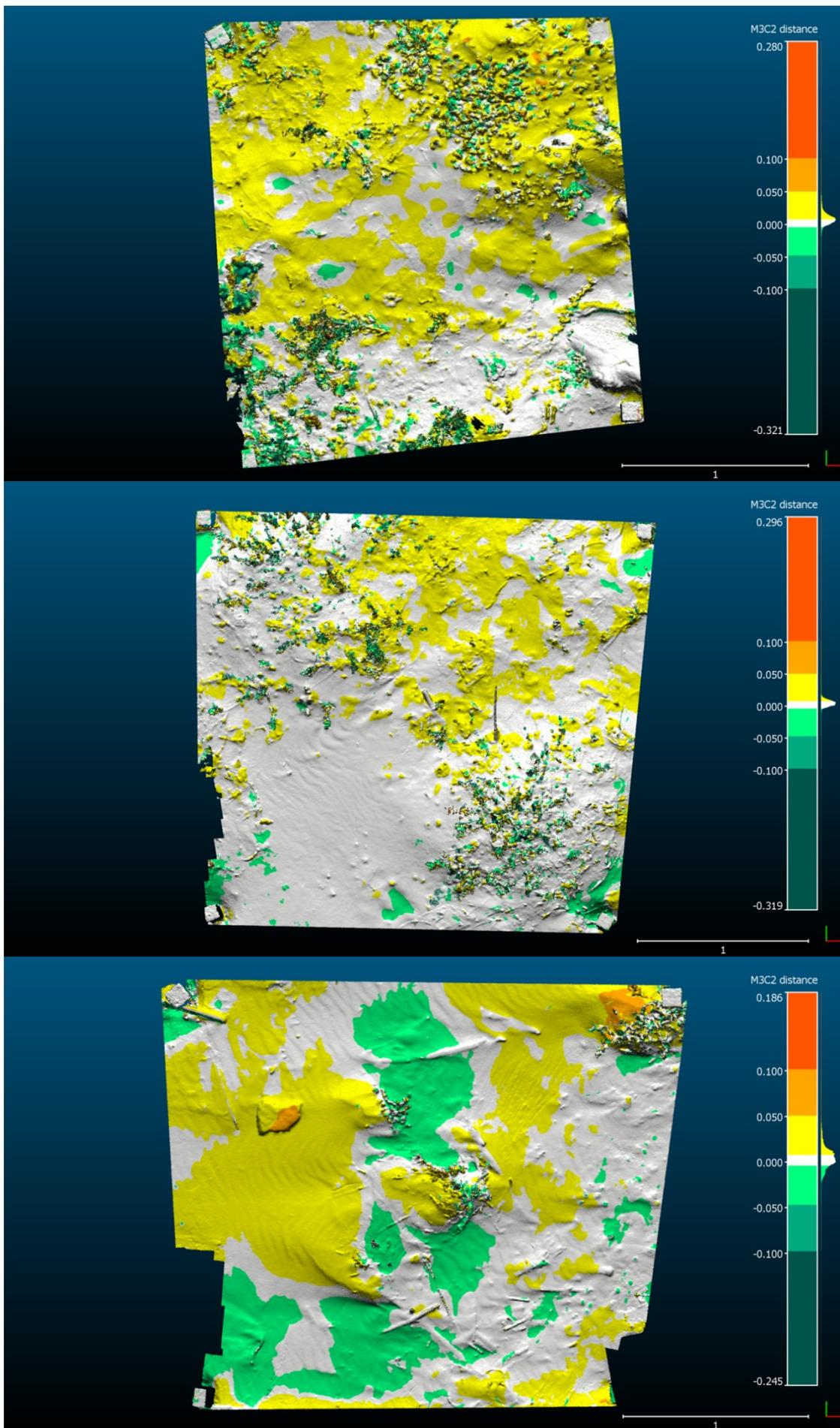
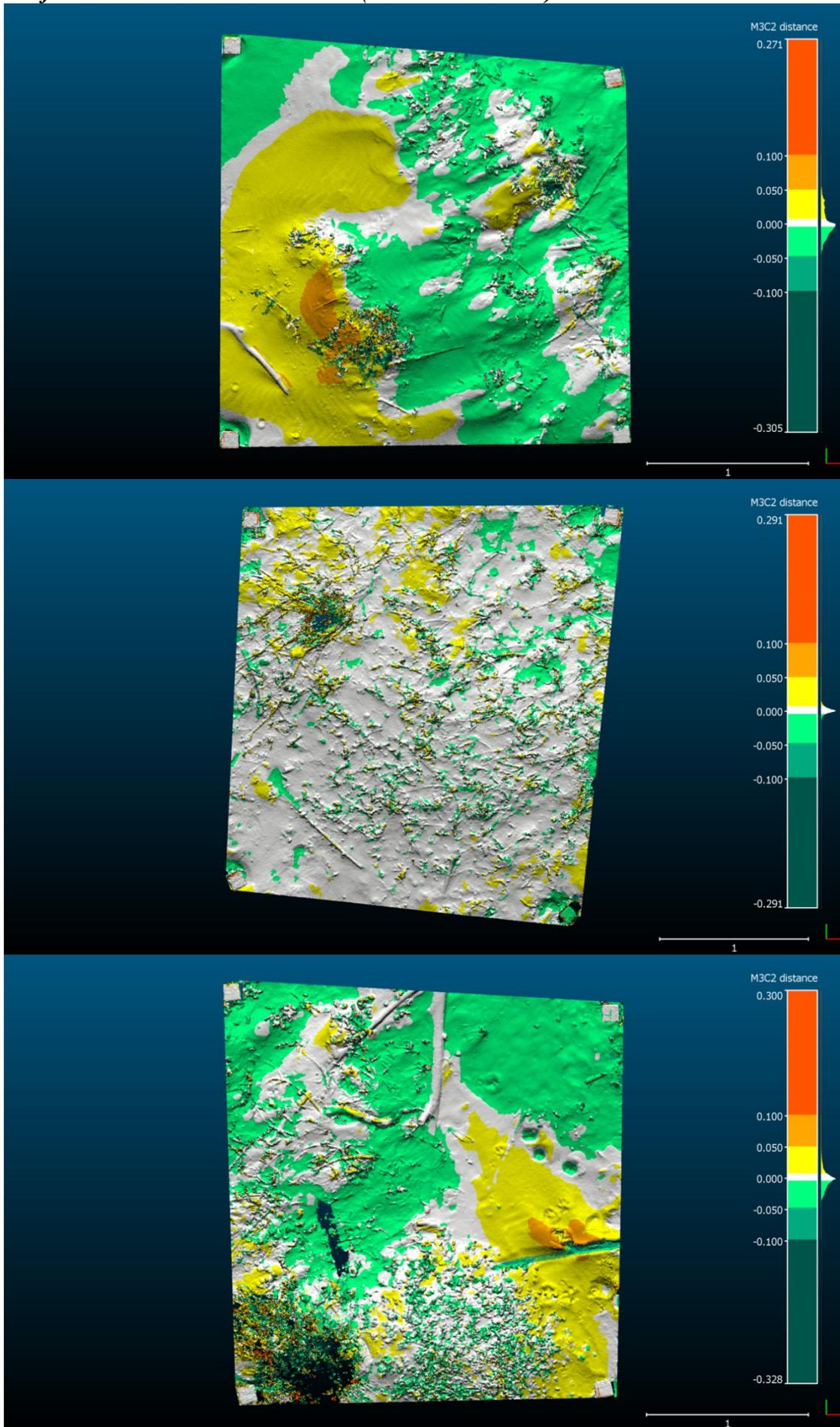


Figura IX - Confronto C9. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

Confronto C10 tra i rilievi R10-R11 (10.12.14-09.01.15)



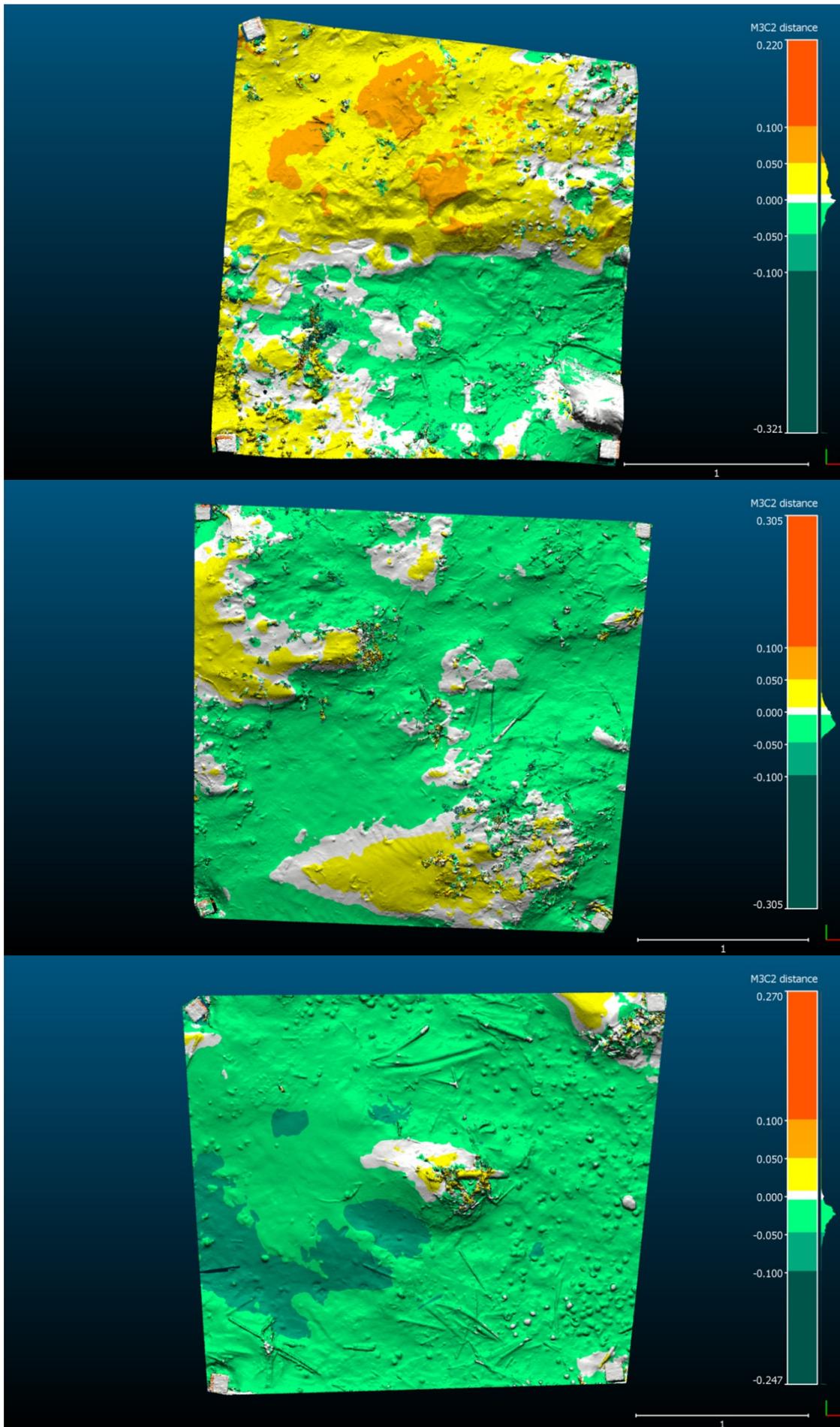
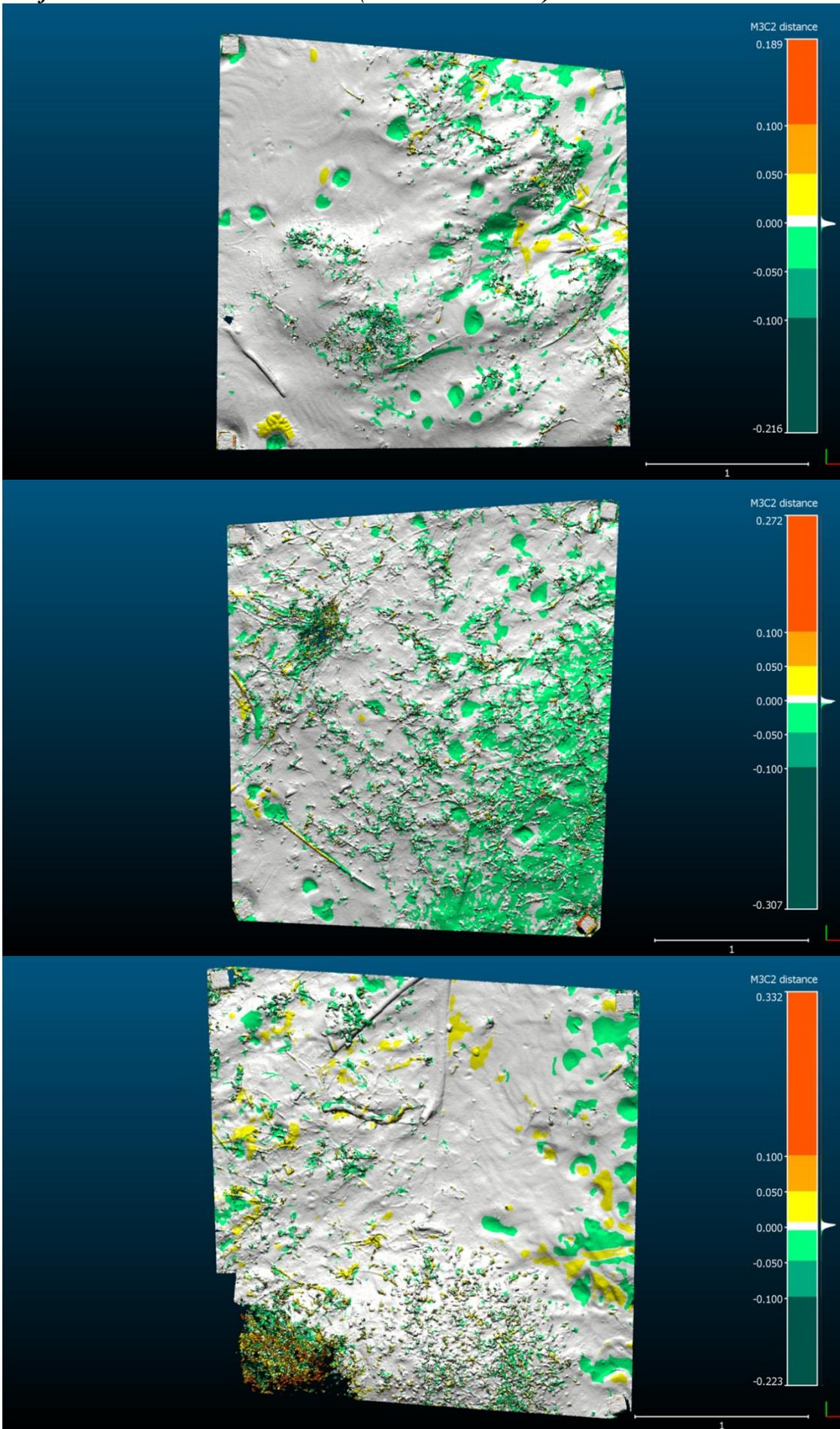


Figura X - Confronto C10. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

Confronto C11 tra i rilievi R11-R12 (09.01.15-02.02.15)



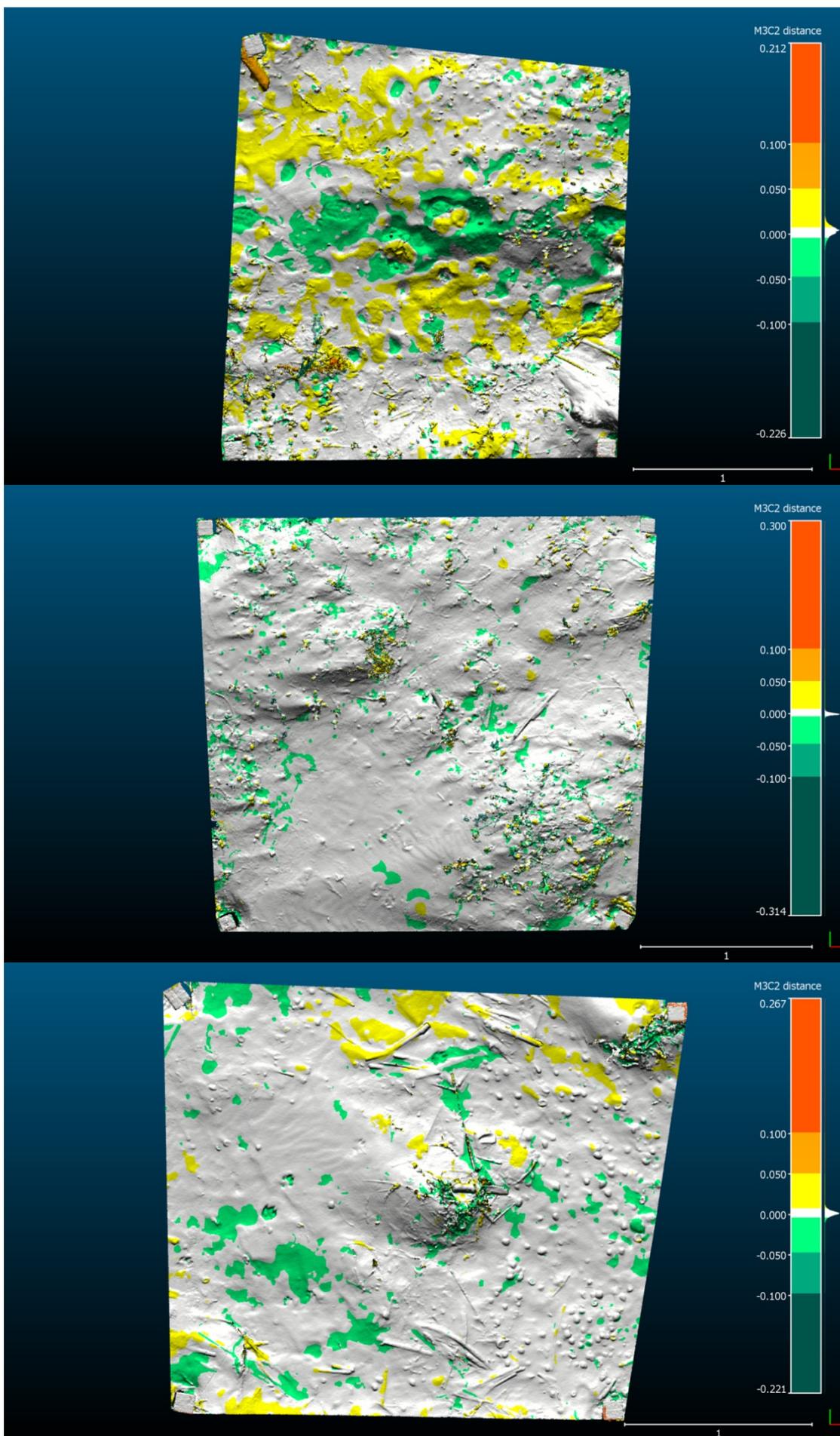


Figura XI - Confronto C11. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

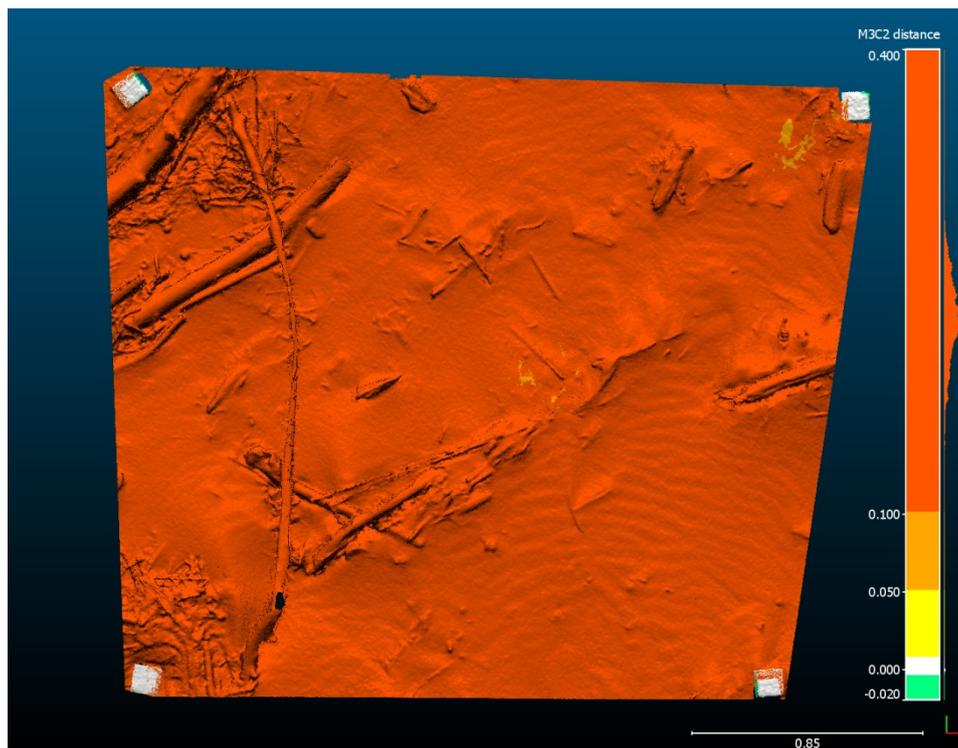
Confronto C12 tra i rilievi R12-R13 (02.02.15-27.02.15)

Figura XII - Confronto C12. Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.

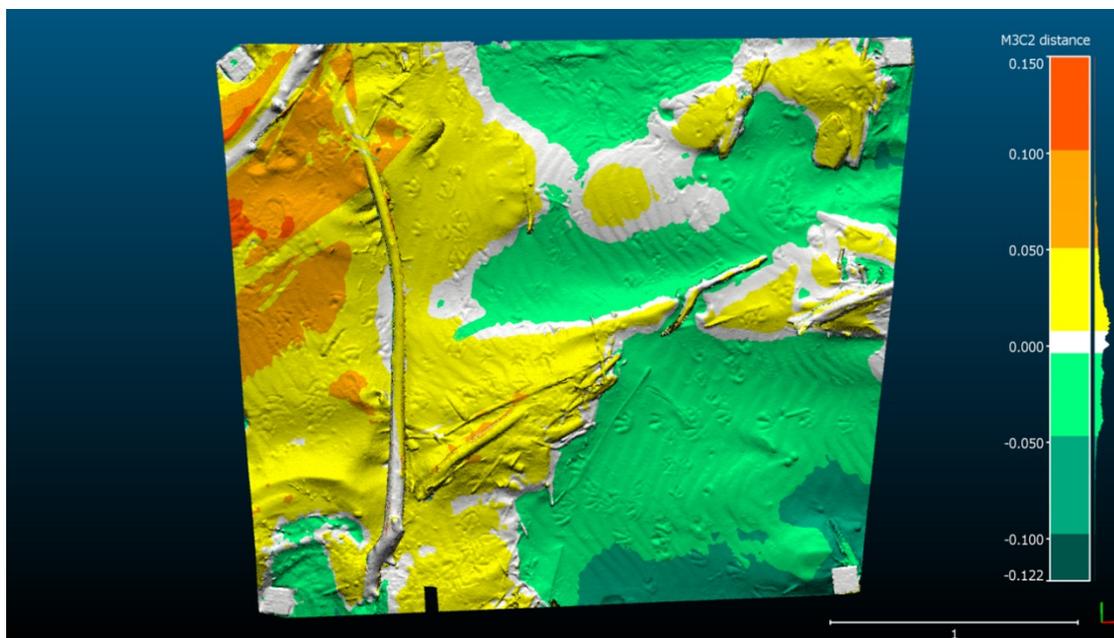
Confronto C13 tra i rilievi R13-R14 (27.02.15-14.04.15)

Figura XIII - Confronto C13 Dall'alto in basso BN1, BN2, BN3, BS1, BS2, BS3.