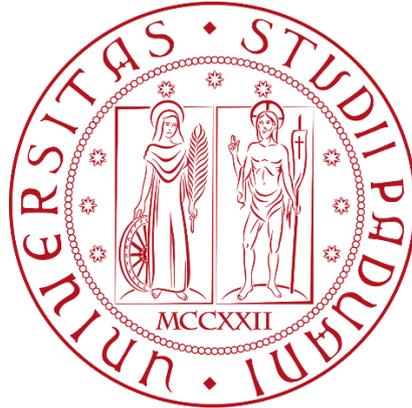


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E INDUSTRIALE



Prototipo di un indice di Early Warning per il rischio di allagamento
costiero: applicazione al litorale di Jesolo (VE)

Relatore

Prof.ssa Chiara Favaretto

Laureando
Matteo Salvalaggio
Matricola 2091176

A.A. 2023/2024

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la professoressa Chiara Favaretto per la disponibilità, professionalità e dedizione. La ringrazio per avermi fatto appassionare al tema del rischio costiero e per avermi dato la possibilità di approfondire un tema particolarmente rilevante al giorno d'oggi.

Ringrazio mamma e papà per avermi supportato e per aver contribuito a farmi diventare chi sono oggi.

Ringrazio Catia per essermi sempre stata vicino, senza di lei sarebbe stato tutto molto più difficile.

Ringrazio gli amici di una vita e quelli conosciuti nell'ultimo periodo per la spensieratezza, le risate e le riflessioni.

Non è un caso, penso, che il tennis usi il linguaggio della vita. Vantaggio, servizio, errore, break, love (zero), gli elementi basilari del tennis sono quelli dell'esistenza quotidiana, perché ogni match è una vita in miniatura. Perfino la struttura del tennis, il modo in cui i pezzi entrano l'uno nell'altro come in una matrioska, rispecchia la struttura delle nostre giornate. I punti diventano game che diventano set che diventano tornei, ed è tutto collegato così strettamente che ogni punto può segnare una svolta. Mi ricorda il modo in cui i secondi diventano minuti che diventano ore e ogni ora può essere la più bella della nostra vita. O la più buia. Dipende da noi.

André Agassi

Ad Alfredo

SOMMARIO

L'aspetto del mondo di oggi è significativamente diverso da quello che si poteva osservare fino a 50 anni fa, dalla rivoluzione industriale in poi l'uomo ha avidamente sfruttato le risorse naturali del pianeta per raggiungere livelli di produttività che al giorno d'oggi ci costringono a vivere in un mondo alterato, lontano dalle sue condizioni originarie.

I cambiamenti climatici hanno impatti sempre più tangibili nella vita quotidiana di ogni essere umano, sia esso inserito in un contesto urbanizzato o nei luoghi più remoti del globo; Uno degli effetti più concreti dei cambiamenti climatici è l'aumento del livello di mare e oceani.

Nel corso di questo elaborato verrà approfondito il fenomeno degli allagamenti lungo il litorale di Jesolo (VE) mediante analisi di dati storici riguardanti livelli del mare e onde. Tali informazioni verranno poi confrontate con le difese presenti lungo il litorale per determinare quando e dove si sono manifestati nel passato eventi alluvionali.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è la determinazione di un indice di Early Warning, ovvero un sistema che permetta di riconoscere tempestivamente eventi alluvionali potenzialmente pericolosi permettendo di avvisare con congruo anticipo la popolazione residente garantendo loro la possibilità di mettersi al riparo e allo stesso tempo circoscrivere le aree pericolose. A partire da un'analisi storica sarà possibile successivamente applicare lo stesso metodo con dati previsionali futuri andando ad indagare preventivamente il livello del mare e osservando i possibili superamenti con le difese installate sul litorale.

ABSTRACT

What the world looks like today is significantly different from what could be observed up to 50 years ago; from the industrial revolution onward, humans have greedily exploited the planet's natural resources to achieve levels of productivity that nowadays force us to live in an altered world far from its original conditions.

Climate change has increasingly tangible impacts on the daily lives of every human being, whether embedded in an urbanized context or in the remotest places on the globe; One of the most concrete effects of climate change is rising sea and ocean levels.

In this paper, the phenomenon of flooding along the Jesolo (VE) coastline will be investigated through analysis of historical data regarding sea levels and waves. This information will then be compared with the defenses along the shoreline to determine when and where flooding events have occurred in the past.

The objective of this thesis work is the determination of an Early Warning index, i.e., a system to recognize potentially dangerous flood events in a timely manner by allowing the resident population to be warned well in advance, ensuring that they can take shelter and at the same time circumscribe dangerous areas. From a historical analysis, it will then be possible to apply the same method with future forecast data by going to investigate the sea level in advance and observing possible exceedances with the defenses installed on the shoreline.

INDICE

1. Introduzione.....	9
1.1 Obiettivi della tesi.....	9
1.2 Struttura della tesi.....	9
2. Background teorico.....	11
2.1 Allagamento costiero.....	11
2.1.1 Livello medio del mare.....	12
2.1.2 Marea astronomica.....	12
2.1.3 Sovralzo metereologico.....	13
2.1.4 Onde.....	14
2.1.5 Sovralzo dell'onda (Set up).....	14
2.1.6 Risalita dell'onda (Run up).....	15
2.2 Cambiamenti climatici e Sea Level rise.....	16
2.3 Subsidenza.....	20
2.4 Sistemi e indici di Early Warning (EW).....	22
2.4.1 Rischio mareggiate.....	24
2.4.2 Total Water Level and Coastal Forecast Viewer.....	26
2.4.3 Sistema di allerta per la costa Emiliano - Romagnola.....	29
3. Area di studio.....	31
3.1 Informazioni sulle attività turistico-balneari.....	32
3.2 Caratteristiche del litorale veneto.....	33
3.2.1 Celle litoranee.....	35
3.3 Litorale di Jesolo (Cella VE5).....	39
3.3.1 Analisi dei sedimenti.....	39
3.3.2 Analisi della linea di riva.....	41
3.3.3 Sea level rise e subsidenza locale.....	42
4. Metodologia.....	45
4.1 Dati disponibili.....	49
4.2 Dati di livello e onde.....	49
4.3 Dati topografici.....	53
4.4 Mareggiate estreme recenti.....	56
5. Risultati.....	61
5.1 Sistema di difesa a Jesolo.....	61

5.2	Calcolo del livello totale del mare	64
5.3	Indice di Early Warning	68
5.4	Eventi individuati dall'indice.....	70
6.	Conclusioni.....	79

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1	Contributi livello del mare (da Regione Emilia-Romagna).....	12
Figura 2	Marea astronomica: quadratura e sizigia (da Ispra Venezia)	13
Figura 3	Processo di frangimento dell'onda e set up (da Ispra Venezia).....	15
Figura 4	Componente di run up dell'onda (da Davide Gaeta)	15
Figura 5	Bilancio energetico terrestre (CNR).....	17
Figura 6	Aumento delle temperature e causa (IPCC)	18
Figura 7	Scenari nel tempo (IPCC AR6)	19
Figura 8:	Contributo della subsidenza nel fenomeno dell'eustatismo.....	21
Figura 9	Subsidenza sul litorale veneto (da Relazione Coste)	21
Figura 10:	Subsidenza locale.....	22
Figura 11	EW per il rischio di esondazione fluviale (Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review).....	23
Figura 12	EW per il rischio sismico (Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review).....	23
Figura 13	Aree sotto il livello del mare (EEA Europa)	25
Figura 14:	Ritaglio del visualizzatore USGS.....	27
Figura 15:	Ritaglio analisi possibile erosione della duna.....	27
Figura 16:	Ritaglio analisi scenario di sormonto della duna	28
Figura 17:	Indicatore SCW	29
Figura 18:	Indicatore BWD	30
Figura 19:	Ritaglio del visualizzatore per l'EW in Emilia-Romagna	30
Figura 20	Litorale veneto (Regione veneto).....	31
Figura 21	Indagine economica ISTAT 2021	32
Figura 22	Presenze turistiche nel comprensorio Jesolo- Eraclea (ISTAT).....	33
Figura 23	Sistema di foci del veneto (Wordpress).....	34
Figura 24:	Disposizione spaziale delle celle litoranee (da Gestione integrata della zona costiera)	38
Figura 25:	Variazione della linea di riva da rilievi LIDAR	41
Figura 26	Scenari nell'area mediterranea (IPCC AR6).....	42
Figura 27:	Subsidenza lungo il litorale di Jesolo.....	43
Figura 28:	schematizzazione altezze significative	46
Figura 29:	Duna invernale (da geoapp.eu)	47
Figura 30:	Duna invernale e interferenza con piede delle opere (da geoapp.eu).....	47
Figura 31:	Schema a blocchi per processo logico di valutazione degli eventi.....	49

Figura 32: Localizzazione del punto di rilevamento delle onde.....	50
Figura 33: Livelli	50
Figura 34: Sea Level Rise	51
Figura 35: Livelli corretti.....	52
Figura 36: Onde.....	52
Figura 37: Schematizzazione DSM/STM.....	53
Figura 38: Visualizzazione del LIDAR in GIS.....	54
Figura 39: Posizione batimetria oggetto di studio.....	55
Figura 40: Sviluppo longitudinale del fondale	55
Figura 41 a sx: Erosione localizzata durante l'evento del 06/11/2000 (da Piano delle Acque del Comune di Jesolo), a dx: allagamento durante l'evento del 1/11/2012 (Fonte https://www.claudiovianello.it/)	56
Figura 42 a sx: Strade ed infrastrutture allagate durante l'evento del 01/11/2012 (Fonte https://www.claudiovianello.it/)	57
Figura 43 a sx: Strade ed infrastrutture allagate durante l'evento del 11/11/2012 (Fonte https://www.claudiovianello.it/)	57
Figura 44 a sx: Mareggiata colpisce la spiagge a sx durante evento del 16/05/2013 (Fonte https://www.claudiovianello.it/) a dx durante evento del 29/10/2018 (da Venezia Today)	58
Figura 45 a sx: Mareggiata colpisce la spiagge a sx durante evento del 01/11/2018 (Fonte TeleVenezia) a dx durante evento del 04/04/2019 (da Venezia radiotv)	58
Figura 46 a sx: Mareggiata si addentra su Piazza Mazzini durante evento del 12/11/2019 (Fonte Venezia Today) a dx Mareggiata si addentra su Piazza Milano durante evento del 12/11/2019 (da Venezia radiotv)	59
Figura 47 a sx: Danni sulla spiaggia durante l'evento del 12/11/2019 (da Sky Tg 24) ...	59
Figura 48 a sx: Danni sulla spiaggia durante l'evento del 17/11/2019 (da Eco Vicentino)	60
Figura 49: Altezze significative opere di difesa.....	62
Figura 50: Disposizione spaziale delle difese lungo il litorale	63
Figura 51: Altezza media e minima delle difese lungo il litorale	63
Figura 52: Altezze medie e minime per tipologia di opera.....	64
Figura 53: pendenza della spiaggia	65
Figura 54: Run up e set up rispetto all'altezza d'onda	65
Figura 55: Onde e rispettiva quota di run up e set up.....	66
Figura 56: livello finale del mare	66
Figura 57: Superamenti nel tempo	68
Figura 58: Interazione opera – onde.....	69
Figura 59: Eventi di superamento delle difese.....	69
Figura 60: Eventi di mareggiata rilevati dall'indice	71
Figura 61: Eventi di mareggiata più gravosi rilevati dall'indice	72
Figura 62: Mappa degli allagamenti per tre eventi di mareggiata.....	74
Figura 63: Classificazione degli eventi secondo la durata	77

1. INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi la parola cambiamento climatico è un tema spesso ricorrente e accompagnato da esiti tipicamente negativi, l'attività antropica ha significativamente modificato il pianeta terra, i suoi ritmi e cicli naturali portandolo a manifestare queste alterazioni con un aumento generalizzato delle temperature in tutto il mondo.

Uno degli esiti più tangibili del cambiamento climatico è l'aumento del livello medio del mare, dovuto allo scioglimento di ghiacciai e calotte polari e l'inasprimento degli eventi meteo avversi come tempeste e alluvioni; Le località marittime sono ovviamente le dirette interessate da questa problematica, in quanto livelli del mare più alti aggravati da forzanti meteomarine estreme comportano un maggior rischio in termini di mareggiate.

Risulta di primaria importanza studiare un sistema che in relazione agli eventi meteo registrabili e prevedibili in un'area possa dare in risposta dei parametri così da poter informare la popolazione residente in tali aree con un congruo lasso di tempo al fine di permettere loro di mettersi al riparo o per lo meno tenersi a debita distanza da aree particolarmente esposte, questo sistema viene definito di Early Warning ovvero di allarme preventivo.

1.1 Obiettivi della tesi

Obiettivo di questo elaborato è la produzione di un prototipo di Early Warning a tutela della popolazione del litorale veneto e dei beni presenti nell'area (una delle più popolari in Italia in termini di turismo), un'area che da anni è bersaglio di alluvioni e mareggiate significative che comportano annualmente perdite di milioni di euro.

Si definisce prototipo in quanto analizzando dati storici verrà delineato un indice che permetta di confermare eventi di mareggiata avvenuti nel passato, così da avere un metodo valido per poter prevedere eventi futuri mediante analisi delle previsioni dei livelli del mare.

1.2 Struttura della tesi

Il seguente elaborato prevede innanzitutto un'analisi teorica di quelli che sono i fenomeni osservati in questo lavoro di tesi ovvero i fenomeni di mareggiata ed allagamento costiero per proseguire con il tema dell'Early Warning riportando esempi di sistemi attualmente in uso e il loro funzionamento. Verrà approfondito il tema dei cambiamenti climatici, elemento chiave nella determinazione nei fenomeni di allagamento costiero.

Si procede successivamente con lo studio dell'area di intervento, mettendo in luce le criticità della regione dal punto di vista geologico e idrologico e approfondendo i motivi per cui si rende necessario lo studio di un sistema a protezione di persone e beni.

Una volta definito l'ambito del lavoro di tesi si procede con l'elaborazione dati, studiando i livelli del mare e onde appartenenti a un dataset trentennale dal 1990 al 2020 e confrontando il livello del mare con le difese del litorale, questo processo permetterà di mettere in luce gli eventi evidenziati dall'indice e se ne valuterà la correttezza in relazione agli eventi metereologici documentati ed effettivamente accaduti.

Da un lavoro di indagine basato su eventi passati verrà esplicitato come l'indice potrà essere utilizzato per l'analisi futura di eventi estremi, arrivando così alla vera definizione di un indice di Early Warning.

2. BACKGROUND TEORICO

Per meglio comprendere i successivi paragrafi dell'elaborato si procede con un'analisi teorica dei fenomeni di allagamento costiero, un approfondimento sui sistemi e indici di Early Warning e infine una digressione sugli effetti dei cambiamenti climatici sul livello del mare e il tema della subsidenza.

2.1 Allagamento costiero

Il fenomeno dell'allagamento si manifesta mediante alluvioni ovvero eventi naturali che si verificano quando una grande quantità d'acqua si accumula per un determinato arco di tempo in un'area specifica, andando oltre quella che è la capacità di drenaggio del sito comportando disagi e danni alla popolazione interessata. Tipicamente un'alluvione in un centro abitato comporta l'impossibilità per la maggior parte dei mezzi di circolare, un'interruzione dei principali servizi come la corrente elettrica, danni economici a beni pubblici e privati e nei casi peggiori la perdita di vite umane.

Un fenomeno alluvionale può avere origine da precipitazioni oppure mareggiate, nello sviluppo di questo elaborato analizzeremo il secondo caso, ovvero le alluvioni dovute alle mareggiate. Le mareggiate possono comportare un'alluvione tipicamente quando non vi sono barriere tra il mare e il "target" della mareggiata ovvero l'area interessata dal fenomeno o quando la mareggiata supera la barriera precedentemente descritta.

La mareggiata è un evento meteo marino di forte intensità e proporzioni in grado di produrre impatti significativi sulla costa e le sue porzioni retrostanti. Ogni costa e ambiente reagisce in maniera univoca ad un evento anomalo, di fatto una mareggiata assume caratteristiche tipicamente locali in quanto fortemente dipendente dalle varie caratteristiche morfologiche della costa come batimetria dei fondali, profilo, orientazione e tipologia, dei suoi eventuali sistemi di difesa e dai beni presenti nel sistema costa.

La mareggiata è un evento complesso, caratterizzato da moto ondoso e vento forte, responsabile della traslazione di masse d'acqua sulla costa e della mobilitazione di grandi quantità di sedimento. Il moto ondoso è il principale responsabile dei processi di erosione costiera, mentre il sopralzo della superficie del mare (legato alla combinazione di diverse componenti mareali e del set-up da onda) è la causa principale dei fenomeni di inondazione marina. Nella seguente figura è possibile osservare uno schema dettagliato dei contributi del livello del mare:



Figura 1 Contributi livello del mare (da Regione Emilia-Romagna)

È possibile osservare quindi come un evento alluvionale dovuto a una mareggiata sia dovuto alla compresenza di diversi fattori che combinandosi comportano un generalizzato aumento delle altezze d'onda che impattando sulla costa ed eventualmente superando le barriere del retrospiaggia potrebbero causare conseguenze indesiderate nelle zone abitate.

Nell'analisi delle mareggiate sono quindi da considerarsi i seguenti parametri:

- Livello medio del mare;
- Marea astronomica;
- Sovralzo meteorologico;
- Sovralzo dell'onda (set up);
- Risalita dell'onda (run up).

2.1.1 Livello medio del mare

Il livello medio del mare esprime l'altezza media della superficie terrestre rispetto all'altezza dell'acqua marina, il termine è estremamente vasto in termini di significati attribuibili, perciò, è necessario differenziare un'analisi sul livello medio del mare condotta a livello locale (Alto Adriatico) o globale (Oceano Atlantico) oppure un'analisi relativa o assoluta:

- Livello del mare relativo (RSL): misura del livello del mare effettuata rispetto al fondale o terraferma;
- Livello del mare assoluto (SSH): misura del livello del mare effettuata rispetto al centro di massa della terra.

Il livello medio del mare si esprime a livello internazionale in:

- Metri sul livello del mare (m.s.l.m.);
- Metri sul livello marino medio (m.s.l.m.m.).

2.1.2 Marea astronomica

La marea astronomica è un fenomeno che comporta l'innalzamento del livello del mare per interazione della massa d'acqua con i corpi celesti quali Luna e Sole. Queste alterazioni sono prevedibili con largo anticipo, anche in termini di anni, grazie alle innovazioni nel

campo della conoscenza astronomica. La marea astronomica comporta esiti di diversa intensità in base alla posizione degli astri rispetto alla terra, si possono analizzare due casi specifici:

- Szigie: Avviene durante le fasi di luna nuova e di luna piena, gli effetti di Sole e Luna si sommano causando le massimo oscillazioni di marea.
- Quadratura: Avviene quando la Luna si trova nei periodi di primo e ultimo quarto, questo comporta una marea meno alta e meno regolare.

Gli effetti delle maree astronomiche hanno esiti differenti in relazione al sito di studio, all'interno del bacino del mediterraneo, nella porzione denominata Alto Adriatico, le escursioni mareali raggiungono un'altezza di massima di circa un metro; Analizzando invece porzioni marine esterne al bacino del mediterraneo come il Canale della Manica è possibile riscontrare eventi mareali con uno sviluppo in altezza anche di 10 m.

Nella seguente immagine è possibile osservare una schematizzazione della posizione degli astri in corrispondenza degli eventi mareali:

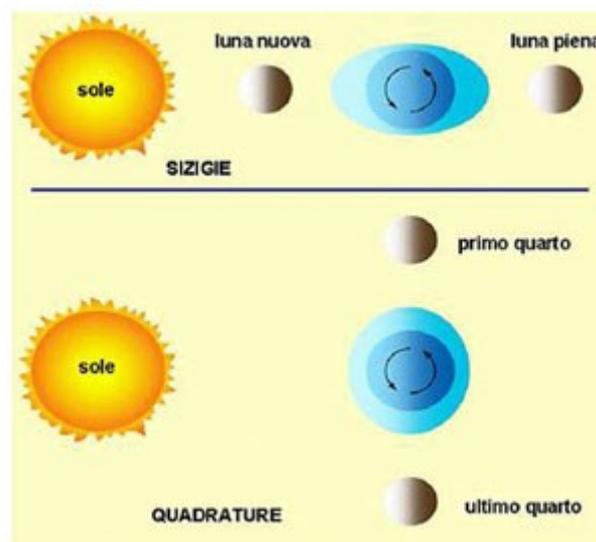


Figura 2 Marea astronomica: quadratura e szigia (da Ispra Venezia)

2.1.3 Sovralzo metereologico

Oltre all'innalzamento del livello delle maree per una componente astronomica è osservabile anche una componente metereologica, causata da fattori metereologici che per intensità e durata comportano un'alterazione del livello del mare. I principali fattori responsabili di questo fenomeno sono il vento e la pressione atmosferica, quest'ultima è causata dalla forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre, interessando quindi anche le masse d'acqua e comprimendole in relazione al livello di intensità della pressione. In dettaglio una zona su cui insiste bassa pressione vedrà livelli marini più alti (effetto barometrico inverso) rispetto alle zone in cui insiste alta pressione, in cui la pressione atmosferica preme sulla massa d'acqua causandone un abbassamento del livello e direzionandola verso la zona di bassa pressione in cui il livello aumenta a causa

della presenza di una massa d'acqua più ingente. Il secondo fattore responsabile di questo fenomeno è il vento che agisce sulle masse d'acqua con una forza in grado di direzionarle per un dato periodo di tempo, il vento tende a insaccare l'acqua nella sua direzione di propagazione. In dettaglio per l'area dell'Alto Adriatico il vento di scirocco che soffia da sud - est è il principale responsabile dell'accumulo di masse d'acqua e di conseguenza dei sovralti locali. Nella zona dell'Alto Adriatico è inoltre riscontrabile un fenomeno particolare di oscillazioni libere denominate "sesse" che rappresentano la risposta del mare a un rapido cambiamento di vento e pressione comportando oscillazioni periodiche che riportano il mare al suo equilibrio idrostatico.

Questo fenomeno viene monitorato giornalmente e ne viene comunicata l'intensità nei rapporti meteorologici osservabili quotidianamente.

Si procede ora con lo studio delle onde che come evidenziato in precedenza si sommano alla componente di livello medio e alla componente di marea e sovralto meteorologico aggravando il livello totale del mare.

2.1.4 Onde

L'onda è un fenomeno marino che comporta l'alterazione della parte superficiale della massa d'acqua, le onde possono assumere valori di grandezza estremamente vari in relazione alla forzante marina che la induce.

Esistono diverse tipologie di onde e vengono classificate in base alla loro origine:

- Oscillazionali: causate da un'alterazione del livello del mare, sono quindi le più dolci;
- Traslazionali: si formano a ridosso della spiaggia a causa dell'attrito col fondale e se ne osserva il frangimento e tipicamente la formazione di schiuma;
- Forzate: generate da forzanti meteomarine come vento, sono le più pericolose;
- Sismiche: generate da scosse di terremoto.

Le onde avvicinandosi alla spiaggia mutano la loro forma fino a scagliarsi sulla spiaggia e risalire lungo la stessa, si analizzano ora questi due processi.

2.1.5 Sovralzo dell'onda (Set up)

Con sovralto dell'onda si intende la sopraelevazione del livello medio del mare a causa del moto ondoso incidente sulla costa, questo fenomeno si osserva nella porzione di mare denominato surf zone, che si estende dal punto al largo in cui comincia il frangimento fino alla linea di costa con altezza sul livello del mare pari a 0. Superato il punto di frangimento l'onda risente dell'attrito del fondale ormai sempre più basso, questo causa il rallentamento del corpo dell'onda (parte sottostante) ma non della cresta dell'onda (parte superficiale) che esente dall'attrito conserva il moto. Il corpo dell'onda rallentato dal fondale per conservazione dell'energia accumulata si alza su sé stesso, comportando un fronte d'onda maggiorato (set up). Successivamente la variazione di velocità nell'onda comporta il superamento della cresta dell'onda rispetto al corpo che causa il frangimento del fronte d'onda su sé stessa (shoaling). In occasione della formazione di set up

(innalzamento del livello del mare) si avrà nella zona retrostante un set down quindi un abbassamento del livello.

L'immagine successiva schematizza quanto precedentemente esplicitato:

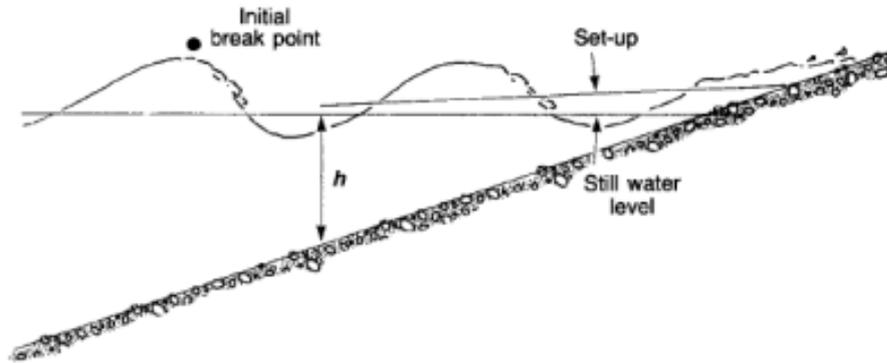


Figura 3 Processo di frangimento dell'onda e set up (da Ispra Venezia)

Il parametro di set up (η) è calcolabile mediante diverse formule a partire dal valore dell'altezza d'onda (H_s) al momento del frangimento.

2.1.6 Risalita dell'onda (Run up)

Dal momento in cui l'onda frange su stessa e si riversa sulla spiaggia parte di essa risale per un determinato valore spaziale sulla spiaggia stessa, questa zona di risalita osservata trasversalmente ed espressa con un valore lineare corrisponde al run up dovuto in parte dal set up dell'onda.

Viene proposta l'immagine successiva come sintesi, in cui è possibile osservare il parametro di set up come parte del run up e in generale gli altri parametri analizzati precedentemente:

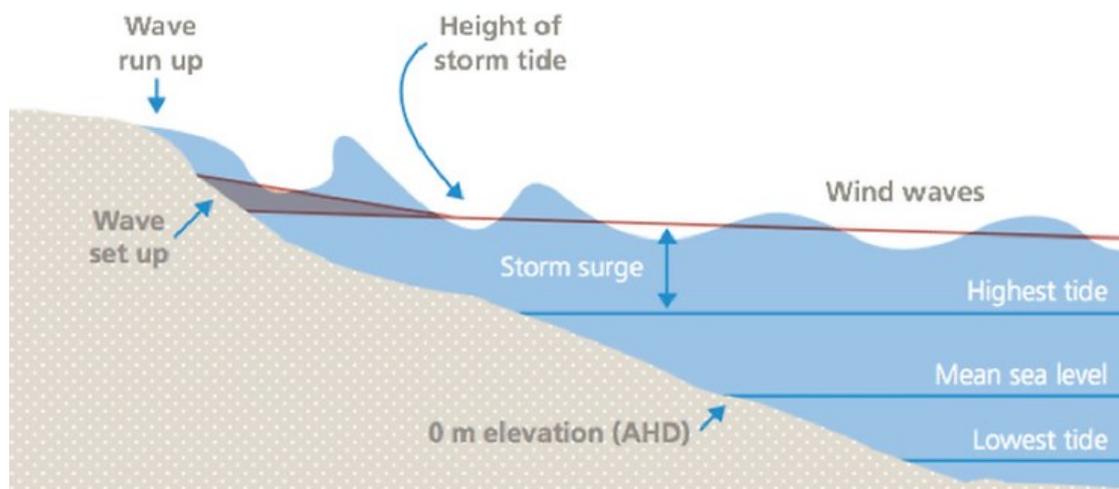


Figura 4 Componente di run up dell'onda (da davide Gaeta)

Si giunge quindi alla conclusione che vi sono diversi fattori che comportano simultaneamente un innalzamento del livello del mare, fattori che agiscono su larghe scale temporali e altri nell'immediato. Da uno studio approfondito su questi fattori sarà possibile ricostruire l'effettivo valore del livello del mare in un preciso momento storico e sarà altrettanto possibile mediante modelli previsionali poter prevedere il livello marittimo nel futuro.

Tutti i fattori precedentemente descritti contribuiscono a causare un incremento nell'altezza del mare che inasprito da avverse condizioni meteo può abbattersi violentemente sulla spiaggia e determinare danni sia sulla spiaggia stessa ma anche nelle zone del retrospiaggia qualora non fossero protette da opere di difesa come muretti o dune.

2.2 Cambiamenti climatici e Sea Level rise

La parola cambiamento climatico è un tema ormai quotidiano per tutti i cittadini del globo, dagli anni '80 ad oggi si è presa consapevolezza verso questa tematica e negli ultimi anni l'attenzione mediatica ha contribuito a portare sul tavolo dei più grandi enti ambientali e governativi il problema delle alterazioni climatiche.

Tra il 2011 e il 2020, la temperatura media della superficie terrestre è aumentata di 1,1°C rispetto alla temperatura media della fine del XIX secolo (prima della rivoluzione industriale) e risulta più calda di qualsiasi altro periodo degli ultimi 100.000 anni.

I livelli di gas serra nell'atmosfera continuano ad aumentare a causa delle emissioni legate alle attività umane, le concentrazioni di anidride carbonica (CO₂) sono le più alte degli ultimi 2 milioni di anni. Le concentrazioni di metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O) sono le più elevate rispetto ad almeno gli ultimi 800.000 anni.

I gas serra, i principali responsabili dell'aumento delle temperature, sono anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O). Questi gas agiscono creando uno strato intorno alla terra tale da rendere più difficile il rilascio di calore dalla terra verso l'atmosfera, essendo lo stesso principio di funzionamento di una serra questi gas vengono chiamati gas serra e contribuiscono all'effetto serra. È necessario specificare che l'effetto serra è indispensabile per l'essere umano, di fatto senza di esso la temperatura globale sarebbe di circa 33°C più bassa rendendo inospitale qualsiasi angolo del pianeta, ma l'entità del fenomeno di oggi è totalmente anomalo.

L'effetto serra dal XIX secolo si è intensificato a causa delle attività umane che hanno emesso sempre più gas serra nell'atmosfera soprattutto a causa dell'utilizzo di combustibili fossili come carbone, gas e petrolio ma anche a causa della deforestazione e delle attività agricole.

Nella seguente immagine viene esplicitato il ruolo dei gas serra in caso di clima bilanciato (situazione originaria del pianeta) e clima sbilanciato (situazione odierna del pianeta in seguito all'aumento dei gas serra).

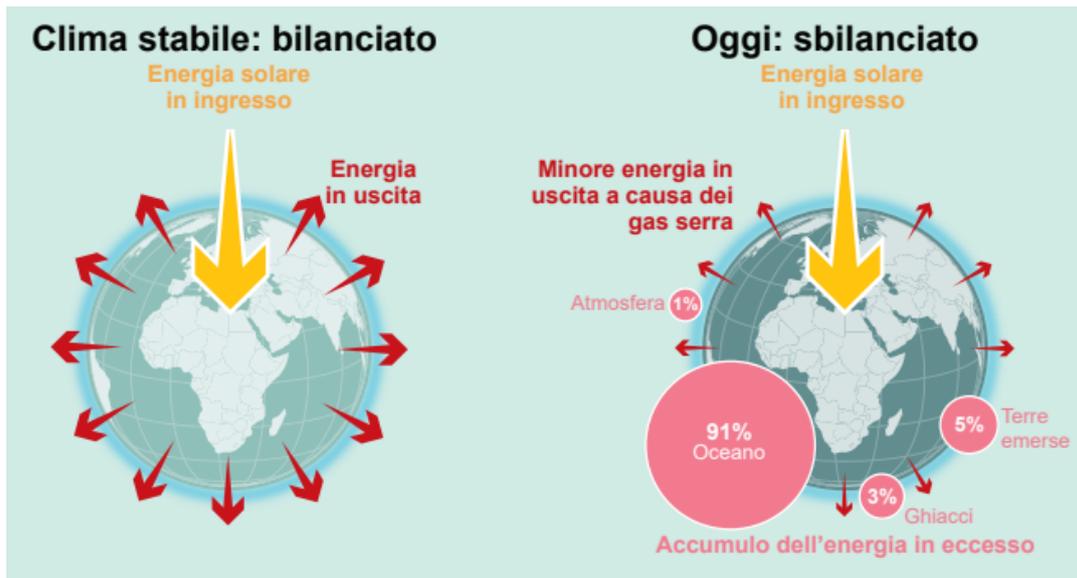


Figura 5 Bilancio energetico terrestre (CNR)

Dall'immagine precedente si evince come il globo accumuli energia senza avere la possibilità di dissiparla a causa dell'effetto serra, questo accumulo energetico sfocia in alterazioni climatiche in quanto i modelli meteorologici cui eravamo soliti sono ormai stravolti dalle estreme temperature in cui riversa il mondo di oggi.

È possibile affermare con certezza che i cambiamenti climatici sono indubbiamente dovuti all'attività umana e per terminare l'approfondimento riguardo i cambiamenti climatici è indispensabile un ultimo approfondimento su come l'attività antropica abbia condizionato il clima moderno per dimostrare che la situazione in cui riversa il mondo ad oggi non è l'esito di un normale corso di eventi o di un processo evolutivo del pianeta ma di un'alterazione completamente innaturale.

È possibile affermare questo punto di vista in quanto nessun processo naturale può causare un aumento generalizzato della temperatura locale per periodi di anni o decenni, di fatto le eruzioni vulcaniche registrate in età preindustriale alterarono la temperatura per anni non decenni. Inoltre, dall'età preindustriale in poi non si sono registrati eventi naturali che hanno alterato significativamente la temperatura. Quello cui stiamo assistendo oggi giorno non è un processo naturale. I processi naturali di aumento delle temperature come quelli che si verificarono nell'Eocene (compreso tra 58 e 27 milioni di anni fa) o nel Piacenziano (3.6 e 2.5 milioni di anni fa) impiegarono milioni di anni mentre oggi la temperatura si alza con una rapidità mai registrata prima. Il massimo termico del Paleocene - Eocene causò un aumento della temperatura di 6°C in 20.000 anni circa 0.0003°C all'anno. Ad oggi invece il tasso di riscaldamento globale è di circa 0.2°C per decennio ovvero 0.02°C all'anno. A testimonianza di quanto detto finora si riporta il seguente grafico che contiene la rappresentazione grafica dell'andamento crescente delle temperature in relazione all'attività antropica.

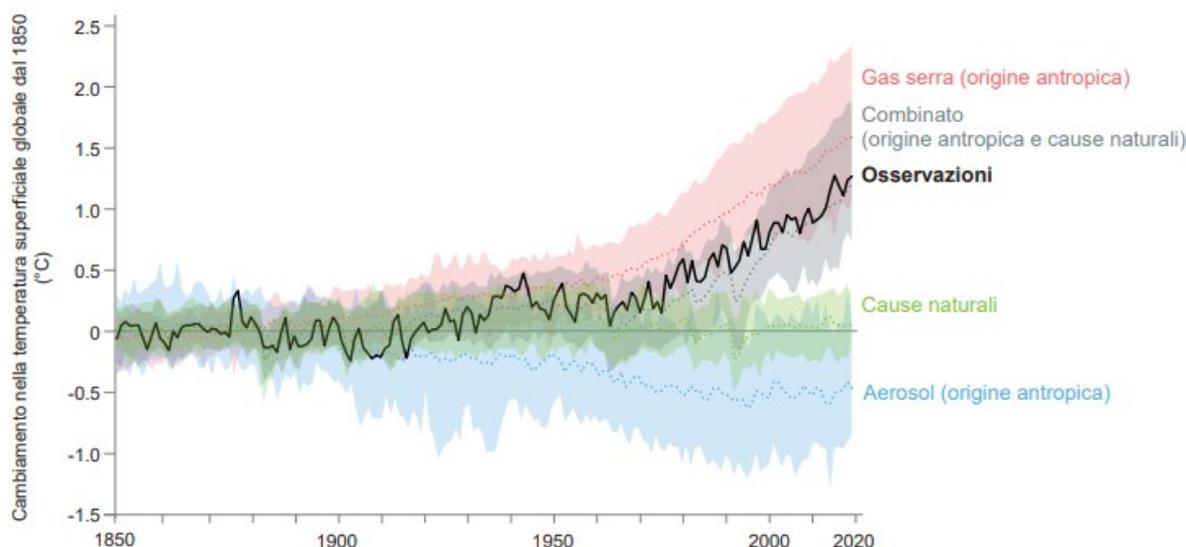


Figura 6 Aumento delle temperature e causa (IPCC)

La più grande conseguenza diretta dovuto al cambiamento climatico sta nell'aumento generalizzato delle temperature nel globo, questo comporta lo scioglimento di ghiacciai e più frequenti eventi meteorologici di grande portata e severità. Il mare risente direttamente di queste alterazioni in quanto le masse d'acqua immagazzinate nei ghiacciai ora si riversano nel mare aumentandone il livello, l'aumento delle temperature si diffonde anche nelle acque riscaldando e acidificando mari e oceani ed eventi di mareggiate sono sempre più frequenti a causa di forti venti e avversità climatiche dovuti all'alterazioni dei normali cicli meteorologici.

Si analizzerà ora il fenomeno del Sea Level Rise ovvero l'aumento del livello medio del mare, che potrebbe essere definito come la conseguenza più tangibile e diretta dei cambiamenti climatici per tutte le realtà che si affacciano sulla costa.

Per meglio comprendere concretamente cosa comporta l'aumento del livello medio del mare è possibile approfondire i report di uno degli organismi internazionali maggiormente impegnati in questa tematica ovvero l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione scientifica dei cambiamenti climatici.

L'organismo internazionale IPCC definisce quattro scenari futuri per l'aumento del livello medio del mare, tutti equamente possibili, caratterizzata dal tasso di emissioni di gas serra negli anni futuri. I quattro scenari SSP1 1.9, SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0, e SSP5 8.5. differenziati in termini di criticità, con 8.5 si intende lo scenario più catastrofico in cui le emissioni di gas serra si prevedono in costante aumento e conseguentemente il livello di Sea Level Rise atteso sarà maggiore.

Si riportano i risultati ottenuti dall'IPCC a scala globale:

Tabella 1: Scenari IPCC da AR6

Scenario	Previsioni globali	
	SLR 2100	conf. bound
SSP1 1.9	0.384 m	[0.275 - 0.548]
SSP1 2.6	0.436 m	[0.324 - 0.615]
SSP2 4.5	0.556 m	[0.435 - 0.759]
SSP3 7.0	0.679 m	[0.548 - 0.901]
SSP5 8.5	0.766 m	[0.625 - 1.011]

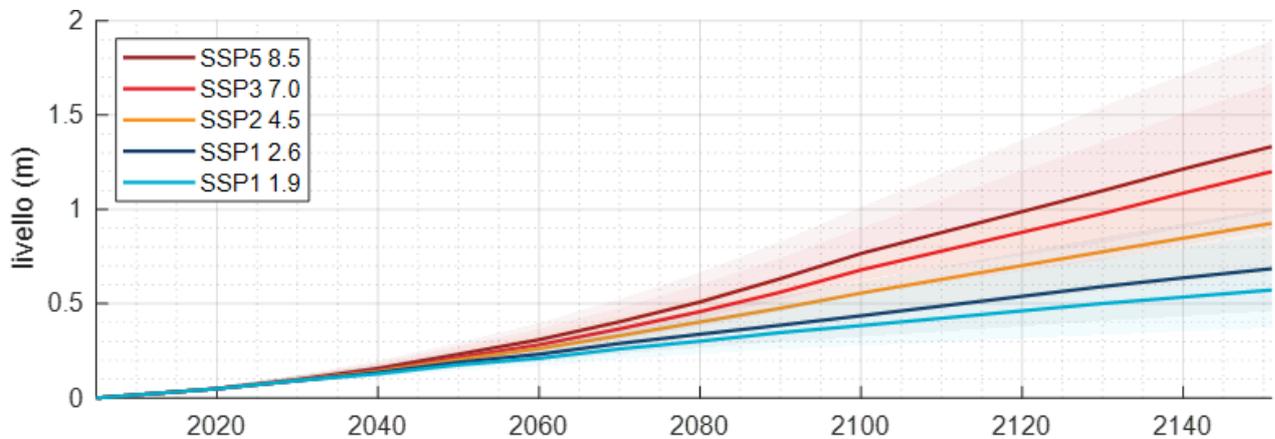


Figura 7 Scenari nel tempo (IPCC AR6)

L'innalzamento passato e futuro del livello del mare in specifiche località della terraferma può essere superiore o inferiore alla media globale a causa di fattori locali: assestamento del terreno, controllo delle inondazioni a monte, erosione, correnti oceaniche regionali.

Lo studio di questo fenomeno è di primaria importanza in quanto moltissime delle più grandi città al mondo si affacciano sul mare, come Rio de Janeiro, Sydney, Barcellona, Città del Capo, Istanbul, Miami, Napoli, San Francisco e molte altre.

Nelle aree urbane lungo le coste di tutto il mondo, l'innalzamento dei mari minaccia le infrastrutture necessarie per i posti di lavoro locali e le industrie regionali. Strade, ponti, metropolitane, forniture idriche, pozzi di petrolio e gas, centrali elettriche, tutte realtà a rischio se installate in prossimità di mare o oceani.

Il fenomeno dell'innalzamento del livello medio del mare è solo il primo di due fattori che giocano un ruolo chiave nell'espone le zone costiere al rischio di allagamento costiero, nel prossimo paragrafo si analizza il contributo della subsidenza

2.3 Subsidenza

Per fornire un quadro completo su quelle che sono le più diffuse alterazioni che contribuiscono al rischio di allagamento costiero, avendo analizzato la prima causa ovvero l'aumento del livello medio del mare si procede ora con l'analisi del fenomeno della subsidenza.

Con il termine "subsidenza" si intende ogni movimento di abbassamento della superficie terrestre indipendentemente dalla causa che lo ha prodotto, dal suo sviluppo areale, velocità di esplicazione, evoluzione temporale e alterazioni ambientali che ne conseguono. La subsidenza è l'ultimo stadio, e il risultato in superficie, di una serie di processi che si sviluppano nel sottosuolo e che, in qualche modo, sono correlati alla struttura geomeccanica del territorio; particolari caratteristiche dei terreni possono infatti favorire, accelerare o impedire tali processi. In generale, la subsidenza avviene in modo differenziale nel tempo e nello spazio con tassi di abbassamento annui variabili dal millimetro al centimetro e un'estensione dell'area coinvolta da locale a regionale. La subsidenza avviene per cause sia naturali sia antropiche che talora possono combinarsi e aggravarsi vicendevolmente. L'intervento dell'uomo agisce spesso da "catalizzatore", influenzando in modo considerevole il fenomeno, o da "promotore" determinandone l'innescò. In genere l'abbassamento del suolo legato a cause naturali si sviluppa a scala regionale e ha un'evoluzione lenta, avvertibile in tempi storici o addirittura geologici; non producendo effetti immediati sul territorio passa spesso inosservata. La subsidenza antropica invece si esplica di regola in tempi relativamente brevi (al massimo qualche decina di anni), ha un'espansione territoriale più limitata ma con effetti che possono compromettere fortemente l'ambiente, le opere e le attività umane nel caso in cui non si intervenga con azioni di controllo e gestione.

La subsidenza è tipicamente causata dalla rimozione di acqua, petrolio, gas naturale o risorse minerarie dal terreno mediante pompaggio o attività minerarie e dalla escavazione di materiali per la creazione di tunnel sotterranei; ma può anche essere causata da eventi naturali come terremoti, compattazione del suolo, aggiustamento isostatico glaciale, erosione e formazione di doline.

Analizzando le cause naturali è possibile osservare che quei fattori come tettonica, deformazioni del substrato e compattazione dei sedimenti siano responsabili di azioni agenti in migliaia di anni. A differenza dei fattori antropici che in un periodo di anche 50 anni possono comportare l'origine di movimenti del suolo. Di fatto dagli anni 30 agli anni 70 del secolo scorso, quindi una quarantina d'anni, la subsidenza antropica nel Comune di Venezia ha influito di molto nell'abbassamento del suolo, possiamo confermarlo osservando la serie storica contenuta nella seguente immagine che mette in relazione l'aumento del livello del mare a Trieste con Venezia.

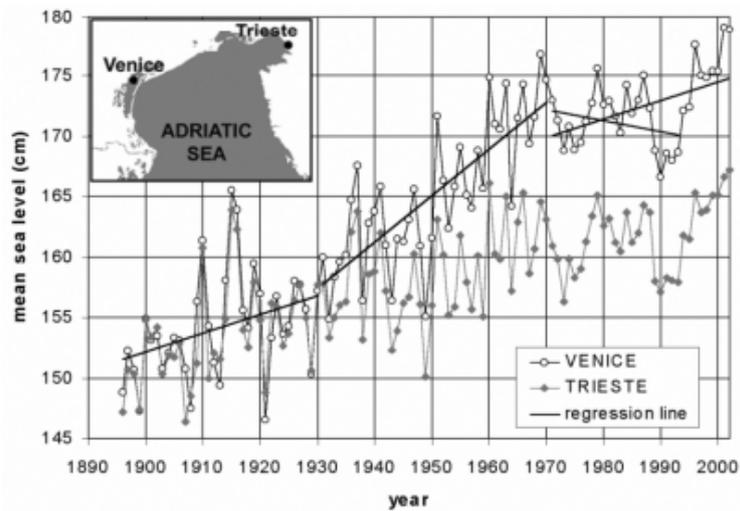


Figura 8: Contributo della subsidenza nel fenomeno dell'eustatismo

Dalla figura precedente si osserva come due città che si affacciano sullo stesso mare registrino diversi livelli di aumento del livello medio del mare, questo ovviamente non può indicare un innalzamento più significativo del mare veneziano rispetto a quello triestino, ma indica che la città di Venezia è “sprofondata” rispetto a Trieste. Il suolo veneziano è quindi più vulnerabile a subsidenza. Come prova di quanto appena evidenziato si riportano dei rilevamenti che mettono in luce la criticità del fenomeno della subsidenza lungo il litorale veneto:

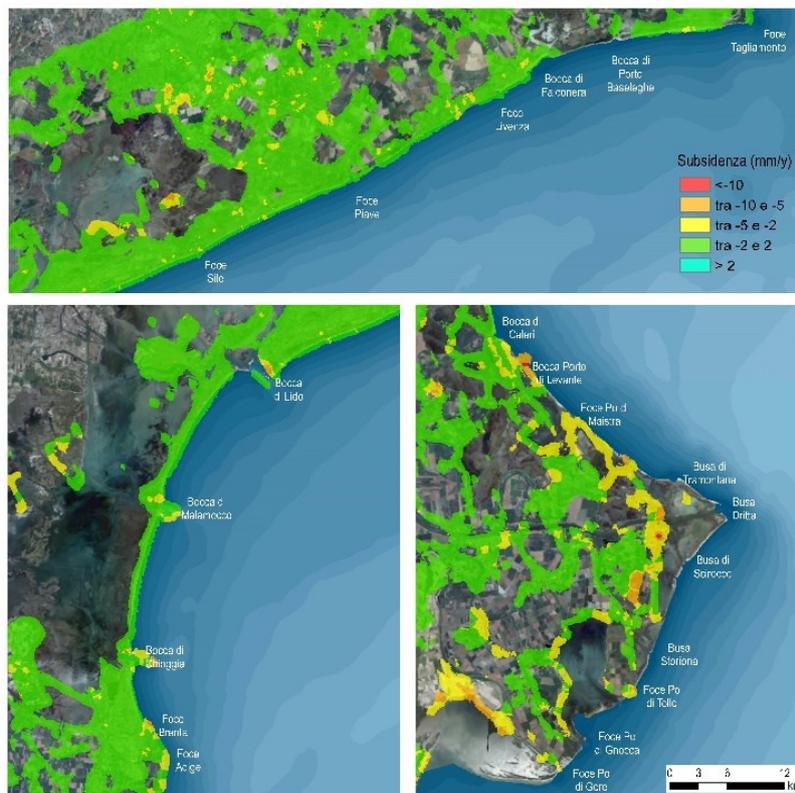


Figura 9 Subsidenza sul litorale veneto (da Relazione Coste)

Dall'immagine precedente si osserva come vi siano diverse aree del litorale contrassegnate da sfumature rosso-gialle che indicano contributi di subsidenza non trascurabili, le aree più a rischio sono quelle nel Delta del Po in cui il fenomeno si è manifestato nel periodo 1940-1960 a causa di estrazione di metano e acqua dal sottosuolo, il fenomeno si manifesta in quest'area con velocità di abbassamento dell'ordine di circa 20-30 cm.

Come anticipato in precedenza il fenomeno della subsidenza non si sviluppa solamente su larga scala, vi sono anche fenomeni puntuali come il caso che verrà analizzato ora.

Nella seguente immagine si osservano due ponti, quello in primo piano realizzato negli anni '20 e quello in secondo piano costruito 50 anni dopo. Risulta lampante come i pilastri del primo ponte risultino scoperti dal terreno per circa 150 cm, enfatizzando come in circa 100 anni il terreno si sia abbassato di almeno 1 m, mentre analizzando il secondo ponte osserviamo come 50 cm di pilastri risultino scoperti, testimoniando un abbassamento di 50 cm in 50 anni.



Figura 10: Subsidenza locale

Il fenomeno della subsidenza passa spesso inosservato in quanto difficilmente osservabile in maniera diretta, ma confrontando le altezze del suolo nel tempo possiamo comprendere i disagi che l'alterazione della quota base del suolo comporta per il territorio.

2.4 Sistemi e indici di Early Warning (EW)

Un sistema di Early Warning (EW) è un insieme di strumenti che permette di inviare un avviso preventivamente al manifestarsi di un evento potenzialmente pericoloso e con un anticipo sufficiente perché sia possibile prepararsi alla sua gestione. Sono diversi gli esempi che permettono di chiarire la modalità operativa dell'Early Warning. Nel caso degli tsunami, per via della grande distanza dell'onda dall'epicentro, grazie all'Early Warning è possibile comunicare alla popolazione l'arrivo dell'onda con un anticipo sufficiente a garantire l'evacuazione dell'area interessata; Nella stessa area di rischio, ovvero rischio idrogeologico è possibile realizzare sistemi che permettano di valutare preventivamente

l'arrivo di piene ed esondazioni fluviali, oppure mareggiate consistenti che potrebbero mettere in pericolo persone e beni.

Nella seguente immagine si osserva lo schema di funzionamento di un sistema EW per il rischio esondazione fluviale, si osserva come siano stati installati dei sistemi per la rilevazione dei livelli del fiume e per la videosorveglianza dello stesso. Una volta che il livello del fiume supera la soglia predefinita un segnale è inviato alla stazione di gestione centrale, che dirama l'allarme a cittadini e autorità:

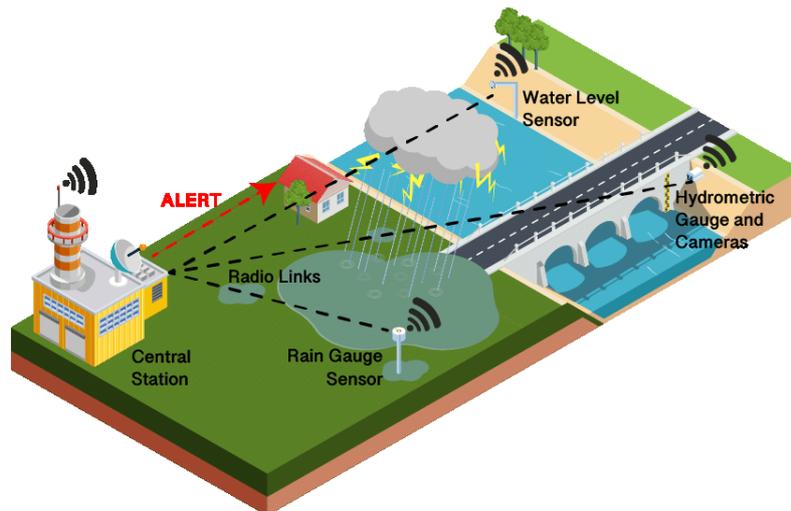


Figura 11 EW per il rischio di esondazione fluviale (Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review)

Lo stesso, in certe condizioni, avviene nel caso dei fenomeni sismici. In America Latina, infatti, l'Early Warning è molto utilizzato proprio allo scopo di informare tempestivamente la popolazione su eventuali scosse in arrivo. Come nel caso dell'evento fluviale il principio di funzionamento alla base del sistema è lo stesso, a partire da sismografi o comunque stazioni di rilevamento il segnale è inviato a una centrale che dirama l'allarme:



Figura 12 EW per il rischio sismico (Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review)

Un sistema di Early Warning è basato su tre elementi che necessitano una cooperazione per garantire l'efficacia del sistema:

1. **Sensori per il monitoraggio del territorio**, l'input indispensabile per la registrazione dei fenomeni;
2. **Algoritmi predittivi**, in grado di interpretare le conseguenze dei singoli eventi e il livello di rischio;
3. **Infrastruttura di comunicazione**, uno strumento di condivisione delle informazioni per fornire quadri sintetici delle situazioni in corso e inviare allerte alla popolazione nel più breve tempo possibile;

Il sistema di Early Warning deve essere inteso come lo strumento in grado di notificare in modo tempestivo l'aumento della probabilità di accadimento di eventi avversi, prima che essi si verifichino concretamente. Solo in questo modo gli organi amministrativi dedicati potranno rispondere correttamente all'emergenza e predisporre la sua stessa gestione e i cittadini stessi potranno mettersi al riparo o evitare le zone esposte a rischio.

Osserveremo ora alcuni esempi di sistemi di Early Warning disponibili sul territorio, in riferimento al rischio di allagamento costiero.

2.4.1 Rischio mareggiate

Il territorio europeo da sud a nord si affaccia su oceani e mari interni, i tristi esiti dei cambiamenti climatici comportano prima di tutto un aumento del livello medio del mare, enfatizzato da fenomeni di subsidenza. Il livello medio globale del mare è aumentato di circa 21 cm negli ultimi 30 anni e aumenterà di 30 cm entro il 2050, con un aumento di circa 3,5 mm/anno. In dettaglio l'area mediterranea risentirà particolarmente di questo innalzamento in termini di salinizzazione delle falde acquifere costiere (cuneo salino), subsidenza e arretramento costiero. Il fatto che l'area mediterranea sia particolarmente dipendente dal turismo aggrava la situazione ulteriormente (Si stima che in Catalogna l'avanzamento del mare potrebbe comportare una diminuzione del PIL del 20%). Risulta di primaria importanza salvaguardare le aree costiere da mareggiate ormai sempre più frequenti a tutela della popolazione e delle attività economiche.

Nella seguente immagine possiamo osservare come il litorale veneto sia una delle aree europee maggiormente esposte al rischio connesso all'aumento del livello medio del mare, in quanto le aree evidenziate in rosso presentano un'altezza sul livello del mare inferiore ai 5 m.

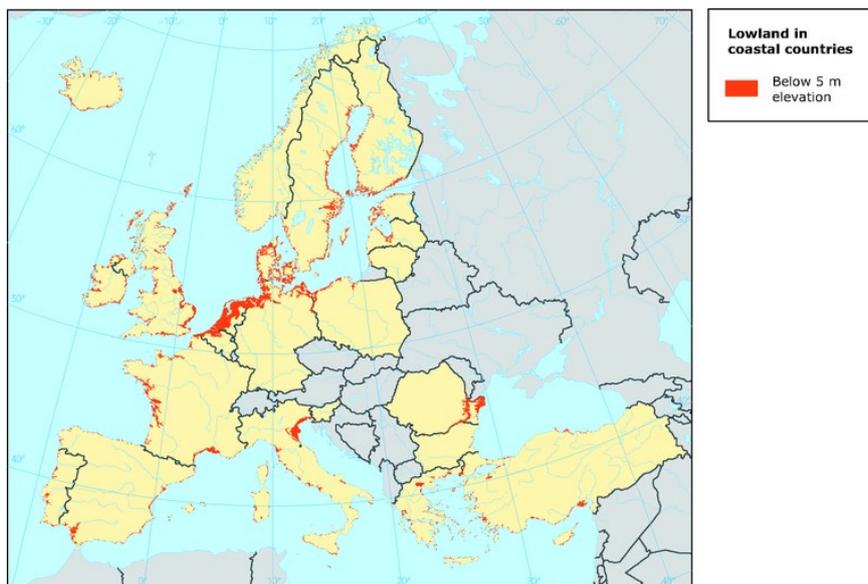


Figura 13 Aree sotto il livello del mare (EEA Europa)

Nella successiva immagine si osservano gli aumenti del livello del mare dal 1993 al 2019 distribuiti nell'area europea:

Come analizzato nei capitoli precedenti l'IPCC indica che nelle aree del nord Europa vi sia un aumento pi significativo del livello del mare, nell'area dell'alto adriatico invece siamo nella classe di aumento di 1 – 2 mm/anno.

A livello europeo si è sviluppato il progetto MICORE per offrire uno strumento on line che possa mostrare gli impatti di eventi marini avversi sulle coste; il progetto valuta nove spiagge europee (corrispondenti ai nove paesi aderenti al progetto) tra le quali il Lido di Dante di Ferrara. Lo scopo del progetto è produrre mappe di probabilità della distribuzione del danno prodotto da mareggiate con conseguente implementazione di un sistema di Early Warning, a sostegno delle strategie di mitigazione della protezione civile. Il sistema di allerta costiero permette, giornalmente, di prevedere i potenziali impatti di una mareggiata sulla costa con un anticipo di circa 72 ore. Tale strumento opera nella catena previsionale del Centro Funzionale Regionale (ARPA-SIMC), con il quale il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) collabora fornendo le proprie competenze tecniche e il patrimonio conoscitivo. L'EWS è attualmente in fase di collaudo e pertanto non è ancora accessibile al pubblico.

Per quanto riguarda l'area adriatica e ionica, il progetto I-STORMS sviluppa strategie per la protezione delle mareggiate, implementando la cooperazione tra i paesi in termini di disponibilità di dati e procedure di Early Warning.

In Croazia il servizio meteorologico e idrologico nazionale offre sistemi di Early Warning per rischi naturali come allerta per condizioni meteo estreme, vento forte, possibilità di violenti temporali, precipitazioni intense, inondazioni fluviali e incendi in spazi aperti.

In Italia il Comune di Venezia ha sviluppato un sistema di Early Warning per l'alta marea a cura del Centro previsioni e segnalazioni maree del comune di Venezia, progettato per

informare le persone circa gli eventi di marea e gli allagamenti attesi in città, la cui frequenza è prevista in aumento a seguito dell'innalzamento del livello del mare.

Sono invece disponibili due sistemi EW per il rischio mareggiate interrogabili dal pubblico e costantemente aggiornati, i principi di funzionamento e gli obiettivi sono significativamente diversi, perciò verranno ora brevemente presentati.

2.4.2 Total Water Level and Coastal Forecast Viewer

Il primo sistema di EW ad essere presentato opera negli stati uniti d'America in dettaglio lungo la costa Est e nel Golfo del Messico, sono considerate nel sistema le più importanti spiagge americane accomunate dalla presenza della duna come opera di difesa. Il sistema si basa sullo studio del TWL (Total Water Level) e della sua interazione con la duna di sabbia, possibili scenari potrebbero prevedere l'erosione della duna o il suo sormonto.

Il livello totale dell'acqua (Total Water Level) sulla linea di costa è la combinazione di maree e onde, prevedere il TWL consiste in una stima dell'altezza cui il mare incontrerà la costa e tale dato può fornire indicazioni sui potenziali rischi di erosione e inondazione costiera. Obiettivo di questo sistema di EW è valutare come il livello del mare impatta sulla duna, unica difesa per le spiagge selezionate per questo indice di allerta.

La previsione del TWL viene confrontata con le caratteristiche locali delle dune, come l'elevazione della base e/o della cresta di una duna di sabbia, per determinare la probabilità di erosione della duna, di sormonto e di inondazione.

Il progetto USGS "National Assessment of Coastal Change Hazards" lavora in collaborazione con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Weather Service (NWS) e i National Centers for Environmental Prediction (NCEP) per fare previsioni sul livello totale delle acque e sui cambiamenti costieri. Questo modello operativo combina le previsioni delle onde e del livello dell'acqua del NOAA e un modello di deflusso delle onde dell'USGS con le osservazioni della pendenza delle spiagge per fornire agli uffici meteorologici regionali previsioni dettagliate dei livelli totali delle acque. L'USGS confronta questi livelli d'acqua totali con le dune protettive lungo le coste per prevedere la probabilità di cambiamenti costieri dovuti all'alterazione delle dune stesse a causa dell'attività del mare.

Le caratteristiche d'onda registrate dagli enti precedentemente descritti, forniscono l'input per il modello empirico di wave run up sviluppato da Stockdon et al, 2006. Le pendenze delle spiagge, anch'esse richieste dal modello di wave run up, sono fornite da più rilievi lidar aviotrasportati nella stessa area.

Il pubblico può attivamente consultare l'indice di allerta andando a interrogare la spiaggia che desidera, il sistema fornisce in risposta un sistema di grafici e video che mostra l'alterazione nel tempo del TWL e la sua interazione con la duna. Il sistema prevede quattro possibili scenari:

- Nessun impatto sulla duna;
- Potenziale erosione;
- Potenziale sormonto;
- Potenziale inondazione.

Gli scenari vengono etichettati con una scala di colori per classificarne l'intensità verde, giallo, arancione e rosso come si osserva dal ritaglio del sito dell'USGS:

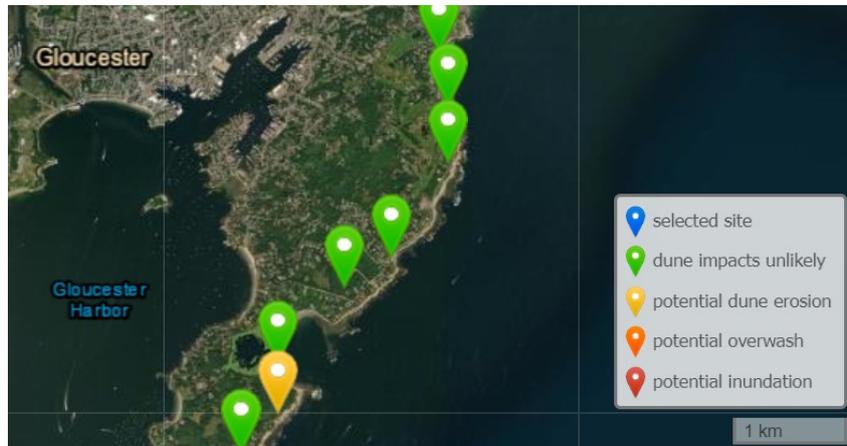


Figura 14: Ritaglio del visualizzatore USGS

Selezionando le località soggette a studio, identificabili con i segnaposto colorati, sarà possibile conoscere i TWL dei 7 successivi giorni e osservare un video che mostra la variazione del livello del mare rispetto alla duna, si allegano alcune schermate per poter comprendere il principio del sistema di allerta:

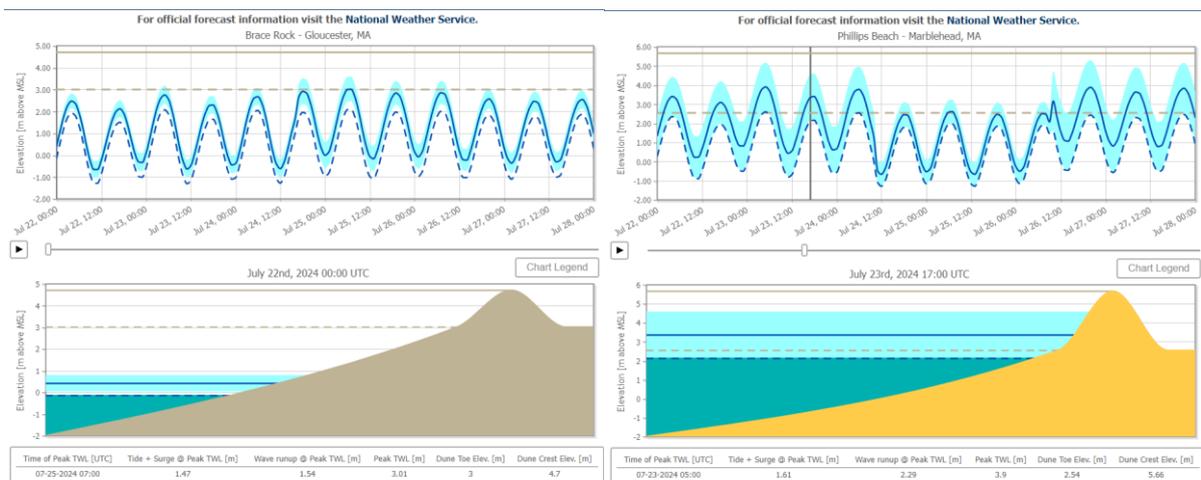


Figura 15: Ritaglio analisi possibile erosione della duna

Nelle immagini precedenti si osserva come nell'immagine a sx non vi sia pericolo per la duna in quanto il TWL è significativamente basso, nell'immagine a dx il TWL raggiunge il piede della duna che di fatto si colora di giallo per simboleggiare una possibile erosione.

Nella seguente immagine si osserva l'analisi di un fenomeno di sormonto della duna, il TWL essendo molto più alto dell'altezza di cresta della duna ne comporta il sormonto. La duna di fatto si colora di rosso per simboleggiare il massimo grado di allerta:

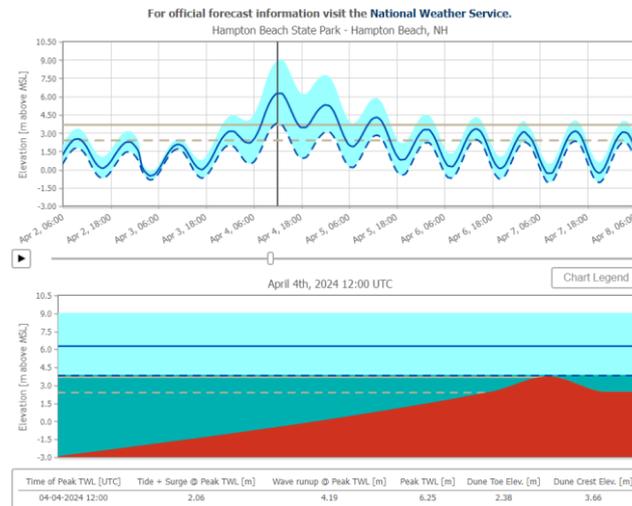


Figura 16: Ritaglio analisi scenario di sormonto della duna

Il sistema di allerta americano si basa sull'analisi del livello del mare per valutare come questo impatta sulla duna, evidenziando i possibili scenari che potrebbero manifestarsi e fornendo all'utilizzatore dati sottoforma di grafici e video estremamente semplici da interpretare per garantire una massima fruibilità del sistema.

Si procede ora con lo studio di un altro sistema di EW operante in Italia lungo il litorale dell'Emilia-Romagna.

2.4.3 Sistema di allerta per la costa Emiliano - Romagna

Il sistema di allerta che verrà presentato ora prevede un sistema di funzionamento significativamente diverso dal sistema americano, in questo caso si utilizzano due indicatori di impatto della mareggiata che in base al loro valore identificano l'intensità dell'evento.

Gli indicatori utilizzati sono due SCW e BWD che verranno brevemente definiti.

Il primo indicatore SCW (Safe Corridor Width) ha l'obiettivo di prevenire la perdita di vite umane a causa delle mareggiate mediante circoscrizione della spiaggia in cui si attendono eventi estremi. Si analizza la larghezza del corridoio di sicurezza (SCW) definita come distanza tra il piede della duna e il livello massimo raggiunto dall'acqua lungo il profilo della spiaggia. Per valutare l'indicatore si utilizza una scala basata su tre giudizi:

- Basso rischio: $SCW > 10$ m;
- Medio rischio: $5 \text{ m} < SCW < 10$ m;
- Alto rischio: $SCW < 5$ m;

SI riporta un ritaglio di SCW interrogabile dall'utente:

Profilo: classe01

Date: 24-Lug-2024 12:00:00

SCW: 14 m

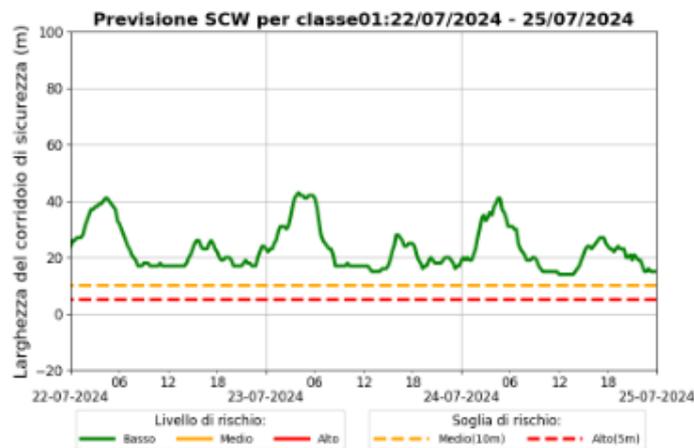


Figura 17: Indicatore SCW

Il secondo indicatore BWD (Building Waterline Distance) ha l'obiettivo di prevenire l'inondazione degli edifici a causa di acqua alta e/o run up mediante interposizione di una distanza di sicurezza tra il livello massimo raggiunto dall'acqua sulla spiaggia e il limite verso mare degli edifici. Si analizza quindi la distanza livello dell'acqua – edificio (BWD) e si utilizza una scala basata su tre giudizi:

- Basso rischio: $BWD > 10$ m;
- Medio rischio: $0 \text{ m} < BWD < 10$ m;
- Alto rischio: $BWD < 0$ m;

SI riporta un ritaglio di BWD interrogabile dall'utente:

Profilo: milmar01
Date: 24-Lug-2024 11:00:00
BWD: 14 m

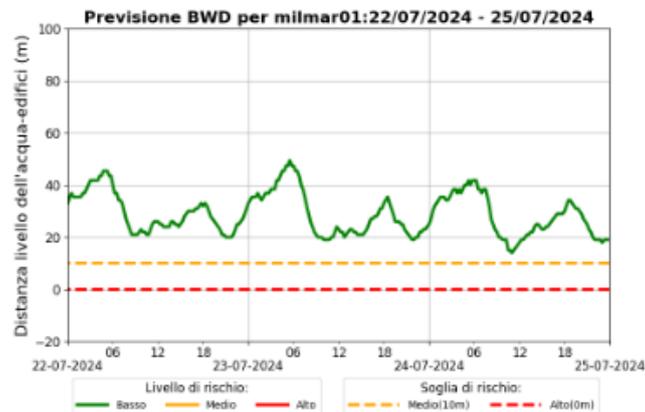


Figura 18: Indicatore BWD

Sulla base dei due indicatori appena descritti e del loro valore il segnaposto della spiaggia si colorerà di verde, giallo o rosso in relazione al livello di rischio presente come si osserva dall'immagine seguente:

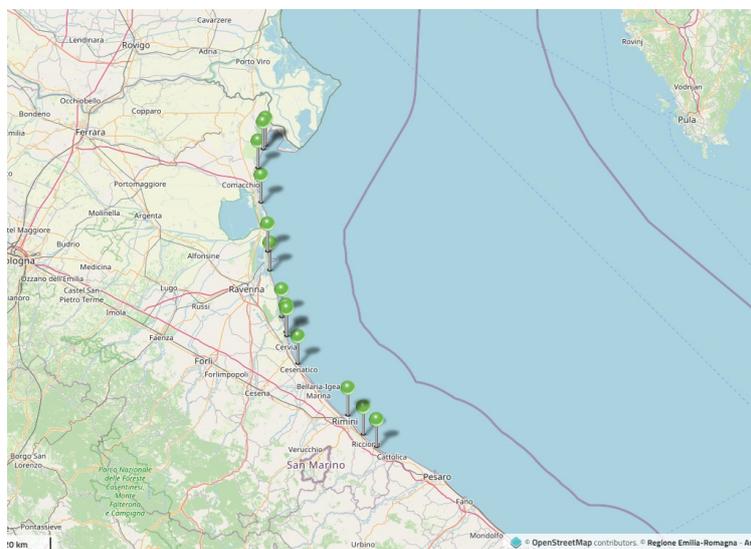


Figura 19: Ritaglio del visualizzatore per l'EW in Emilia-Romagna

3. AREA DI STUDIO

In seguito a un approfondimento generalizzato riguardante i temi alla base di questo elaborato si procede ora con un approccio più mirato allo scopo e obiettivo del lavoro di tesi, verrà presentata l'area di studio e il motivo per cui tale area è stata scelta, si presenteranno i dati utilizzati per sviluppare l'indice di EW e come questo indice è stato definito dal punto di vista metodologico.

Come precedentemente indicato il presente elaborato analizzerà una porzione del litorale veneto, la cella VE5 caratterizzata per una spiccata vocazione turistica, la città del lido di Jesolo è di fatto contenuta in questa cella. Per dare un quadro generale dell'area in cui si intende operare verrà descritto il litorale veneto nella sua interezza e si scenderà poi nel dettaglio della cella litoranea specifica.

L'area oggetto di studio è il litorale della Regione Veneto che si estende per circa 160 km, tra la foce del fiume Tagliamento e la foce del Po di Goro. L'area in questione si sviluppa su un territorio ricadente nei confini amministrativi delle provincie di Venezia e Rovigo e suddivisa amministrativamente in undici comuni da Nord a Sud: San Michele al Tagliamento, Caorle, Eraclea, Jesolo, Cavallino - Treporti, Venezia, Chioggia, Rosolina, Porto Viro, Porto Tolle, Ariano nel Polesine. In quest'area risiedono più di 400 mila abitanti. Nella seguente immagine è possibile osservare i comuni afferenti al litorale:

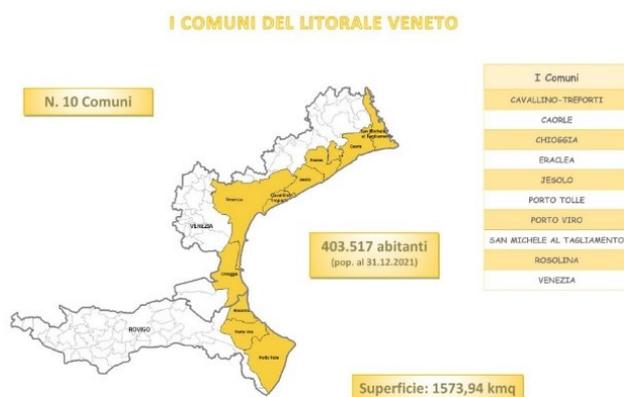


Figura 20 Litorale veneto (Regione veneto)

In dettaglio questo elaborato analizzerà la zona costiera di Jesolo in quanto per la sua attenzione mediatica estremamente rilevante è possibile reperire un gran numero di informazioni in merito ad allagamenti e criticità ambientali e data l'importanza socioeconomica della città lo studio di un sistema di allerta risulta prioritario.

3.1 Informazioni sulle attività turistico-balneari

Il litorale veneto attira annualmente milioni di turisti italiani ed europei, la città che si contraddistingue in termini di flussi turistici mirati alla balneazione e servizi è Jesolo, che secondo L'osservatorio italiano JFC è nella 'Top 20 destinazioni balneari italiane più green d'Italia' e sesta tra quelle più 'trendy'. Quarto posto, invece, nella classifica delle destinazioni 'family' e stesso piazzamento nell'elenco di quelle più 'giovanili'. Verranno ora proposte delle analisi raccolte dai maggiori enti attivi nel settore dell'analisi turistico-economica per mettere in evidenza il grande ruolo del litorale veneto nel settore turistico.

La Regione Veneto si posiziona al primo posto in termini di arrivi turistici per 12 anni consecutivi dal 2010 al 2022, accogliendo più del 15% dei turisti nazionali per un totale di più di 200 milioni di turisti in 12 anni, circa 17,5 milioni/anno.

Da un'analisi di presenze si procede esaminando i flussi economici da turismo dal report ISTAT del 2022 elaborato da Sociometrica, dal rapporto si osserva la classifica dei comuni in base al valore aggiunto, ovvero il valore economico prodotto dalle industrie turistiche e altre industrie correlate e direttamente generato dai consumi turistici interni. La città di Jesolo si posiziona al nono posto, con un valore aggiunto di circa di 1.18 miliardi di euro, corrispondente all' 1.26% del valore aggiunto dell'intera nazione.

Ranking	Comune	Valore aggiunto (euro)	Percentuale (su top 500 comuni)
1	Roma	8.523.423.056	9,08
2	Milano	3.625.560.074	3,86
3	Venezia	3.089.141.348	3,29
4	Firenze	2.541.406.369	2,71
5	Rimini	1.481.114.745	1,58
6	Napoli	1.466.819.094	1,56
7	Cavallino-Treporti	1.381.751.037	1,47
8	San Michele al Tagliamento	1.323.270.968	1,41
9	Jesolo	1.179.379.689	1,26
10	Torino	1.113.124.442	1,19

Figura 21 Indagine economica ISTAT 2021

Nel dettaglio è possibile analizzare nel grafico successivo l'andamento turistico degli ultimi anni per i comuni di Jesolo ed Eraclea:

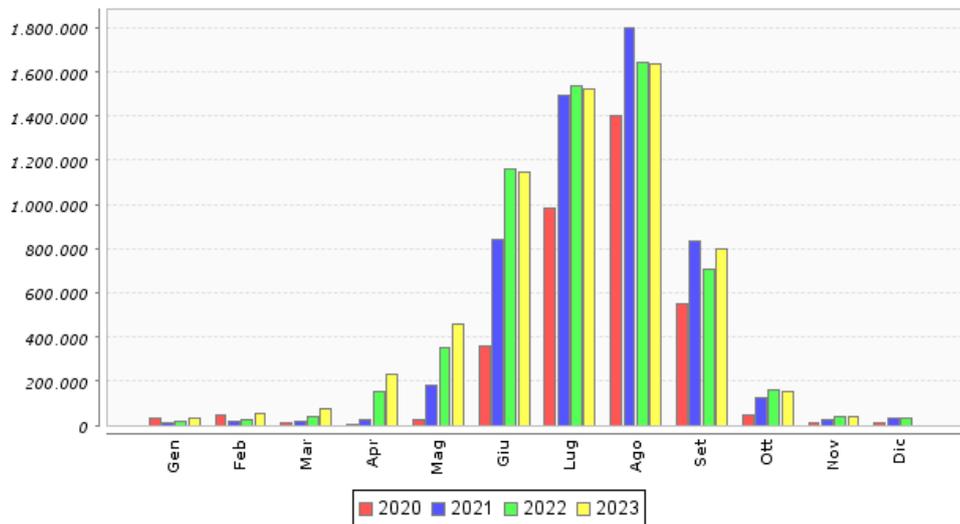


Figura 22 Presenze turistiche nel comprensorio Jesolo- Eraclea (ISTAT)

Dal grafico precedente possiamo osservare come il comprensorio di Jesolo-Eraclea accolga annualmente più di cinque milioni di turisti, rendendo quest'area del litorale estremamente importante economicamente per la regione.

Il valore aggiunto prodotto da questa precisa area geografica la rende una delle più redditizie in Italia, i beni presenti sul litorale utilizzati a scopi residenziali o produttivi sono costantemente esposti al rischio mareggiata; Residenti, lavoratori e turisti insieme ai loro beni devono essere tutelati dal rischio di allagamento costiero proprio in relazione al valore economico di quest'area, la pericolosità del sito e la vulnerabilità degli agenti in gioco.

3.2 Caratteristiche del litorale veneto

La caratteristica principale della fascia costiera pianeggiante dell'Alto Adriatico è la sua continua evoluzione e la sua variabilità di usi del territorio e alternanza degli ecosistemi; essa è infatti caratterizzata da un sistema di foci (Tagliamento, Livenza, Piave, Sile, Brenta, Adige e Po) e lagune (Baseleghe, Caorle, Venezia e più a Sud le innumerevoli lagune del delta del Po).

Nella seguente immagine raffigurante l'idrografia veneta si osserva con il simbolo rosso la foce del Piave, in blu del Sile, in viola dell'Adige, in giallo del Tagliamento e in verde del Po di Goro.



Figura 23 Sistema di foci del veneto (Wordpress)

Il tratto costiero afferente alla provincia di Venezia è compreso tra la foce del Tagliamento (simbolo giallo) e la foce del fiume Adige (simbolo viola) e si estende per circa 100 km. Questa porzione di territorio vede frequente presenza di insediamenti urbani, industriali che alterano l'aspetto naturale del litorale mediante opere di difesa artificiali. L'aspetto naturale del litorale tipicamente composto da un sistema di dune persiste in poche porzioni di territorio.

In questo litorale manifesta una tendenza erosiva con arretramenti causati da fattori sia naturali che antropici, tra i quali la riduzione del trasporto solido dei fiumi (dighe, escavazioni) e la intensa urbanizzazione della costa che si sviluppa fino a ridosso della spiaggia, a scapito del sistema di dune, elemento naturale di difesa della costa.

Il tratto di costa appartenente alla provincia di Rovigo si estende da Foce dell'Adige (simbolo viola) alla Foce del Po di Goro (simbolo verde) per circa 60 km, è composto da una successione di lidi, scanni e isole emergenti ed è caratterizzato da spiagge sabbiose con debole pendenza. L'evoluzione della linea di costa e dei fondali antistanti, negli ultimi 50 anni è stata condizionata dal fenomeno della subsidenza e dal diminuito apporto solido

del Po e dell'Adige. Di conseguenza si è registrato un generalizzato arretramento della linea di costa ed un approfondimento dei fondali.

Per una più facile gestione del litorale questo viene suddiviso in porzioni omogenee definite celle litoranee.

3.2.1 Celle litoranee

Il litorale viene suddiviso in celle litoranee o celle morfologicamente omogenee. Con cella litoranea si intende un tratto di costa compreso entro elementi morfologicamente notevoli, quali ad esempio foci fluviali, bocche lagunari, dighe portuali, etc. Al suo interno i movimenti dei sedimenti sono relativamente liberi e condizionati dalle caratteristiche delle singole mareggiate. Il litorale veneto è amministrativamente suddiviso tra le province di Venezia e Rovigo, si seguito la suddivisione in celle litoranee delle due province.

Nella seguente tabella sono elencate le celle litoranee della provincia di Venezia:

Tabella 2: Celle litoranee provincia di Venezia

Cella	Limiti	L[km]	Normale (°N)
VE1	Foce Tagliamento - Bocca di porto Baseleghe	10	163
VE2	Bocca di porto Baseleghe - Bocca di Falconera	5,4	161
VE3	Bocca di Falconera - Foce Livenza	4,9	147
VE4	Foce Livenza - Foce Piave	12,5	145
VE5	Foce Piave - Foce Sile	12,6	152
VE6	Foce Sile - Bocca di Lido	13,5	144
VE7	Bocca di Lido - Bocca di Malamocco	12	117
VE8	Bocca di Malamocco - Bocca di Chioggia	10,8	99
VE9	Bocca di Chioggia - Foce Brenta	5,7	75
VE10	Foce Brenta - Foce Adige	2,6	58

Nella seguente tabella sono elencate le celle litoranee della provincia di Rovigo:

Tabella 3: Celle litoranee provincia di Rovigo

Cella	Limiti	L[km]	Normale (°N)
R01	Foce Adige - Bocca di Caleri	7,6	87
R02	Bocca di Claeri - Bocca Porto di Levante	2,8	41
R03	Bocca Porto di Levante - Foce Po di Maistra	4,5	38
R04	Foce PO di Maistra - Busa di Tramontana	8,9	35
R05	Busa di Tramontana - Busa Dritta	3,6	29
R06	Busa Dritta - Busa di Scirocco	5,6	109
R07	Busa di Scirocco - Busa Storiona	6,5	108
R08	Busa Storiona - Foce Po di Tolle	3,6	108
R09	Foce Po di Tolle - Foce Po di Gnocca	4,4	130
R010	Foce Po di Gnocca - Foce Po di Goro	2,4	130

Per le coste del Veneto, gli elementi morfologici notevoli che delimitano le celle litoranee sono individuati come segue: foce del fiume Tagliamento, Bocca di Porto Baseleghe, Bocca di Falconera, foce del fiume Livenza, foce del fiume Piave, foce del fiume Sile, Bocca di Lido, Bocca di Malamocco, Bocca di Chioggia, foce del fiume Brenta, foce del fiume Adige, Bocca di Caleri, Bocca di Porto Levante, foce del Po di Maistra, Busa di Tramontana, Busa Dritta, Busa di Scirocco, Busa Storiona, foce del Po di Tolle, foce del Po di Gnocca, foce del Po di Goro. Si sono così individuate dieci celle in provincia di Venezia ed altrettante in provincia di Rovigo, si indicano con numero identificativo crescente da nord verso sud sia per Venezia che per Rovigo:

Tabella 4: celle litoranee venete

Cella	Limiti	Cella	Limiti
VE1	Foce Tagliamento - Bocca di porto Baseleghe	RO1	Foce Adige - Bocca di Caleri
VE2	Bocca di porto Baseleghe - Bocca di Falconera	RO2	Bocca di Claeri - Bocca Porto di Levante
VE3	Bocca di Falconera - Foce Livenza	RO3	Bocca Porto di Levante - Foce Po di Maistra
VE4	Foce Livenza - Foce Piave	RO4	Foce PO di Maistra - Busa di Tramontana
VE5	Foce Piave - Foce Sile	RO5	Busa di Tramontana - Busa Dritta
VE6	Foce Sile - Bocca di Lido	RO6	Busa Dritta - Busa di Scirocco
VE7	Bocca di Lido - Bocca di Malamocco	RO7	Busa di Scirocco - Busa Storiona
VE8	Bocca di Malamocco - Bocca di Chioggia	RO8	Busa Storiona - Foce Po di Tolle
VE9	Bocca di Chioggia - Foce Brenta	RO9	Foce Po di Tolle - Foce Po di Gnocca
VE10	Foce Brenta - Foce Adige	RO10	Foce Po di Gnocca - Foce Po di Goro

Nelle seguenti immagini prodotte dall'università di Padova è possibile osservare la disposizione spaziale delle celle lungo il litorale:

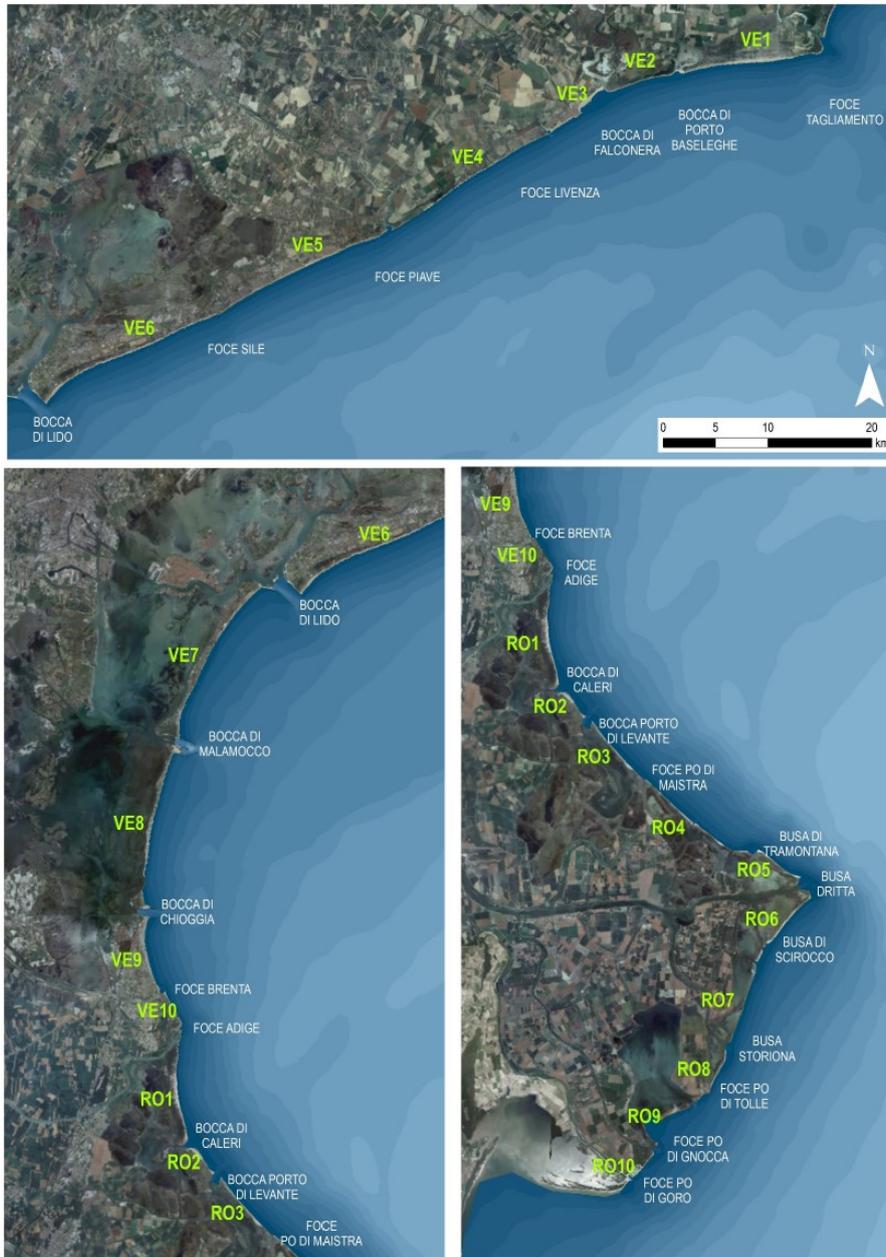


Figura 24: Disposizione spaziale delle celle litoranee (da Gestione integrata della zona costiera)

Questo elaborato prevede la definizione di un prototipo per l'indice di EW con riferimento al litorale di Jesolo, compreso nella cella litoranea VE5 quella cella che comprende la fascia costiera tra la foce del Piave e la foce del Sile.

3.3 Litorale di Jesolo (Cella VE5)

La cella litoranea in esame denominata VE5 è la zona del litorale veneto che ogni anno attira il maggior numero di turisti, nel 2022 nel solo mese di agosto arrivarono nel sistema Jesolo – Eraclea circa 1.8 milioni di turisti. La cella si estende per circa 12.5 km dalla foce del fiume Sile alla foce del Piave. Questo tratto di litorale risulta pesantemente sfruttato dall'uomo a fini turistici e residenziali, ne è prova la realizzazione di edifici civili ormai sempre più a ridosso della spiaggia; infatti, ormai dai decenni le barriere naturali delle dune del retrospiaggia sono state abbattute per fare posto all'abitato. La cella in questione è stata oggetto negli anni di interventi finalizzati alla protezione del litorale dall'arretramento della linea di riva. Questa è una problematica assai diffusa in gran parte del litorale ed è dovuta principalmente a due fattori:

- Erosione marina per azione delle onde;
- Scarso apporto di sedimento fluviale.

La cella in questione non soffre particolarmente il problema dell'allontanamento del sedimento, ma sono stati realizzati pennelli su pali per poter trattenere parte del trasporto solido e annualmente sono necessari migliaia di metri cubi di sabbia per compensare il sedimento allontanato dal moto ondoso. In base all'elenco di autorizzazioni rilasciate dalla Regione Veneto per interventi di ripascimento e/o dragaggio, i volumi movimentati nella zona di Cortellazzo e Jesolo sono all'incirca 100.000 m³/anno negli ultimi 10 anni.

Lungo il tratto di litorale più ad Ovest, per uno sviluppo di 6 km, sono stati prolungati metà dei pontili su pali esistenti in modo tale che ogni opera sporgesse verso mare rispetto alla linea di primo versamento della sabbia di almeno 40 m. Lungo i restanti 3 km di litorale, verso est, sono stati realizzati 16 nuovi pennelli permeabili su pali in calcestruzzo.

3.3.1 Analisi dei sedimenti

Si procede ora con una brevissima analisi dei sedimenti presenti nella cella di studio.

Il tratto di litorale in esame, la cella VE5 è principalmente composta dal punto di vista del sedimento da sabbie categorizzate e classificate in base al diametro del sedimento, nella seguente tabella si osserva la classificazione delle sabbie:

Tabella 5: Classificazione sabbie

Classificazione sabbie						
Tipologia	sabbia grossa	sabbia media		sabbia fine		sabbia molto fine
d (mm)	0.5 - 1	0.35 - 0.5	0.25 - 0.35	0.177 - 0.25	0.125 - 0.177	0.0625 - 0.125

Nella cella VE5 il sedimento presente è spazialmente distribuito come schematizzato nel seguente grafico:

Tabella 6: Distribuzione spaziale del sedimento

d50 (mm)	Profondità				d _{EQ} (mm)	
	Cella	Spiaggia emersa	tra 0 - 2 m	tra -2 e 4 m		< -4 m
VE5		0.248	0.153	0.268	0.118	0.148

In dettaglio per la cella VE5 si è osservato una variazione per la porzione nord e sud della cella stessa, per la porzione nord si osserva una situazione di erosione di circa 17.4 mila m³ all'anno, mentre per la porzione sud un accumulo di 82.6 mila m³ all'anno.

L'analisi del bilancio sedimentario dimostra un accrescimento nella zona sud e un arretramento nella zona nord, questa variazione comporta inevitabilmente un'alterazione del profilo della spiaggia, nel prossimo capitolo analizzeremo infatti lo scostamento della linea di riva.

3.3.2 Analisi della linea di riva

Per la valutazione dello scostamento delle linea di riva nel tempo è necessario affidarsi alla tecnologia del rilievo LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) è uno strumento di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser. In dettaglio viene utilizzato nel campo della geologia mediante analisi del terreno dall'alto per studiare i movimenti geologici come faglie, subsidenza; Di conseguenza questa tecnologia viene utilizzata per registrare i movimenti delle linee di riva in quanto valuta l'altezza al suolo della linea stessa che confrontata con voli precedenti e successivi mette in relazione eventuali spostamenti. La linea di riva viene stabilita a una quota pari a 0.25 m.s.l.m. poiché a questa altezza risulta più indipendente dall'interferenza con l'acqua.

Si analizza il seguente grafico che riporta l'andamento della linea di riva della cella VE5 nei periodi 2012-2013 e 2021-2022:

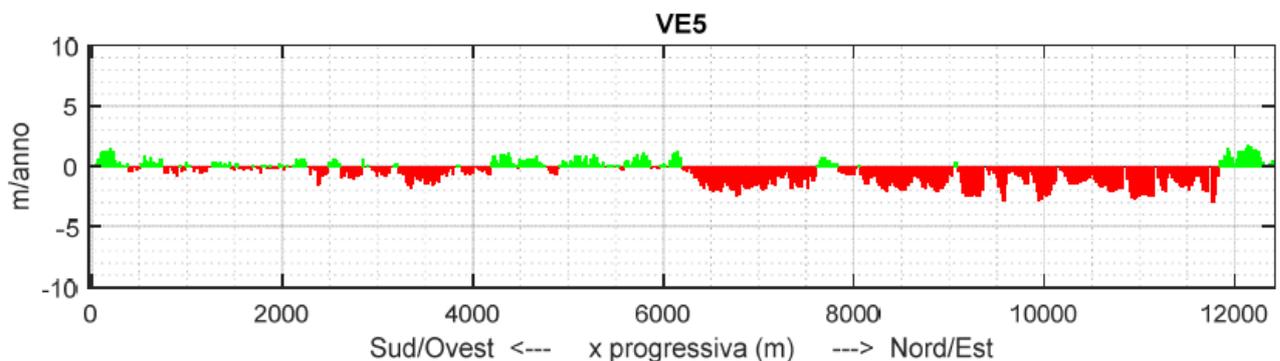


Figura 25: Variazione della linea di riva da rilievi LIDAR

Dall'analisi del grafico precedente si evidenzia che la cella VE5 presenta un arretramento della linea di riva con una velocità di circa 0.6 m/anno.

L'evoluzione recente evidenzia che l'apporto solido proveniente dal fiume Piave non è stato sufficiente a mantenere la linea di riva attuale. In particolare, a partire dal penultimo pennello in massi verso Sud, l'arretramento della linea di riva è pari a circa 5 m/anno e le perdite sono di circa 30'000-40'000 m³/anno. Il mancato apporto di sedimenti dal fiume Piave e l'elevato trasporto solido longitudinale provocano l'instabilità di questa zona e l'erosione si estende peraltro alle dune costiere retrostanti, degradate anche dal considerevole flusso turistico, che dunque non possono svolgere la loro funzione di riserva di sedimenti durante le mareggiate estreme, né quella di difesa dall'ingressione marina.

3.3.3 Sea level rise e subsidenza locale

Così come i cambiamenti climatici affliggono il globo terrestre anche il litorale veneto risente delle alterazioni climatiche mondiali. In questo capitolo analizzeremo come eustatismo e subsidenza interessano la regione veneto.

L'IPCC come riportato nei capitoli precedenti analizza i possibili scenari di innalzamento del livello del mare su scala globale e locale, possiamo osservare i risultati degli studi condotti dall'organismo internazionale relativamente all'area del Mar Mediterraneo. La seguente tabella mostra come i livelli futuri del mare potrebbero presentarsi in relazione agli scenari emissivi, si ricorda che lo scenario SSP58.5 è la condizione più gravosa in termini di emissione di gas serra:

Tabella 7: Scenari IPCC da AR6

Scenario	Previsioni regionali Nord Adriatico	
	SLR 2100	conf. bound
SSP1 1.9	0.314 m	[0.11 - 0.56]
SSP1 2.6	0.398 m	[0.19 - 0.64]
SSP2 4.5	0.492 m	[0.29 - 0.76]
SSP3 7.0	0.592 m	[0.37 - 0.87]
SSP5 8.5	0.678 m	[0.45 - 0.99]

In correlazione con la tabella vengono forniti due grafici che dimostrano l'andamento spaziale di innalzamento del livello del mare in base allo scenario 4.5 a sx e 8.5 a dx:

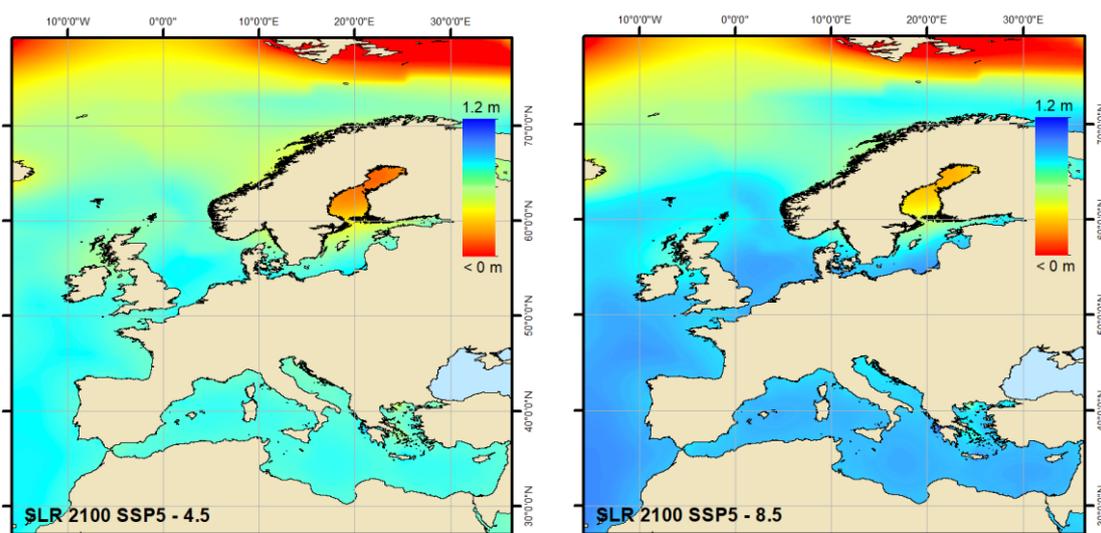


Figura 26 Scenari nell'area mediterranea (IPCC AR6)

Si procede ora analizzando il fenomeno della subsidenza su scala locale.

Le aree del litorale veneto principalmente soggette a fenomeni di abbassamento del suolo sono quelle afferenti alla laguna di Venezia e al delta Po, in quanto sono aree che per le loro caratteristiche geologico- ambientali favoriscono lo sfruttamento delle risorse del sottosuolo e la realizzazione di strutture e infrastrutture. Carminati e Martinelli (2002) analizzando i tassi di subsidenza naturale ed antropico, hanno individuato una correlazione tra lo sviluppo economico e l'accelerazione del tasso di subsidenza della piana del Po. Prima dell'avvento dell'epoca industriale il tasso di subsidenza era di circa 1.3 mm/anno nell'area della laguna di Venezia e di 2.5 mm/anno per il delta del Po, in quanto favorito solo da processi naturali di compattazione del suolo, processi tettonici e geodinamici, la consolidazione dei terreni a causa dei carichi litostatici, la deglaciazione e il carsismo. Dall'industrializzazione in poi i ritmi sono decisamente cambiati, con tassi di subsidenza significativi, questo principalmente a causa di sfruttamento del sottosuolo in termine di estrazione di liquidi, gas e scavi per realizzazione di tunnel o rimozione di inerti, con pozzi che raggiungevano profondità anche maggiori di 500 m causando inevitabilmente un abbattimento della quota piezometrica; La depressurizzazione indotta negli acquiferi accelerò il naturale processo di consolidazione dei diaframmi argillosi provocando quindi una subsidenza non trascurabile.

Il fenomeno della subsidenza invece è categorizzato nella seguente immagine prodotta dall'Università di Padova, si evidenzia tra le frecce rosse la cella VE5:

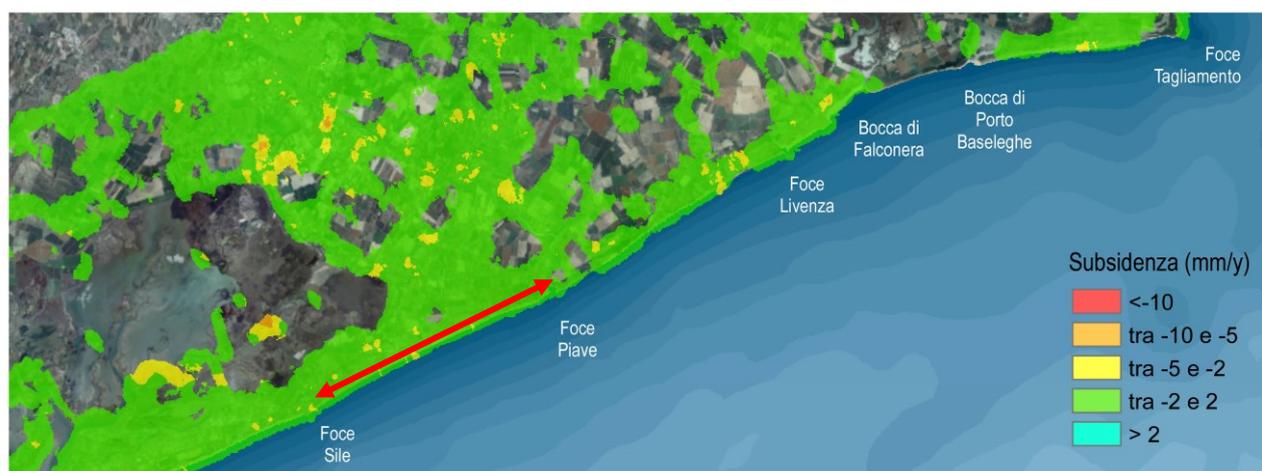


Figura 27: Subsidenza lungo il litorale di Jesolo

Dall'immagine si osserva come vi sia generalmente un tasso di subsidenza dai -2 ai 2 mm/anno in tutta la zona litoranea ma si notano alterazioni puntuali più gravose dai -5 ai -2 mm/anno dovute a un'edilizia eccessivamente prossima alla spiaggia. È possibile dunque concludere affermando che nell'area dell'Alto Adriatico i fenomeni di subsidenza ed eustatismo giocano un ruolo cruciale nella complessiva analisi dell'innalzamento del livello medio del mare, esponendo significativamente le località del litorale a un rischio maggiore in termini di alluvioni e mareggiate.

Si procede ora con l'analisi della metodologia adottata per la stesura dell'indice di EW.

4. METODOLOGIA

Per delineare correttamente l'indice di EW si necessita uno studio dettagliato di livelli del mare, onde e altezze delle opere di difesa. La calibrazione dei dati risulta di primaria importanza per un indice valido e corretto, si utilizza il programma di calcolo Matlab per elaborare i dati e adattarli alle condizioni del sito di studio.

Il primo step consiste nel delineare il livello medio del mare su cui si effettueranno le successive elaborazioni. A partire da una serie annuale storica di livelli medi del mare registrati dal 1880 al 2020, non adatta a un'elaborazione puntuale in quanto non abbastanza fitta, si utilizza una procedura statistica per ricostruire il vero livello medio del mare mediante applicazione di una media mobile con intervallo di 19 anni. Sarà possibile così interrogare puntualmente il livello del mare e conoscere il suo valore.

Si procede dunque adattando la serie oraria di livelli del mare dal 1990 ad oggi sul livello medio del mare appena calcolato dal 1880 così da ottenere il livello effettivo del mare di Jesolo.

Una volta che i dati di livello del mare saranno adattati al livello dell'Alto Adriatico per renderli compatibili per l'elaborazione si procede allo studio delle onde. La componente dell'onda dovrà essere sommata al livello del mare per ottenere il livello totale finale del mare, ovvero quel livello che determinerà o meno il manifestarsi di un evento di mareggiata.

Per lo studio delle onde si vanno a valutare le due componenti chiave che giocano un ruolo importante nei fenomeni di allagamento costiero ovvero il run up e il set up. Per il calcolo si utilizza il metodo di Stockdon che definisce le due formule:

$$\begin{aligned} \text{Set up} &= 1.1 \cdot 0.35 \cdot Bf \cdot \sqrt{HoLo} \\ \text{Run up} &= 1.1 \cdot \frac{\sqrt{HoLo \cdot 0.563Bf^2 + 0.004}}{2} \end{aligned}$$

Dove Bf indica la pendenza della spiaggia, ottenuta dal profilo della spiaggia e mediante rapporto ascisse ordinate; con Ho si indica l'altezza d'onda al largo contenuta nel set di dati a disposizione e non necessita alcuna elaborazione, con Lo si valuta la lunghezza d'onda. Per il calcolo di Lo si utilizza la formula proposta da Stockdon:

$$Lo = 9.81 \frac{Tp^2}{2\pi}$$

Dallo studio di onde e livelli come evidenziato nei capitoli precedenti verrà definito il livello totale del mare tenendo conto del contributo di onde, run up e set up. Questo livello totale verrà confrontato con le altezze delle difese installate lungo il litorale, qualora il

livello del mare superasse l'altezza della difesa per un periodo di tempo sufficiente si presenterebbe il fenomeno dell'allagamento.

Per poter meglio classificare il fenomeno dell'allagamento vengono stabiliti tre livelli di altezza che, se raggiunti dal livello del mare possono comportare allagamenti di intensità e rilevanza differente. Le altezze che verranno indagate nell'indice sono:

- $H_{C\text{ media}}$: Altezza media per tipologia di opera;
- $H_{C\text{ minima}}$: Altezza minima per tipologia di opera;
- H_B : Altezza del piede dell'opera (coincidente con la quota alla base dell'opera di difesa, tipicamente si osserva come punto di discontinuità tra la spiaggia e il retrospiaggia).

Nella seguente immagine si riportano le altezze significative appena descritte, a titolo esemplificativo si analizza la difesa "Duna":

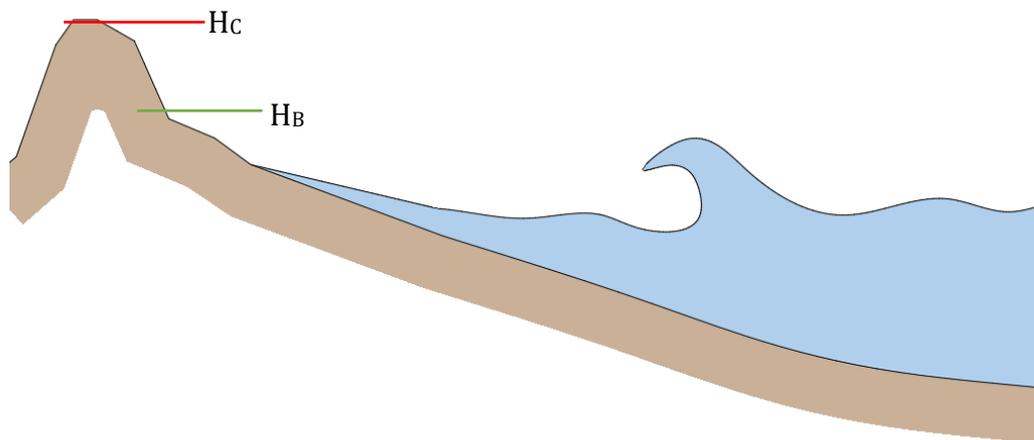


Figura 28:schematizzazione altezze significative

Per ottenere i dati di altezza citati in precedenza si utilizza il rilievo LIDAR, una tecnologia che permette di ottenere l'andamento topografico di una determinata area e visualizzandola su apposito supporto informatico come un GIS (Sistema Informativo Geografico) sarà possibile indagare il file e conoscere la quota dei punti di interesse.

Per definire l'altezza media di un'opera di difesa si calcolano puntualmente le altezze lungo la linea dell'opera e si esegue la media di tutti i valori puntuali. All'interno dello stesso set di dati indagando il valore minimo si trova la quota minima di quella tipologia di opera.

L'altezza del piede indica invece l'altezza cui si trova la base dell'opera rispetto al livello del mare, per definire tale valore si è optato per un valore medio o un valore minimo. La difficoltà nel determinare tale parametro sta nel fatto che il rilievo LIDAR è stato condotto nei mesi invernali e nei mesi freddi i litorali vengono protetti da dune artificiali create accumulando la sabbia in una zona arretrata della spiaggia per evitare che le onde invernali possano asportare il sedimento. Nella seguente foto si osserva tra le due linee

rosse la duna invernale, che solitamente viene ricoperta con del geo tessuto (in nero) per evitare che agenti atmosferici come pioggia e vento possano asportare materiale. In blu si riporta la linea che si è seguita per valutare l'altezza del piede (H_B). Si allega una foto aerea che meglio rappresenta quanto appena espresso:



Figura 29: Duna invernale (da geoapp.eu)

La duna in questione assume altezze rilevanti anche di 3 m e molto spesso viene eretta a ridosso delle opere se non al di sopra delle stesse, si evidenzia con la linea blu tratteggiata la linea della quota del piede che è coperta dalla duna artificiale, come vediamo nella seguente immagine:

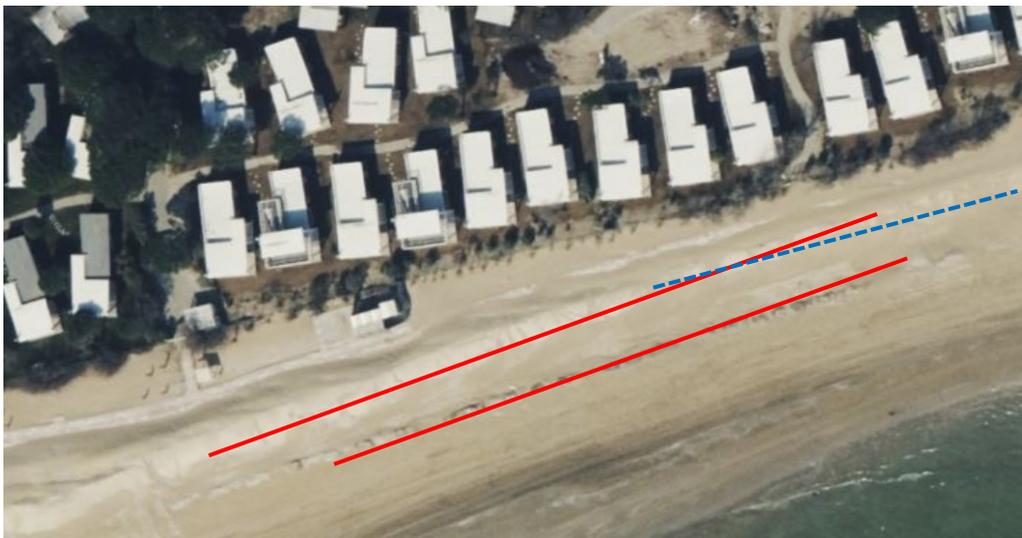


Figura 30: Duna invernale e interferenza con piede delle opere (da geoapp.eu)

Il LIDAR ha registrato l'altezza della duna come parte di quota del terreno; quindi, in alcuni tratti la valutazione del piede dell'opera risulta alterato di 3 - 5 m. Per correggere tale errore si è deciso di adottare un valore di piede medio o minimo per ciascuna tipologia di opera, in relazione alla quota stessa dell'opera, della posizione della duna e dei possibili errori del LIDAR. Si riporta la tabella per meglio identificare il processo di valutazione adottato:

Tabella 8: Processo di valutazione del piede delle opere

ID	TIPO	Processo valutazione H_B
1	ARGINE	Piede medio dell'opera
2	GRADONATA 1	Piede medio dell'intera cella litoranea
3	PASSEGGIATA 1	Piede minimo
4	GRADONATA 2	Piede medio dell'opera
5	MURETTO	Piede medio dell'intera cella litoranea
6	PASSEGGIATA 2	
7	DUNA	

Una volta definite le altezze significative delle opere si procederà mediante software di calcolo Matlab nella definizione degli eventi di superamento, il sistema calcolerà quando il livello totale del mare sarà maggiore dell'altezza delle opere di difesa ottenendo così un evento di mareggiata e successivamente osservando la durata dell'evento di mareggiata in termini di ore sarà possibile classificarli.

Per una miglior comprensione della classificazione degli eventi si è deciso di valutare i fenomeni di mareggiata che interessano solamente la quota del piede in maniera differente rispetto agli eventi di superamento delle altezze minime o medie. Gli eventi che superano solamente la quota del piede vengono ritenuti rilevanti solamente se la loro durata è maggiore di 3 ore, mentre tutti gli eventi che superano l'altezza minima o media di un'opera indipendentemente dalla durata sono ritenuti rilevanti in quanto si estendono oltre la spiaggia esponendo al rischio di allagamento anche le zone urbanizzate interne come strade, piazze, abitazioni e attività.

Per schematizzare quanto appena descritto e aiutare il lettore nella comprensione del metodo di valutazione degli eventi si osserva il seguente schema a blocchi:

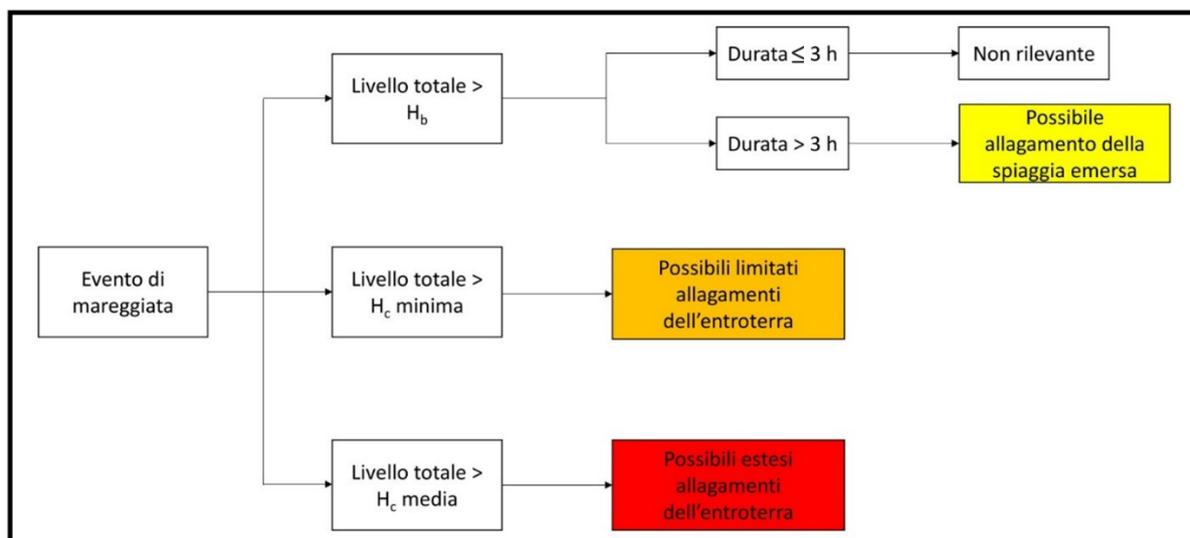


Figura 31: Schema a blocchi per processo logico di valutazione degli eventi

Per ciascun evento osservato verrà associato un colore per definirne l'intensità e dunque la sua pericolosità, come è possibile notare dal precedente schema a blocchi l'evento più lieve consiste nel superamento dell'altezza H_b per più di tre ore e vi è associato il colore giallo, qualora si superasse l'altezza H_c minima l'evento verrebbe etichettato col colore arancione e infine in caso di superamento dell'altezza H_c media l'evento acquisirebbe il colore rosso. I tre colori giallo, arancione e rosso possono essere identificati come le 3 luci di un semaforo che si accendono avvisando la popolazione in relazione alla tipologia di evento atteso.

Si valuterà infine la validità dell'indice confrontando gli eventi messi in luce dalla metodologia appena esplicitata con gli eventi effettivamente accaduti raccolti mediante analisi di servizi giornalistici, blog e testimonianze. Se l'indice riuscirà a mettere in risalto quegli eventi che hanno interessato il litorale si potrà affermare la correttezza dell'indice stesso.

4.1 Dati disponibili

In questo elaborato la fase cruciale per permettere un corretto sviluppo dell'indice di EW sta nell'elaborazione dei dati meteorologici e nello studio del profilo topografico della spiaggia di Jesolo con grande attenzione alle altezze delle opere di difesa.

4.2 Dati di livello e onde

I dataset a nostra disposizione contengono misurazioni circa trentennali relative a livelli del mare e onde. Per l'elaborazione si utilizzano programmi di elaborazione dati come Matlab e programmi per l'analisi spaziale dei dati come Arcgis e Qgis.

I dataset di onde e livelli si compongono di più di 235.000 misurazioni, eseguite tra il 01/01/1994 e il 31/12/2020 con cadenza oraria. Per elaborare i dati relativi all'altezza delle onde, la loro direzione e periodo e ottenere il moto ondoso è stato utilizzato il modello numerico d'onda WW3 che simula la generazione, l'evoluzione (incluse le interazioni non-lineari onda-onda) e la decrescita di stati di mare generati dal vento, in

acque aperte e costiere. La ricostruzione del livello del mare invece è resa possibile mediante l'utilizzo del codice numerico SHYFEM.

Si riporta un ritaglio da satellite in cui si nota col simbolo giallo la posizione del punto in cui sono state registrati livelli e onde del dataset. In particolare, il punto dista circa 3.8 km dalla costa di Jesolo.

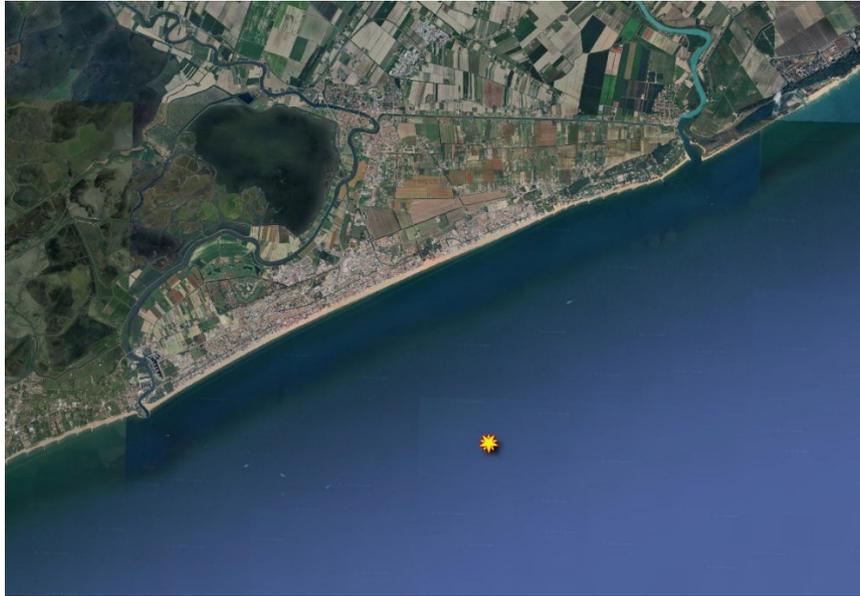


Figura 32: Localizzazione del punto di rilevamento delle onde

Si procede ora con l'analisi dei livelli, osservando graficamente come il dataset venga rappresentato nel programma di calcolo, si ottiene il seguente grafico:

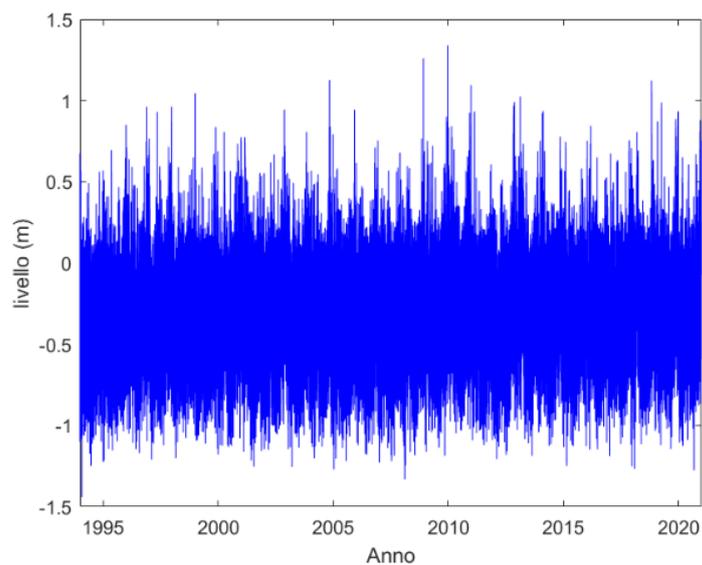


Figura 33: Livelli

Dal grafico si nota come la misurazione dei livelli sia stata realizzata intorno a un livello del mare di base pari a -0.5 m, questo è un valore anomalo che non permette una corretta rappresentazione dei dati.

È necessario dunque traslare questo set di dati intorno al valore medio del mare della zona di studio, ovvero l'Alto Adriatico, così da avere un valore di base coerente.

Dallo studio dei valori del medio mare registrati presso la piattaforma Acqua Alta di Venezia, si osservano dati raccolti in un arco temporale di 160 anni, dal 1860 al 2020. Questi dati risultano di primaria importanza per lo studio dell'alterazione del livello del mare nel tempo, di fatto dal grafico seguente è possibile osservare come nel tempo il livello del mare proceda con una tendenza di crescita positiva, accumulando negli anni una crescita di circa 40 cm.

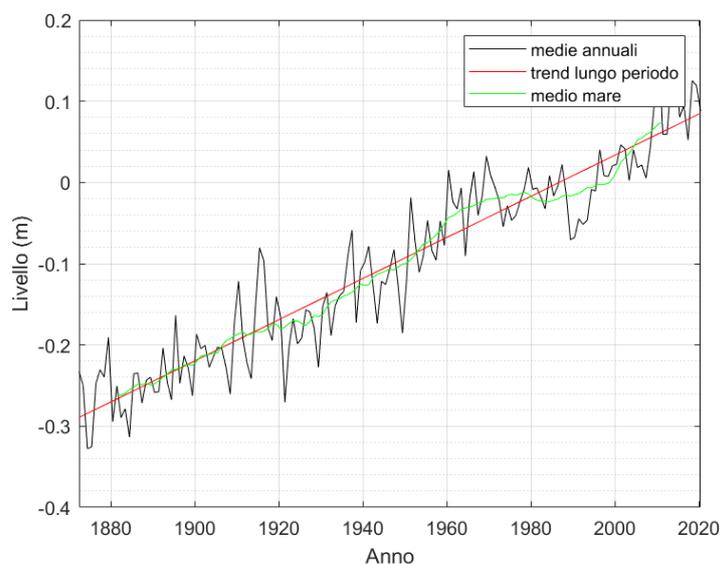


Figura 34: Sea Level Rise

Il grafico precedente contiene in nero il profilo del mare su media annuale, tali valori sono stati interpolati per poter ottenere una linea di tendenza, riportata in rosso, ma per meglio esprimere il vero valore medio del mare si è proceduto con un'analisi su una media mobile di 19 anni per ottenere la linea verde che effettivamente rappresenta con maggior accuratezza il vero andamento del livello dell'Alto Adriatico nel tempo.

Avendo così identificato il valore corretto del medio mare su cui basare l'analisi dei livelli è possibile traslare il primo grafico ottenuto, ovvero i livelli intorno a un valore di base errato, sulla linea di tendenza precedentemente descritta, ottenendo così il seguente grafico:

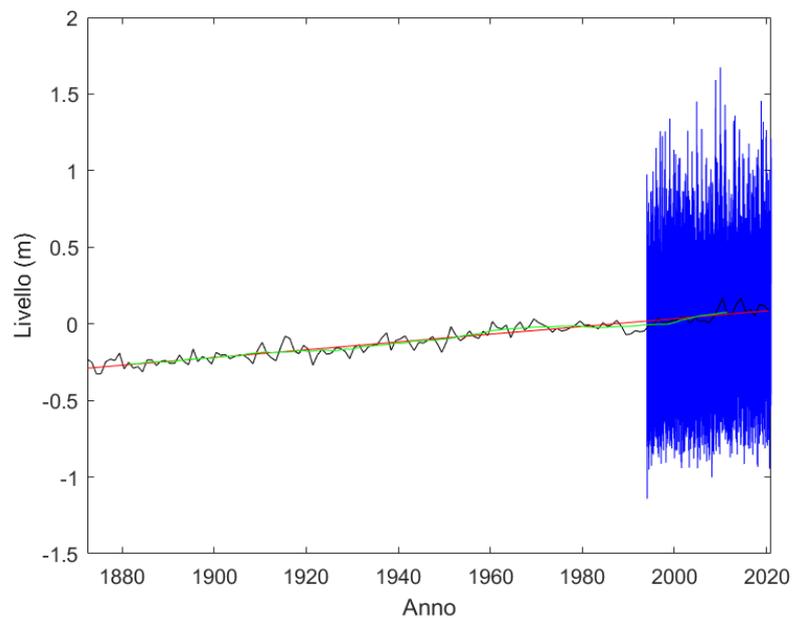


Figura 35: Livelli corretti

Dall'ultimo grafico si ottengono i valori attuali e veritieri del livello del mare, con accuratezza specifica della porzione dell'Alto Adriatico.

Una volta analizzati i livelli si procede con l'analisi delle onde, che sommate ai livelli permetteranno di osservare il livello totale ed effettivo del mare.

Si procede ora osservando graficamente come i dataset di onde vengono rappresentate nel programma di calcolo, si ottiene il seguente grafico:

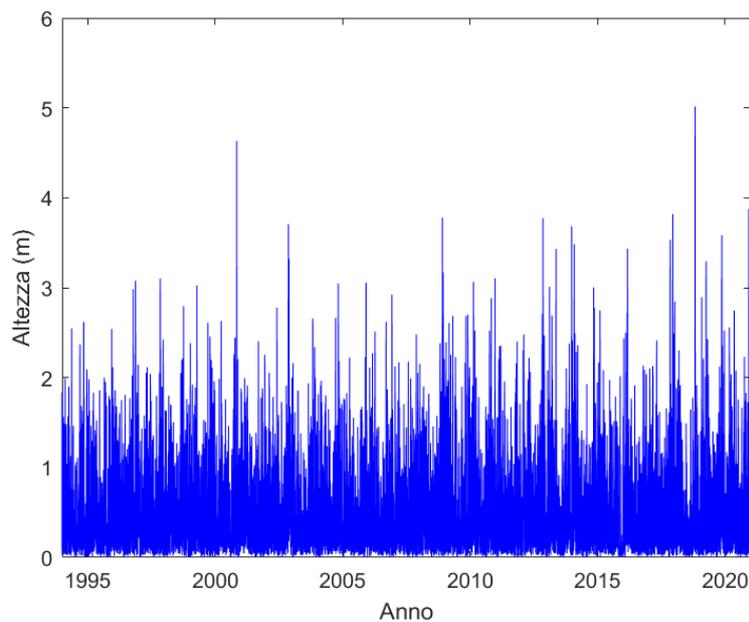


Figura 36: Onde

Dal grafico si osserva già come alcune onde spiccano rispetto alle altre in termini di altezza, tali altezze sono però registrate a 3.8 km dalla costa, per valutare l'onda a riva si procederà nei capitoli successivi con l'analisi delle due componenti dell'onda: run up e set up, ovvero quelle componenti che direttamente influiscono sulla spiaggia.

4.3 Dati topografici

In seguito all'analisi di livelli e onde si procede con un'analisi delle terre emerse, in quanto è indispensabile conoscere l'andamento altimetrico della spiaggia, le pendenze e soprattutto le quote delle difese del litorale.

Per l'analisi del terreno si interroga il file DTM (Digital Terrain Model). Il parametro DTM è un modello che rappresenta la superficie terrestre filtrata dagli elementi antropici o vegetazionali. A differenza del DSM (Digital Surface Model) che è il modello che descrive l'andamento della superficie terrestre in riferimento agli oggetti presenti su di essa. Nella seguente immagine viene evidenziata la differenza tra i due formati.

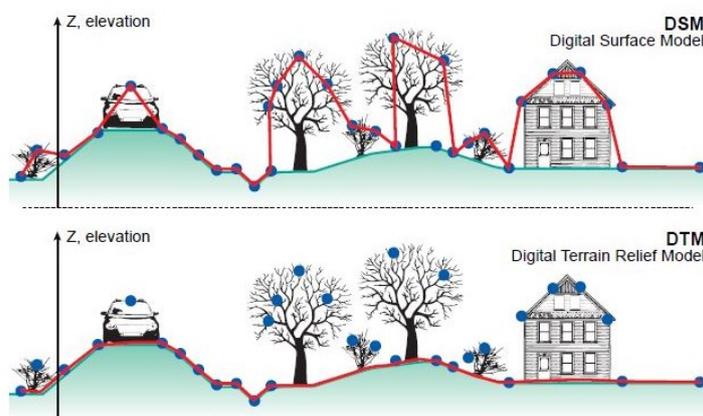


Figura 37: Schematizzazione DSM/STM

Questi rilievi vengono effettuati mediante volo LIDAR uno strumento di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie e di conseguenza produrre l'andamento altimetrico di un sito digitalmente.

Mediante il software di analisi di dati geografici QGis è possibile interrogare il file LIDAR precedentemente descritto e ottenere in risposta la quota del punto che andiamo ad interrogare. Si allega una schermata del progetto in cui è possibile osservare il LIDAR utilizzato per l'elaborazione, le diverse scale di arancione permettono di comprendere l'andamento altimetrico del terreno:

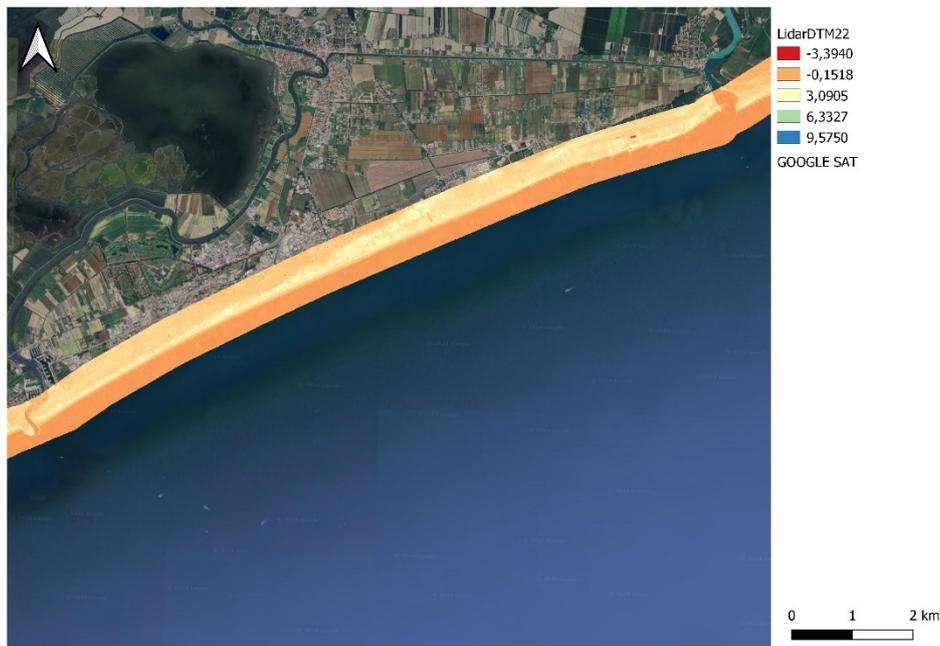


Figura 38: Visualizzazione del LIDAR in GIS

Il LIDAR si estende per circa 19 km lungo la costa ed ha una larghezza di circa 800m, 500m descrivono l'andamento topografico della terraferma e i restanti 300 il fondale sotto la massa d'acqua. Dalla legenda si osserva che i valori massimi di altezza sono di circa 9.5 m mentre i valori più bassi a -3 m sotto il livello del mare. La scala di definizione del LIDAR è composta da una griglia 1m x 1m. Insieme al rilievo LIDAR viene fornita linearmente la distribuzione delle difese lungo il litorale, sulla linea un insieme di punti intervallati da circa 20 m restituiscono la quota delle opere di difesa.

Oltre al modello digitale del terreno è stato fornito per il lavoro di tesi una serie di batimetrie che determinano l'andamento del fondale della cella litoranea, che verranno utilizzate nei capitoli seguenti per il calcolo del profilo del fondale. Nella seguente immagine si osserva spazialmente la disposizione del rilievo batimetrico n° 8.

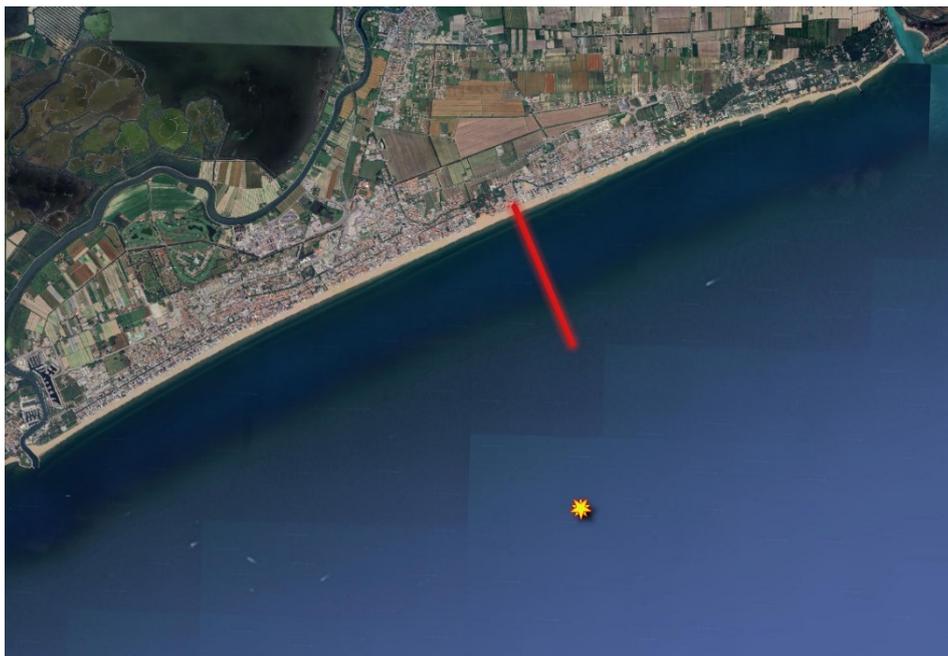


Figura 39: Posizione batimetria oggetto di studio

Alla batimetria n° 8 corrisponde il seguente profilo:

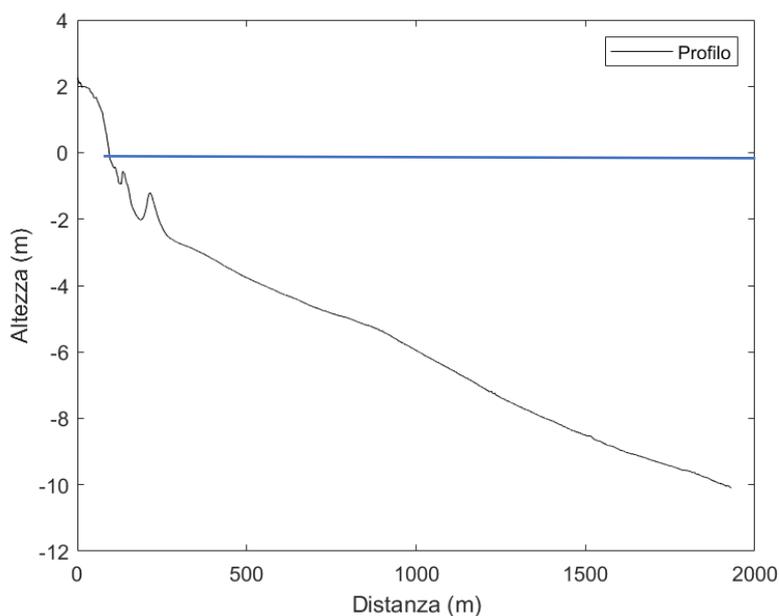


Figura 40: Sviluppo longitudinale del fondale

Questo lavoro di tesi come precedentemente evidenziato prevede la creazione di un prototipo per l'Early Warning, per valutare l'efficacia dell'indice ed il suo effettivo funzionamento e futura applicazione è necessario condurre un'analisi che metta in evidenza le mareggiate che si sono abbattute sul litorale nel passato così sarà possibile confrontare gli eventi evidenziati dall'indice con quelli effettivamente accaduti e quindi confermare la validità dell'indice che potrà così essere utilizzato per la previsione degli eventi estremi futuri.

4.4 Mareggiate estreme recenti

I seguenti eventi di mareggiata sono stati identificati mediante una ricerca online, indagando report, materiale giornalistico e documenti prodotti da cittadini e diffusi in rete mediante i più comuni mezzi di diffusione come blog e piattaforme di condivisione.

Data	Livello max raggiunto	Note	Tipo allagamento
18/11/1996	2m	L'evento meteorologico del novembre 1996 consiste in un sovrizzo meteorologico del mare di circa 80 - 110 cm	Allagamento interessa solo la spiaggia.
06/11/2000	2.05m	Dal Piano Comunale delle Acque del Comune di Jesolo	Si osservano fenomeni erosivi della passerella, l'allagamento non interessa le aree interne.
01/12/2008	2.49 m	Dal report dell'ISPRA "Gli eventi di acqua alta del dicembre 2008 nella laguna di Venezia e lungo il litorale nord adriatico"	Fenomeni erosivi in spiaggia, allagamenti nelle zone interne
01/11/2012	2.19m	Presso il Condominio la Boa, Hotel Jesulum, complesso JBA si osserva un allagamento di tutta la via dall'accesso al mare fino all'intersezione con la strada principale.	Si osservano strade allagate e infrastrutture sportive alluvionate.



Figura 41 a sx: Erosione localizzata durante l'evento del 06/11/2000 (da Piano delle Acque del Comune di Jesolo), a dx: allagamento durante l'evento del 1/11/2012 (Fonte <https://www.claudiovianello.it/>)



Figura 42 a sx: Strade ed infrastrutture allagate durante l'evento del 01/11/2012 (Fonte <https://www.claudiovianello.it/>)

Data	Livello max raggiunto	Note	Tipo allagamento
11/11/2012	2.13m	Capannina Beach, Piazza Giuseppe Mazzini via di accesso al mare fino a piazza Mazzini allagate. Terrazza Mare, zona Faro allagata	La mareggiata si estende fino alle strade interne



Figura 43 a sx: Strade ed infrastrutture allagate durante l'evento del 11/11/2012 (Fonte <https://www.claudiovianello.it/>)

Data	Livello max raggiunto	Note	Tipo allagamento
16/05/2013	1.75m	La mareggiata spazza via ombrelloni e lettini	Allagamento interessa solo la spiaggia.
31/1/2014	2.19m	Gli eventi del febbraio 2014 sono contenuti nel Report dell'ISPRA "Gli eventi meteorologici di gennaio e febbraio 2014 nel Nord Adriatico".	Allagamento interessa solo la spiaggia.
29/10/2018	2.51m	Mareggiata allaga la spiaggia, superamento altezza media della gradonata	L'evento potrebbe aver raggiunto le vie interne.



Figura 44 a sx: Mareggiata colpisce la spiaggia a sx durante evento del 16/05/2013 (Fonte <https://www.claudiovianello.it/>) a dx durante evento del 29/10/2018 (da Venezia Today)

Data	Livello max raggiunto	Note	Tipo allagamento
01/11/2018	1.75m	La mareggiata invade la spiaggia, danni alle attrezzature	Allagamento interessa solo la spiaggia.
04/04/2019	2.15m	La mareggiata invade la spiaggia, danni alle attrezzature	Allagamento interessa solo la spiaggia.



Figura 45 a sx: Mareggiata colpisce la spiaggia a sx durante evento del 01/11/2018 (Fonte TeleVenezia) a dx durante evento del 04/04/2019 (da Venezia radiotv)

Data	Livello max raggiunto	Note	Tipo allagamento
12/11/2019	2.52m	La mareggiata invade Piazza Mazzini, Piazza Milano e via Carducci	La mareggiata allaga piazze e strade interne, si notano evidenti danni alle infrastrutture sulla spiaggia ed erosione.



Figura 46 a sx: Mareggiata si addentra su Piazza Mazzini durante evento del 12/11/2019 (Fonte Venezia Today) a dx Mareggiata si addentra su Piazza Milano durante evento del 12/11/2019 (da Venezia radiotv)



Figura 47 a sx: Danni sulla spiaggia durante l'evento del 12/11/2019 (da Sky Tg 24)

Data	Livello max raggiunto	Note	Tipo allagamento
17/11/2019	2.04m	La mareggiata invade la spiaggia, danni alle attrezzature	Allagamento interessa solo la spiaggia.



Figura 48 a sx: Danni sulla spiaggia durante l'evento del 17/11/2019 (da Eco Vicentino)

5. RISULTATI

In questo capitolo affronteremo l'analisi di confronto tra il livello totale del mare e l'altezza delle difese del litorale, procedendo preliminarmente a un approfondimento puntuale delle opere di difesa presenti e successivamente verranno messi in luce gli eventi evidenziati dall'indice per cui livello del mare è risultato maggiore dell'altezza dell'opera. Infine, verrà esplicito come tale indice potrà essere utilizzato per la previsione di eventi futuri e quindi acquisire il suo vero scopo per l'Early Warning.

5.1 Sistema di difesa a Jesolo

La porzione di litorale oggetto di studio presenta diverse tipologie di opere che separano la spiaggia dall'urbanizzato, alcune di queste opere sono naturali come la duna o l'argine, altre invece sono di matrice antropica come il muretto, la passeggiata e la gradonata. Alcune tipologie opere sono presenti in più tratti del litorale ma essendo significativamente differenti viene aggiunto un identificativo numerico per meglio identificarle. Nella seguente tabella sono riassunte le tipologie di opera e le informazioni di altezza relative:

Tabella 9: Altezze significative delle opere di difesa

ID	Tipo	H _C media [m]	H _C minima [m]	H _B [m]
1	ARGINE	3.66	2.46	2.02
2	GRADONATA 1	2.65	2.41	2.17
3	PASSEGGIATA 1	2.79	1.99	1.86
4	GRADONATA 2	2.48	2.39	1.94
5	MURETTO	2.69	2.19	2.17
6	PASSEGGIATA 2	3.15	2.21	2.17
7	DUNA	3.56	2.67	2.17

Per definire le grandezze si utilizza H_C e H_B per indicare rispettivamente altezza dell'opera, media o minima e l'altezza del piede. Le opere installate lungo il litorale si distinguono in naturali come argine e duna che presentano le quote maggiori, mentre le restanti sono di origine artificiale realizzate per rendere più accessibile il litorale e hanno quindi quote più basse.

Si riportano i grafici in cui si osservano le 4 altezze utili per l'indice per ciascuna opera di difesa:

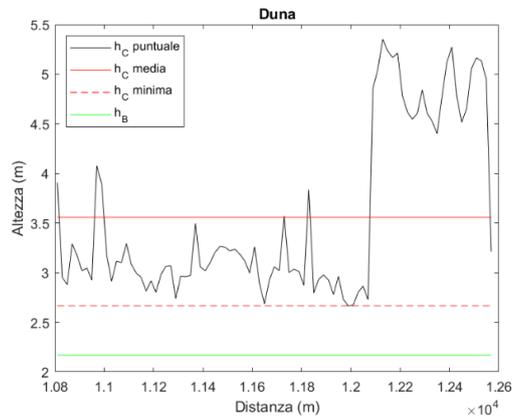
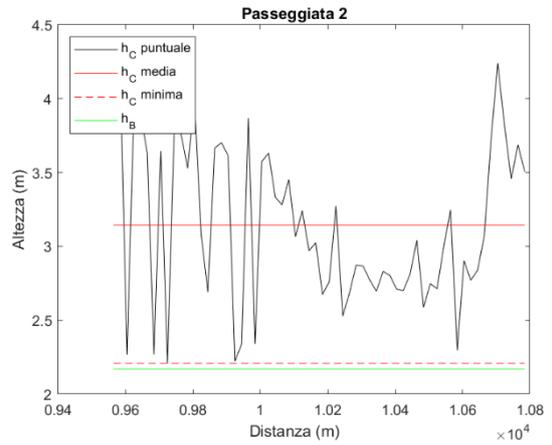
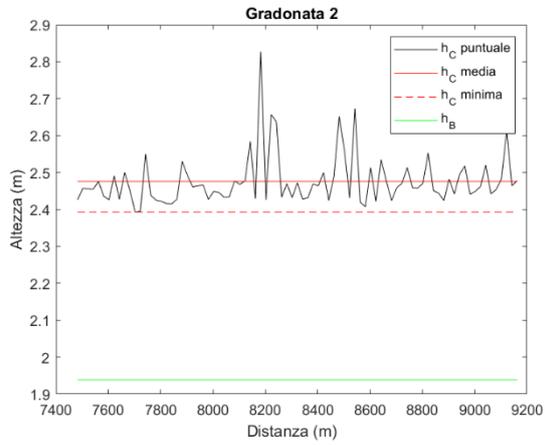
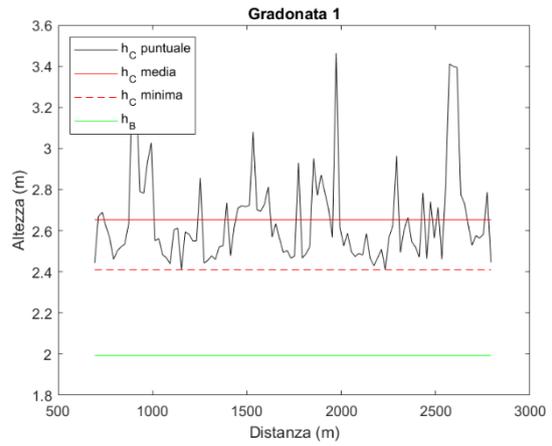
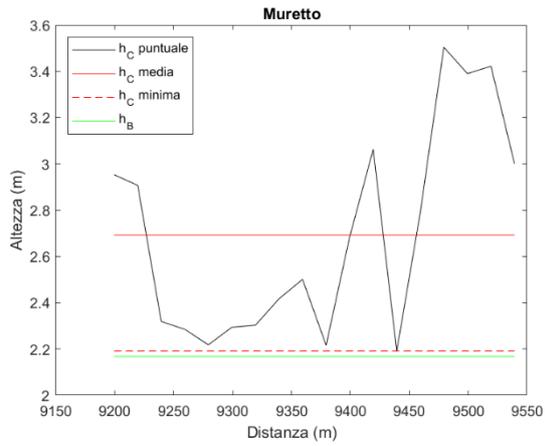
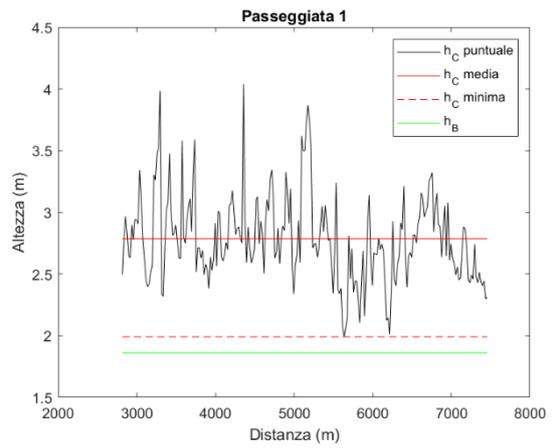
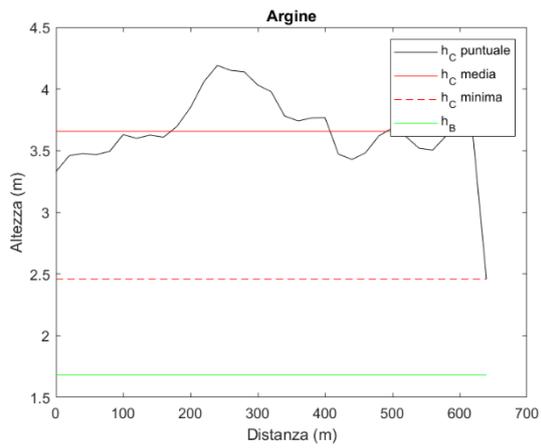


Figura 49: Altezze significative opere di difesa

Si riporta il seguente ritaglio da GIS in cui è possibile osservare la disposizione delle opere di difesa lungo il litorale:

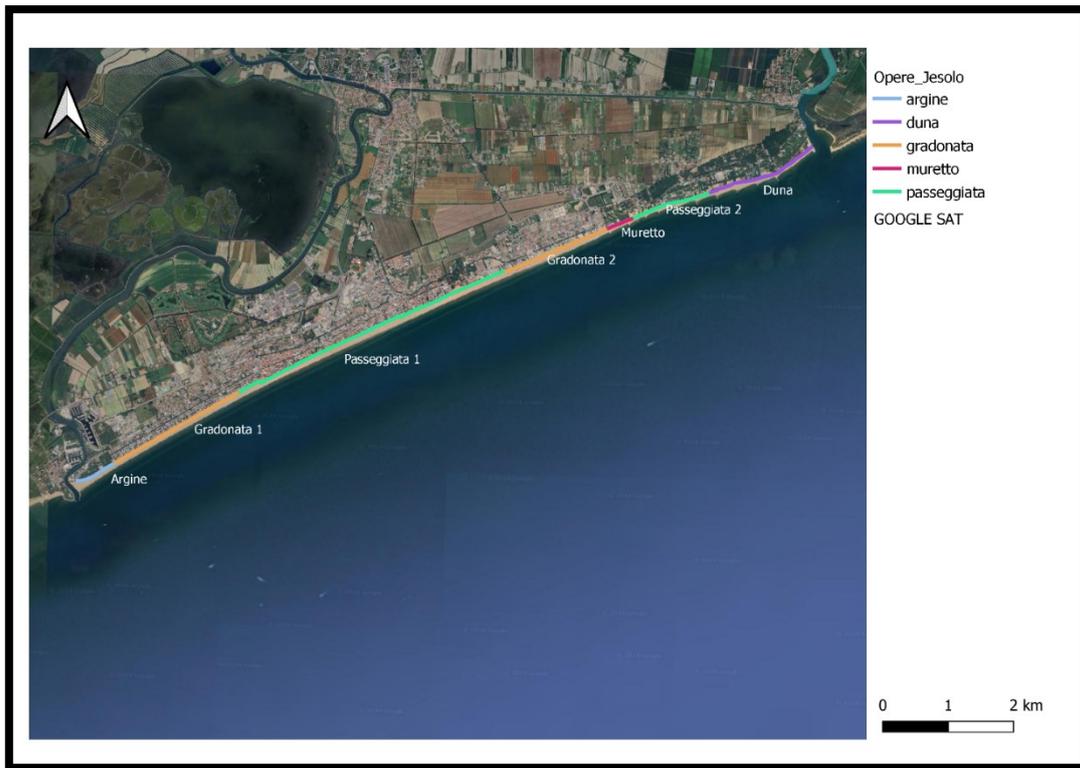


Figura 50: Disposizione spaziale delle difese lungo il litorale

Si associa alla precedente immagine un grafico che riporta l'andamento delle quote medie e minime delle opere lungo tutta la cella litoranea dall'argine procedendo verso la duna:

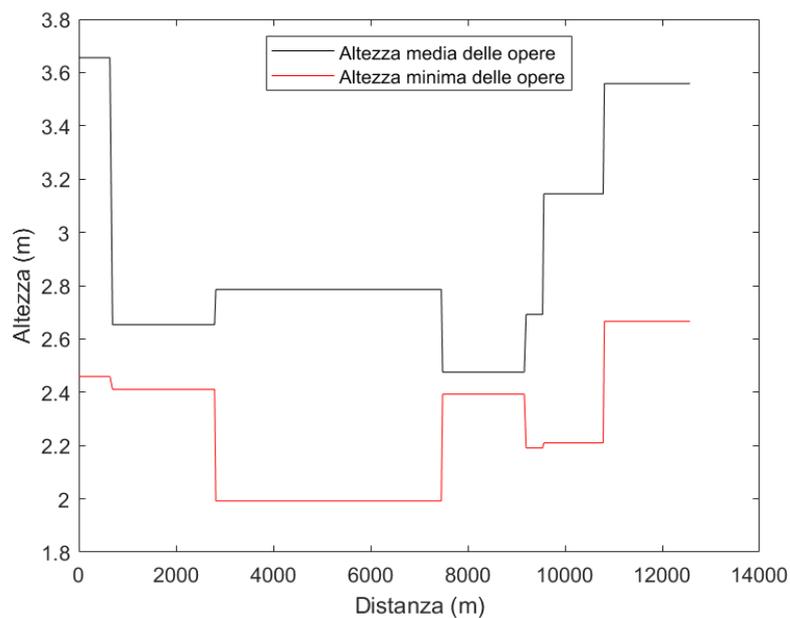


Figura 51: Altezza media e minima delle difese lungo il litorale

Nel seguente istogramma si riassumono le altezze più significative per tipologia di opera, ovvero le altezze medie o minime:

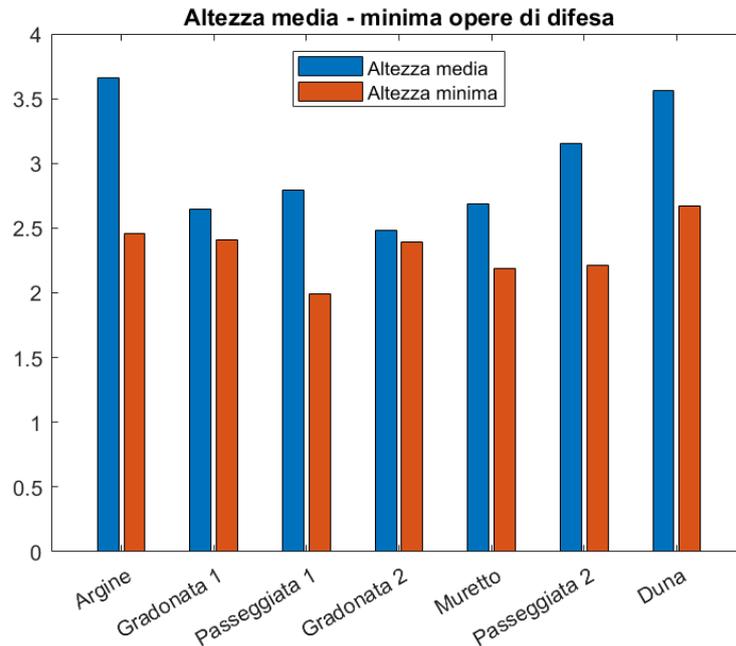


Figura 52: Altezze medie e minime per tipologia di opera

5.2 Calcolo del livello totale del mare

Per la stima dell'indice si necessita lo studio dell'altezza d'onda incidente sulla spiaggia, per effettuare quest'analisi ci si avvale di un processo descritto da Stockdon secondo cui a partire dalla pendenza della spiaggia si calcola la componente di run up e set up che aggiunte all'altezza d'onda e al livello del mare restituiscono il livello totale del mare incidente sul litorale.

Per conoscere il valore delle due componenti dell'onda (run up e set up) è necessario studiare il profilo della spiaggia, grazie a rilievi batimetrici è possibile conoscere diversi profili lungo il litorale di Jesolo, è stata scelta la batimetria n° 8 in quanto posizionata centralmente rispetto al litorale.

Dall'analisi della pendenza si ottiene una pendenza media di 0.018%, come si evince dalla linea di tendenza ottenuta interpolando i dati dall'altezza massima della batimetria fino al livello del mare:

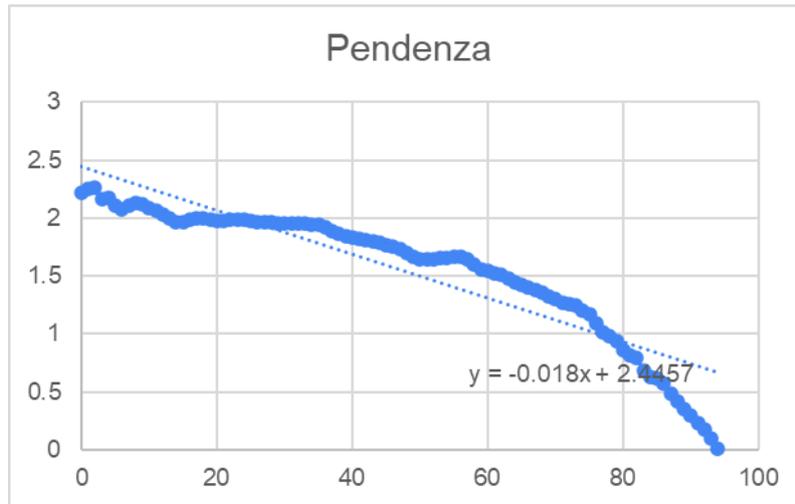


Figura 53: pendenza della spiaggia

Avendo a disposizione la pendenza della spiaggia è possibile procedere con il calcolo delle due componenti d'onda descritte in precedenza, run up e set up. Per il calcolo si utilizza il metodo di Stockdon esplicitato nel capitolo 4.

Si ottiene il seguente grafico, in cui si osservano correlate le due componenti dell'onda e l'altezza d'onda stessa, si nota come all'aumentare dell'altezza onda aumentino le due componenti:

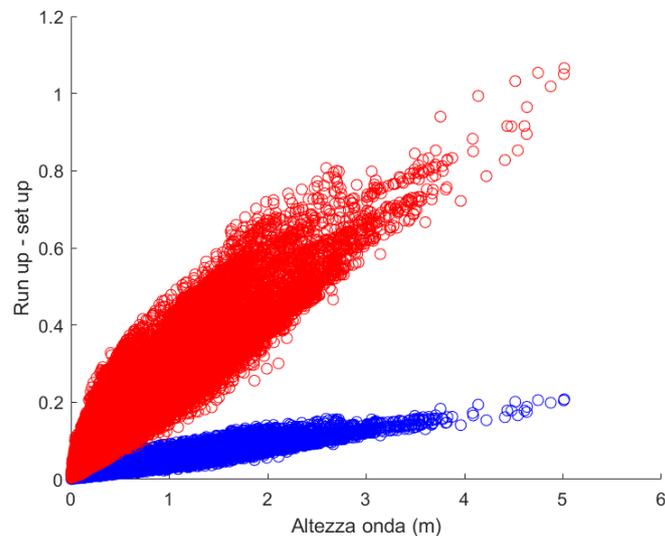


Figura 54: Run up e set up rispetto all'altezza d'onda

Essendo ora note le due componenti dell'onda e l'altezza d'onda è possibile confrontarli per osservare quanto la componente di run up e set up influisca sull'onda totale. Si osserva il confronto dei parametri nel seguente grafico:

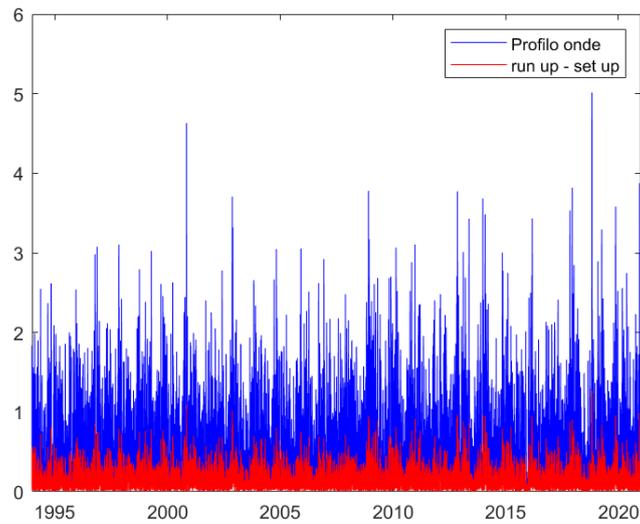


Figura 55: Onde e rispettiva quota di run up e set up

Si procede ora integrando il precedente grafico combinando le componenti di run up e set up, l'altezza d'onda e il livello del mare per ottenere il livello totale che potrebbe causare interferenza con la spiaggia. Si osserva la combinazione dei tre parametri nel seguente grafico:

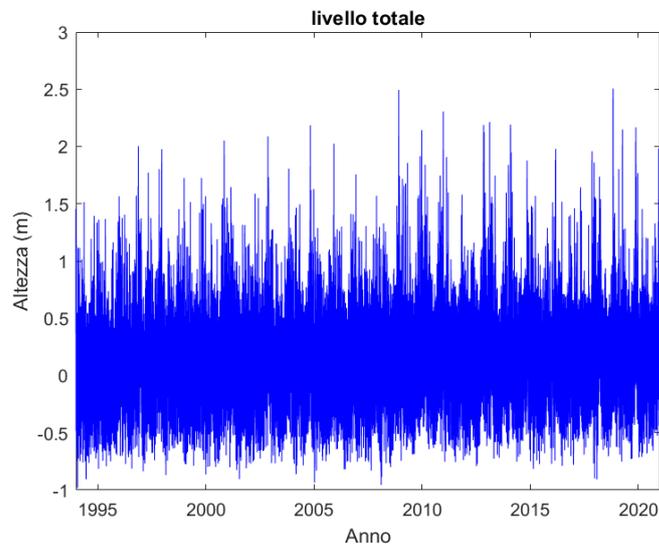


Figura 56: livello finale del mare

Si nota come dall'elaborazione totale dei dati di onde e livelli si arrivi ad osservare valore di altezze anche superiori ai 2 m. In dettaglio la seguente tabella elenca gli eventi più importanti in termini di livello totale del mare, si possono osservare circa 60 eventi:

Tabella 10: Eventi di mareggiata e livelli

Data	Altezza [m]
18/11/1996	2
06/05/1997	1.77
07/11/1997	1.8
20/12/1997	1.98
02/01/1999	1.73
21/10/1999	1.72
06/11/2000	2.05
16/11/2002	2.09
16/11/2002	1.95
25/11/2002	1.71
26/11/2002	1.73
01/11/2003	1.81
31/10/2004	2.19
03/12/2005	2.02
09/12/2006	1.76
01/12/2008	2.49
10/12/2008	1.73
12/12/2008	1.74
03/02/2009	1.72

Data	Altezza [m]
27/04/2009	1.86
30/11/2009	1.92
23/12/2009	1.93
24-25/12/2009	2.14
19/02/2010	1.84
01/11/2010	1.75
23/12/2010	1.7
23-24/12/2010	2.31
24/12/2010	1.73
16/02/2011	1.91
31-01/11/2012	2.19
11/11/2012	2.13
11/02/2013	2.21
16/05/2013	1.75
26/12/2013	1.84
30/01/2014	1.74
31/01/2014	2.19
10/02/2014	1.95
05/11/2014	1.88

Data	Altezza [m]
28-29/02/2016	1.88
05/03/2016	1.98
05/11/2017	1.96
12/12/2017	1.86
11/03/2018	1.73
28/10/2018	1.77
29/10/2018	2.51
01/11/2018	1.75
01/02/2019	1.8
02/02/2019	1.8
04/04/2019	2.15
12/11/2019	2.52
13/11/2019	1.93
15/11/2019	1.88
17/11/2019	2.04
24/11/2019	1.74
21/12/2019	1.77
04/12/2019	1.83
04-05/12/2020	1.98

Si procede con una breve analisi degli eventi appena elencati.

La media degli eventi osservati corrisponde a 1.92 m., l'evento di massima registrato dall'indice corrisponde all'evento del 12 novembre 2019 con un'altezza di 2.52 m.

Dal seguente grafico si osservano i superamenti in ordine temporale e il relativo livello:

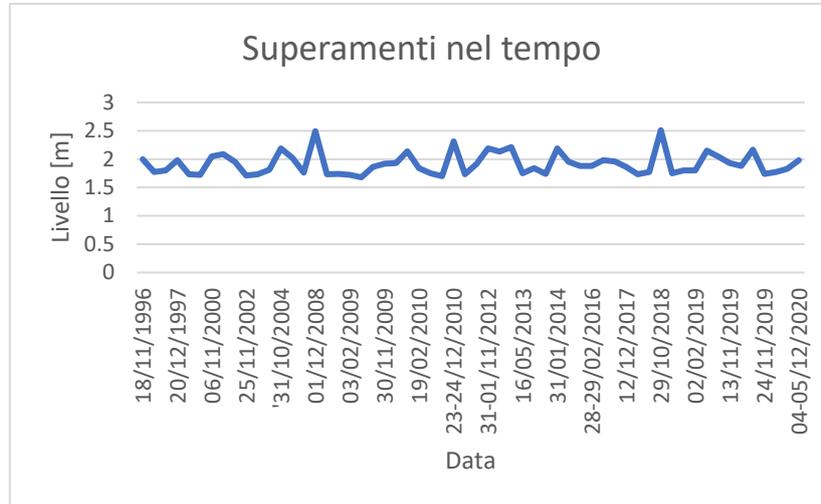


Figura 57: Superamenti nel tempo

Dal grafico si nota come nel 2008 e nel 2018 si manifestino gli eventi peggiori in termini di altezza di livello totale, con ciclicità quindi decennale.

Con un'analisi completa e ultimata delle altezze d'onda che possibilmente potrebbero minacciare il litorale e avendo analizzato le opere di difesa installate lungo lo stesso, sono ora disponibili tutti i dati necessari per valutare se nel corso del periodo 1994 - 2020 vi sono stati fenomeni di mareggiate tali da superare la quota delle opere di difesa e se tali superamenti hanno una durata significativa nel tempo da poter definire l'evento come allarmante.

5.3 Indice di Early Warning

Per valutare i superamenti si osserva il livello totale del mare, qualora questo superasse l'altezza delle difese si manifesterebbe un allagamento. Si ricordano i parametri utilizzati per valutare i superamenti ovvero:

Tabella 11: Tabella riassuntiva dei colori utilizzati

	Livello > H _C media
	Livello > H _C minima
	Livello > H _B per più di tre ore

Per verificare il fenomeno si indagano i grafici ottenuti da Matlab come riportato nella seguente immagine, in cui si osservano le quote per cui il livello del mare (linee blu verticali) è maggiore dell'altezza delle difese (linee orizzontali):

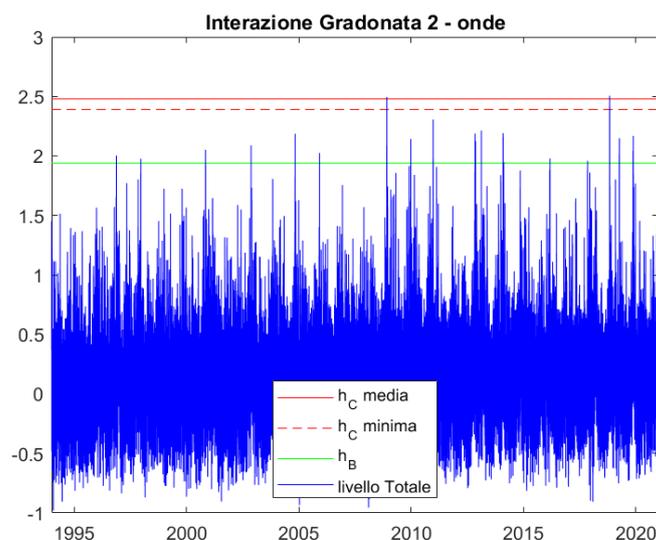


Figura 58: Interazione opera – onde

Si riporta l'ingrandimento del grafico precedente che verrà analizzato in seguito per esplicitare la metodologia di ricerca degli eventi di superamento delle difese. Nel seguente ritaglio si osservano in blu i livelli del mare mentre le linee rosse e verdi corrispondono alle diverse altezze di ciascuna opera di difesa, si valuta qualora il livello del mare sia più alto della linea della difesa, corrispondendo a un evento di allagamento. Si evidenziano con i riquadri rossi gli eventi di superamento:

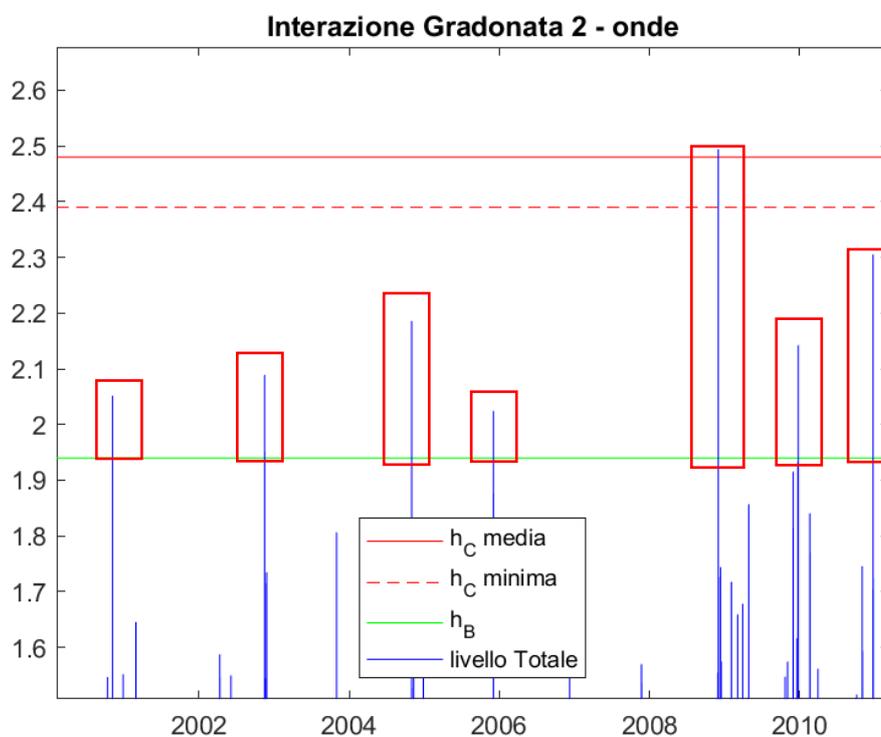


Figura 59: Eventi di superamento delle difese

In questo modo sarà possibile evidenziare gli eventi di mareggiata il cui livello è maggiore dell'altezza delle difese e con lo stesso metodo si indagherà sulla durata dell'evento.

5.4 Eventi individuati dall'indice

In questo capitolo verranno valutati i risultati complessivi ottenuti applicando l'indice, analizzando la totalità degli eventi con riferimento alla loro entità in termini di altezza d'onda e la durata.

Nella seguente tabella si riporta il numero di superamenti rilevanti osservati per tipo di opera:

Tabella 8: Superamenti per tipologia di opera

ID	OPERA	Sup. Hb	Sup. minima	Hc	Sup. media	Hc
1	ARGINE	35	3		0	
2	GRADONATA 1	7	3		0	
3	PASSEGGIATA 1	15	16		0	
4	GRADONATA 2	11	3		3	
5	MURETTO	2	6		0	
6	PASSEGIATA2	2	5		0	
7	DUNA	2	0		0	

Si nota come l'argine sia l'opera di difesa che presenta il numero più alto di superamenti, questo è dovuto alla bassa quota del piede.

Nella pagina seguente si inserisce la tabella che raccoglie tutti gli eventi significativi evidenziati dall'indice, classificandoli in base all'altezza raggiunta secondo la regola descritta nella tabella 10.

Nella seconda colonna della seguente tabella si contrassegnano gli eventi di cui si ha traccia e che sono stati trattati nel capitolo 4.4.

DATA, ORA	EVENTO INDIVIDUATO CON ANALISI STORICA		ARGINE		GRADONAT11		PASSEGGIATA11		GRADONAT12		PASSEGGIATA12		MURETO		GRADONAT13		PASSEGGIATA13		DUNA			
	sup. Hb	sup. Hc min	sup. Hc min	sup. Hc med	sup. Hb	sup. Hc min	sup. Hc med	sup. Hb	sup. Hc min	sup. Hc med	sup. Hb	sup. Hc min	sup. Hc med	sup. Hb	sup. Hc min	sup. Hc med	sup. Hb	sup. Hc min	sup. Hc med	sup. Hc min	sup. Hc med	
'18-Nov-1996 07:00:00																						
'07-Nov-1997 00:00:00	4	3						3	4													
'20-Dec-1997 08:00:00	5	4						4	5													
'06-Nov-2000 16:00:00	6	5						5	6													
'16-Nov-2002 06:00:00	14	4						3	4													
'16-Nov-2002 16:00:00		4						4	4													
'31-Oct-2004 08:00:00	4	2						2	2													
'03-Dec-2005 06:00:00	6	4						4	4													
'01-Dec-2008 05:00:00	7	7	4					7	7	3												
'23-Dec-2008 02:00:00	6	6						3	3													
'25-Dec-2008 00:00:00	7	7						5	5	3												
'19-Feb-2010 12:00:00	5	5						3	3													
'19-Feb-2010 20:00:00	4	4						4	4													
'23-Dec-2010 20:00:00	8	8						6	6	4												
'16-Feb-2011 18:00:00	4	4						2	2													
'31-Oct-2012 21:00:00	14	14						2	2													
'01-Nov-2012 05:00:00	7	7						7	5	5												
'11-Nov-2012 04:00:00	7	7						5	3	3												
'11-Feb-2013 18:00:00	7	7						6	5	5												
'26-Dec-2013 05:00:00	10	10						6	5	5												
'31-Jan-2014 04:00:00		6						5	4	4												
'10-Feb-2014 18:00:00	4	4						3	3	4												
'05-Nov-2014 18:00:00	4	4						1	1	1												
'28-Feb-2016 23:00:00	8	8						2	2	2												
'05-Mar-2016 18:00:00	3	3						3	3	3												
'05-Nov-2017 20:00:00	3	3						3	3	2												
'12-Dec-2017 02:00:00	4	4						3	3	2												
'28-Oct-2018 08:00:00	4	4						12	12	12												
'29-Oct-2018 11:00:00	4	4						12	12	4												
'01-Feb-2019 21:00:00	5	5						4	3	3												
'04-Apr-2019 18:00:00	5	5						3	2	2												
'12-Nov-2019 21:00:00	2	2						2	2	3												
'13-Nov-2019 06:00:00	4	4						2	2	2												
'15-Nov-2019 07:00:00	4	4						1	1	1												
'17-Nov-2019 09:00:00	4	4						4	2	2												
'21-Dec-2019 03:00:00	4	4						4	4	3												
'04-Dec-2020 22:00:00	4	4						3	3	1												
'05-Dec-2020 09:00:00	11	11						3	3	1												

Figura 60: Eventi di mareggiata rilevati dall'indice

Nella seguente immagine si osserva lo schema di rappresentazione delle 3 tipologie di allarme, i colori scelti ovvero la scala di giallo, arancione e rosso servono a rappresentare il grado di severità dell'evento, come riportato nella tabella 10. L'immagine seguente riassume tutti gli eventi osservati dall'indice mettendo in evidenza il livello massimo di allerta raggiunto per ciascun evento di mareggiata, inoltre sono contrassegnati da una X dieci dei dodici eventi emersi dall'analisi storica (capitolo 4.4):

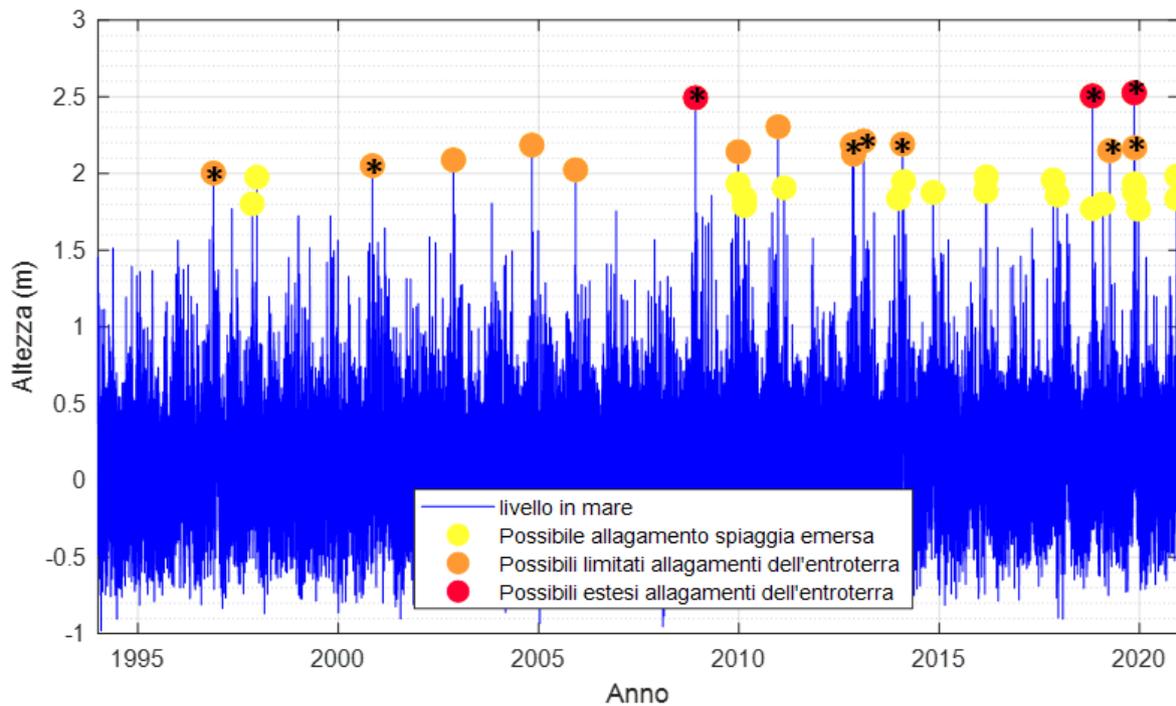
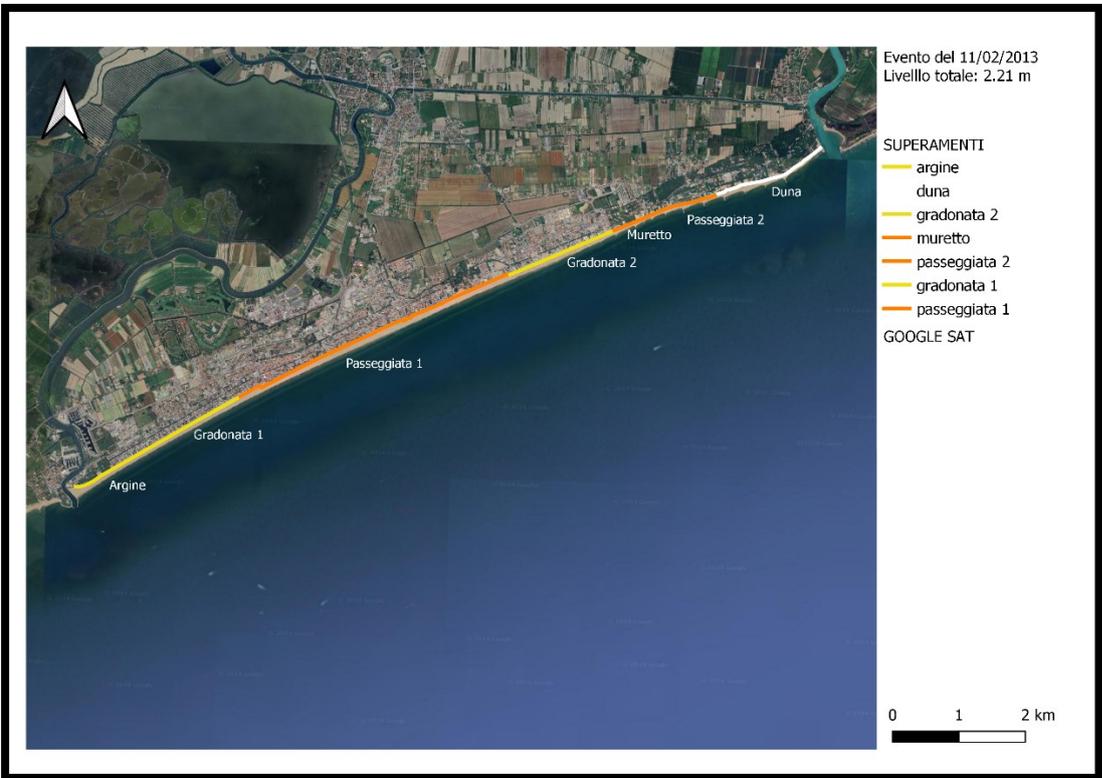
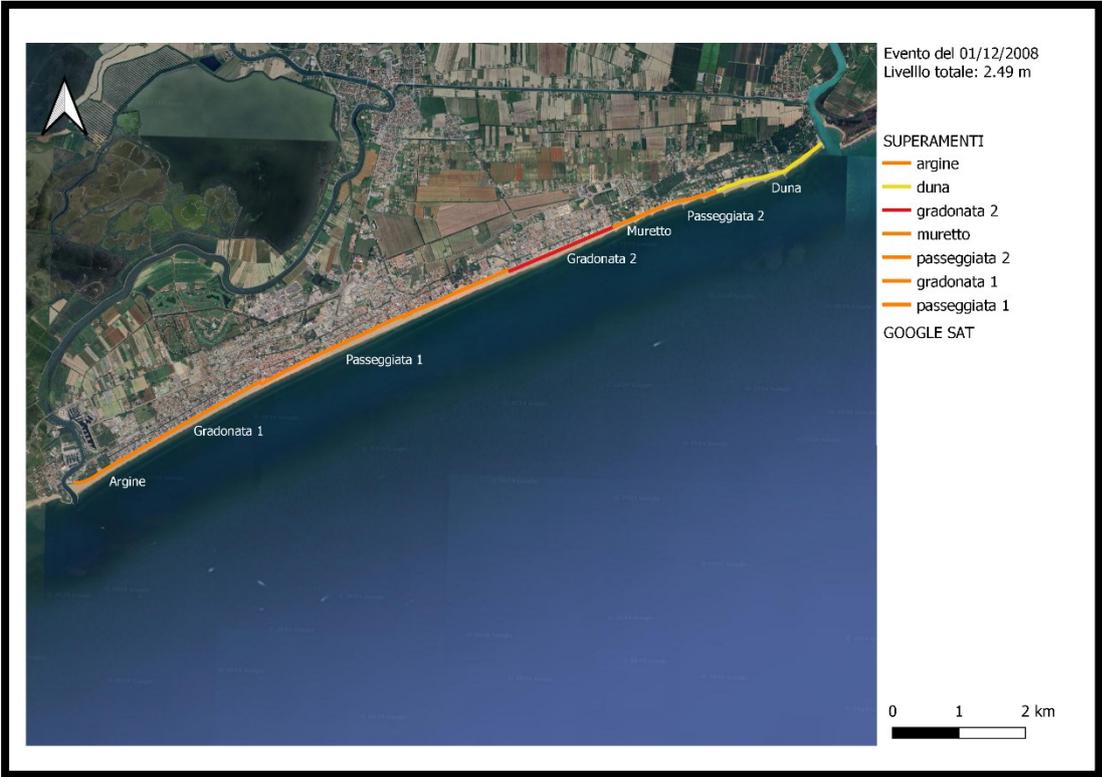


Figura 61: Eventi di mareggiata più gravosi rilevati dall'indice

Gli eventi del 16/05/2013 e del 01/11/2018 non sono stati messi in evidenza dall'indice in quanto la durata dell'evento risulta inferiore di 3 ore e quindi come indicato dalla tabella 10 risulta etichettato come non rilevante, di fatto i due eventi non sono stati riportati nella figura 60.

Per rendere più comprensibile il grafico appena proposto e osservare come gli allagamenti insistono lungo il litorale si procede a un'analisi spaziale degli eventi.

Nelle seguenti tre immagini si riproducono tre mappe di allagamento che evidenziano il livello di allerta specifico per ogni porzione di litorale, suddiviso in base alle opere di difesa che lo caratterizzano:



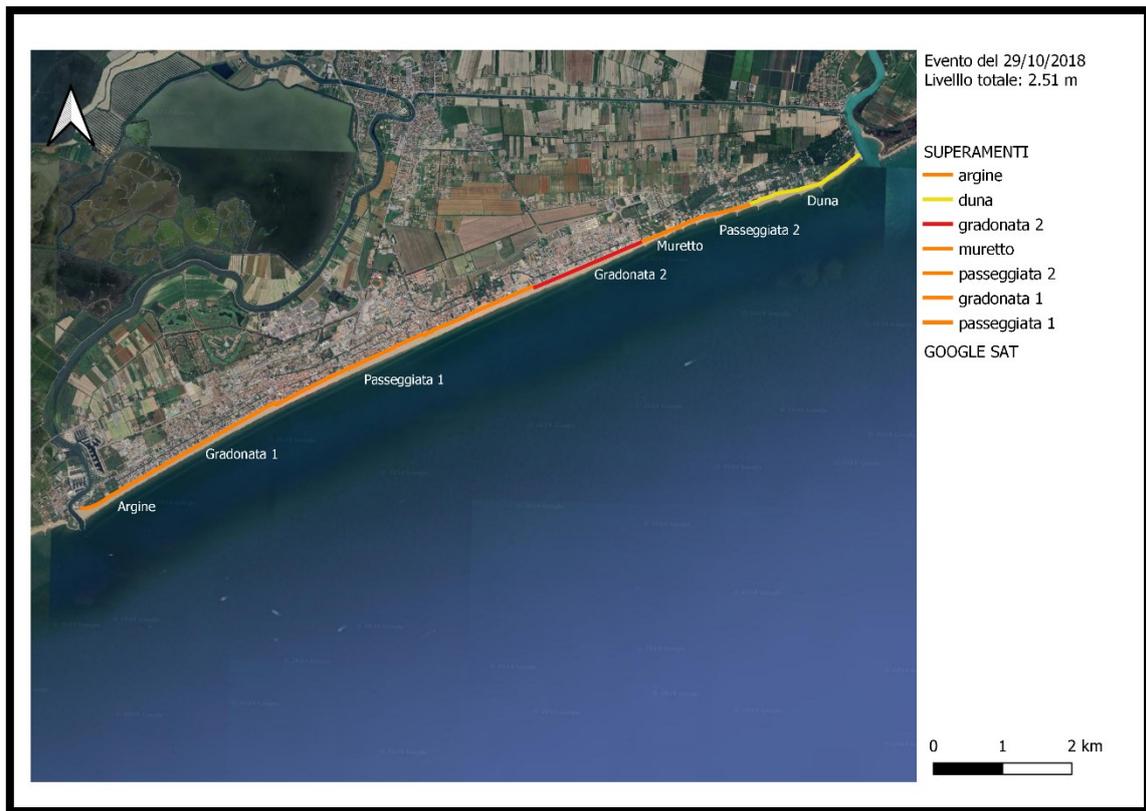
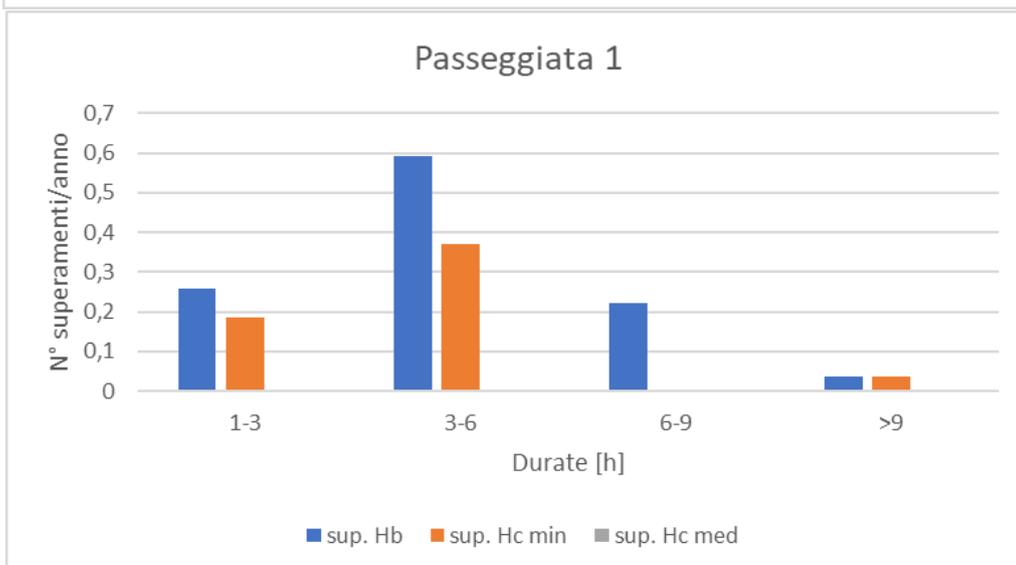
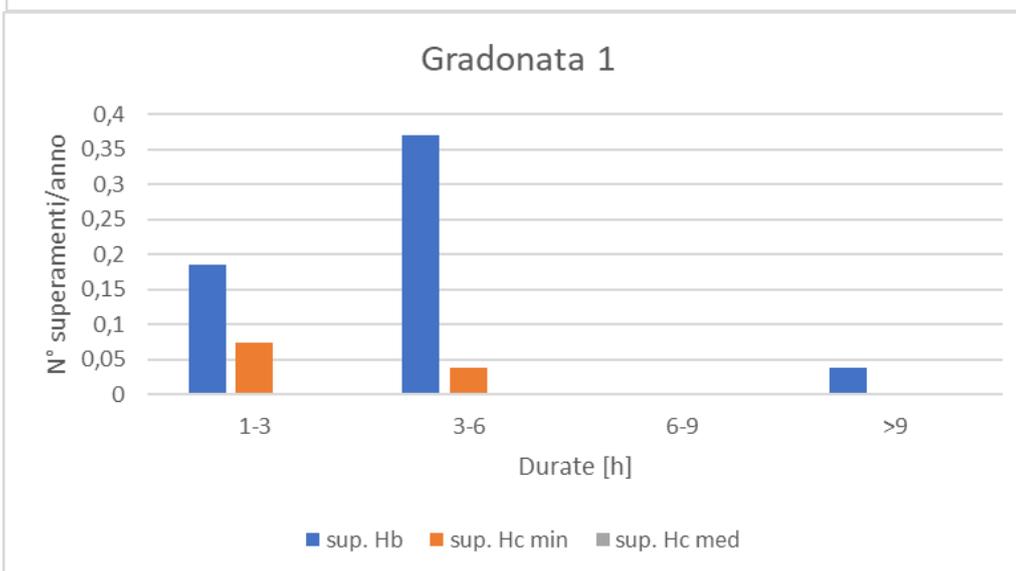
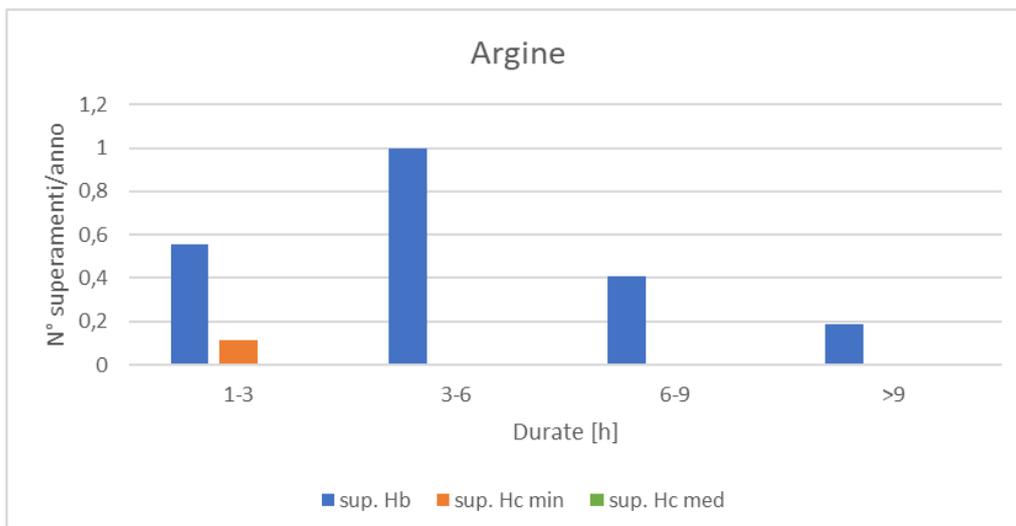


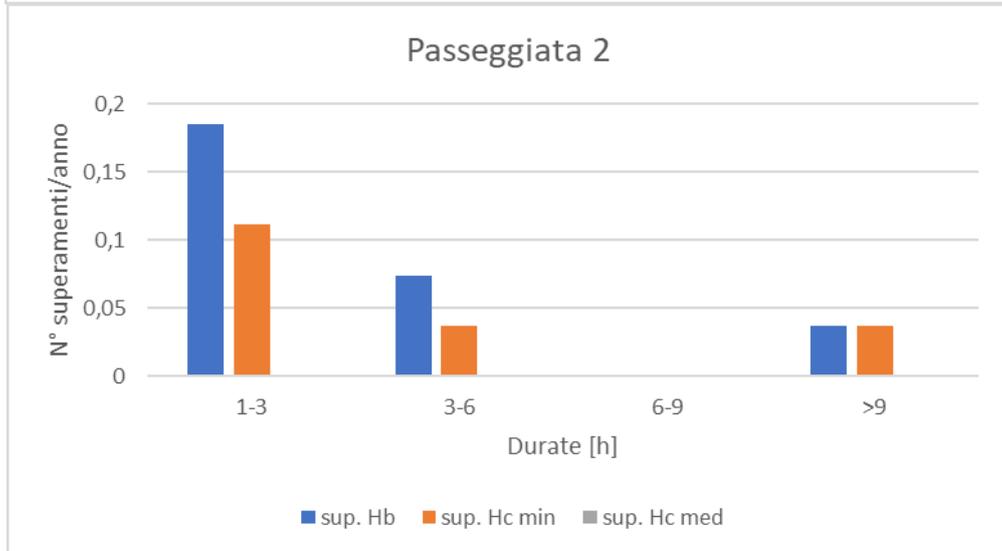
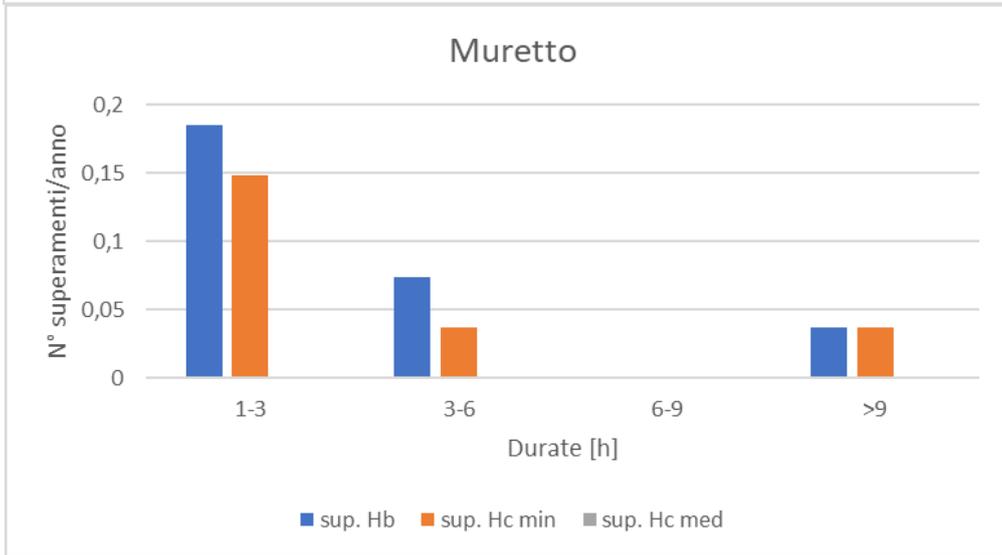
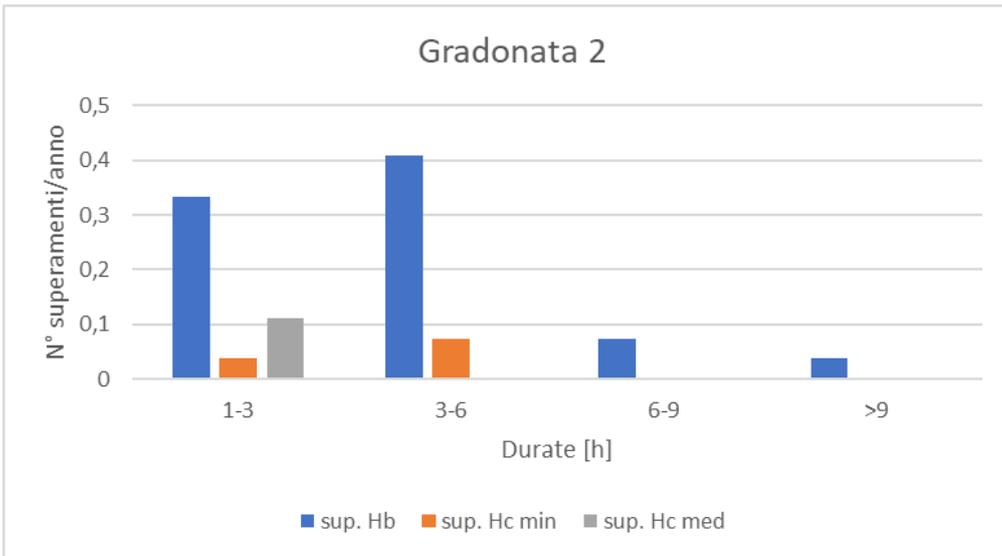
Figura 62: Mappa degli allagamenti per tre eventi di mareggiata

Si procede ora classificando la durata di tutti gli eventi rilevanti messi in evidenza dall'indice differenziati in base all'opera di studio, si valutano quattro classi di eventi dalla durata di:

- Da 1 a 3 ore.
- Da 3 a 6 ore.
- Da 6 a 9 ore.
- Maggiori di 9 ore;

Si osservano nei seguenti grafici, si analizzano i superamenti per anno, si ricorda che il set di dati include misurazioni per 27 anni:





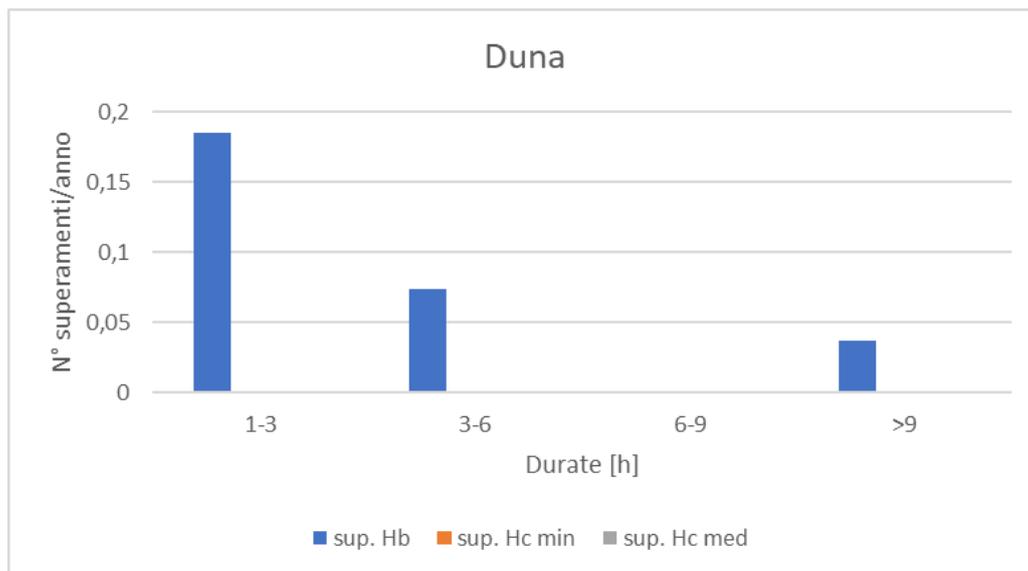


Figura 63: Classificazione degli eventi secondo la durata

Dai grafici appena analizzati si osserva che solamente in due casi il livello del mare ha superato l'altezza media dell'opera di difesa, ovvero la gradonata 2 negli eventi del 01/12/2008 e 29/12/2018, seppur con una durata limitata entro le 3 ore. Si nota che la maggior parte degli eventi rientra nella classe da 1 a 3 ore. Gli eventi con una durata maggiore di nove ore sono meno di dieci in 27 anni.

È possibile constatare che gli eventi messi in evidenza dall'indice sono effettivamente eventi che si sono manifestati lungo il litorale, i più gravi infatti sono riportati nel capitolo 4.4. Si può quindi affermare che la metodologia alla base dell'indice è valida e conferma gli eventi storici di mareggiate estreme.

6. CONCLUSIONI

Come già approfondito in precedenza lo scopo di questo elaborato è la produzione di un prototipo per l'indice di Early Warning, si definisce prototipo in quanto per verificarne la correttezza ed efficacia è necessario partire da un'analisi storica e verificare che l'indice sappia effettivamente mettere in luce ed evidenziare eventi di cui noi abbiamo certezza si siano verificati; In questo modo è possibile validare la metodologia alla base dell'indice.

Dall'analisi conclusa nel capitolo precedente è stato possibile confermare la validità dell'indice, in quanto la metodologia sviluppata permette di confermare gli eventi di mareggiate estreme che si sono effettivamente manifestati negli anni. L'indice è solido e in relazione ai dati di ingresso che vengono forniti è in grado di mettere in luce eventi critici di allagamento costiero.

Il funzionamento dell'indice è fortemente condizionato dalla qualità di dati che vengono analizzati dallo stesso, in particolare si potrà sfruttare al meglio il potenziale di analisi degli eventi futuri dell'indice solamente se i dati di previsione di livelli e onde sono validi.

Seguendo la metodologia adottata per delineare questo prototipo sarà possibile sfruttare a pieno la potenzialità dell'indice, il cui utilizzo e scopo risulta di primaria importanza per tutte quelle realtà che ad oggi sono interessate da fenomeni di allagamento ma anche per tutte quelle realtà che semplicemente sono connesse al mare per vicinanza o interesse, in quanto come approfondito nel corso dell'elaborato il livello del mare è in aumento così come la frequenza di eventi meteorologici estremi che rendono il rischio di mareggiate sempre più concreto.

BIBLIOGRAFIA

- Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 778, 146193.
- Canestrelli P., Cerasuolo M., Pastore F. (1997) Eccezionale persistenza di alte maree a Venezia nel periodo 1996-gennaio 1997 rilevanza del contributo meteorologico.
- Coraci E. & Crosato F, (2014). Gli eventi meteo-marini di gennaio e febbraio 2014 nel Nord Adriatico. Monitoraggio analisi.
- Ferla M. (2009). Gli eventi di acqua alta nel dicembre 2008 nella laguna di Venezia e lungo il litorale nord adriatico.
- IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.
- Mastella C. (2016). Piano Comunale delle Acque Città di Jesolo - 1 fase.
- Ruol, P., Martinelli, L., & Favaretto, C. (2023). Gestione integrata della zona costiera. Aggiornamento dello studio e monitoraggio per la definizione degli interventi di difesa dei litorali dall'erosione nella Regione Veneto-Linee guida.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7), 573-588.
- Stockdon, H. F., Sallenger Jr, A. H., List, J. H., & Holman, R. A. (2002). Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data. *Journal of Coastal Research*, 502-513.