



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di laurea

*Innalzamento del livello del mare: fenomenologia
e analisi delle misure di adattamento per uno
sviluppo costiero resiliente*

Relatore: prof. Salvatore Pappalardo

Laureando: Giacomo Cudin

Anno Accademico

2022–2023

Abstract

L'innalzamento del livello del mare è una problematica globale di grande rilevanza derivante dai cambiamenti climatici. L'indotto aumento delle temperature globali – dovuto all'incessante immissione in atmosfera di gas climalteranti per mano antropica – causa, tra l'altro, il disgelo dei ghiacciai e l'espansione termica delle acque marine, i due principali fattori contribuenti all'innalzamento dei mari. Le conseguenze di questo fenomeno sono molteplici e variano in maniera sostanziale a livello globale.

Le regioni costiere affrontano un aumento dell'erosione e l'intrusione dell'acqua salata nelle risorse idriche potabili, con conseguente impatto sulla biodiversità e minaccia agli insediamenti umani. Le isole e le regioni costiere o deltizie a bassa altitudine sono invece le più vulnerabili, molte delle quali rischiano di essere completamente inondate o addirittura sommerse dalle acque marine entro pochi decenni.

Strategie di adattamento e misure di protezione opportune sono cruciali per far fronte a questa sfida. Le difese costiere fisiche come muri di contenimento, argini e dighe, possono proteggere con successo dalle inondazioni e dalle mareggiate, ma potrebbero portare a pesanti implicazioni ecologiche e ambientali, oltre ad avere elevati costi di costruzione. Le soluzioni cosiddette *ecosystem-based*, come il ripristino delle mangrovie, offrono una discreta protezione costiera preservando gli ecosistemi, ma non sono in grado di contenere l'effettivo innalzamento dei mari. Nelle zone ad alta vulnerabilità, invece, prevalgono misure di sistemazione, sia fisiche che istituzionali, anche se la strategia di adattamento più efficiente sarà sempre più spesso la completa dislocazione delle popolazioni, provocando lo sfollamento di milioni di persone.

Un'appropriata gestione e pianificazione territoriale garantisce uno sviluppo sostenibile e resiliente delle aree costiere a rischio. Inoltre, di fondamentale importanza è un'accurata valutazione della vulnerabilità, al fine di prioritizzare gli sforzi di adattamento grazie anche alla cooperazione internazionale e al sostegno finanziario, specialmente per i Paesi in via di sviluppo.

Tuttavia, è importante riconoscere che l'adattamento da solo non può risolvere il problema. Gli sforzi dovrebbero essere integrati da ambiziose misure di mitigazione per ridurre le emissioni di gas serra, per costruire un futuro resiliente e sostenibile di fronte ai cambiamenti climatici, tra cui l'innalzamento del livello dei mari.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Contesto e problematica: fenomenologia dell'innalzamento del livello dei mari	1
1.1.1 Misurare il livello dei mari.....	1
1.1.2 Le cause.....	3
1.1.2.1 Riscaldamento oceanico	3
1.1.2.2 Fusione dei ghiacci terrestri	4
1.1.2.3 Risorse idriche del suolo	6
1.1.3 Previsioni future	7
1.1.4 Il livello del mare relativo	8
1.1.5 Impatti costieri	10
1.2 Obiettivo	10
1.3 Inquadramento geografico	11
1.3.1 Tuvalu	11
1.3.2 Paesi Bassi.....	12
1.3.3 Bangkok	13
2. MATERIALI E METODI	15
2.1 Materiali	15
2.2 Metodi	16
2.2.1 Sea Level Projection Tool.....	16
2.2.2 Coastal Risk Screening Tool.....	16
2.2.3 Population Estimator	18
3. RISULTATI E DISCUSSIONE	19
3.1 Analisi territoriali	19
3.1.1 Tuvalu	19
3.1.2 Paesi Bassi.....	22
3.1.3 Bangkok	25
3.1 Strategie e meccanismi di adattamento	29
3.2.1 Protezione (<i>hard and sediment-based protection</i>)	29
3.2.2 Adattamento <i>ecosystem-based</i>	31
3.2.3 Avanzamento (<i>advance</i>)	32
3.2.4 Sistemazione (<i>Accomodation</i>).....	34
3.2.5 Ritiro/arretramento (<i>retreat</i>)	35
4. CONCLUSIONI	37
<i>Bibliografia e sitografia</i>	<i>41</i>

1. INTRODUZIONE

1.1 Contesto e problematica: fenomenologia dell'innalzamento del livello dei mari

1.1.1 Misurare il livello dei mari

L'innalzamento del livello medio dei mari è una delle problematiche strettamente legate agli impatti locali e globali dei cambiamenti climatici. Sin da quando i satelliti hanno cominciato a monitorare gli oceani nel 1993, il loro livello medio globale si è alzato più di 9.8 cm. Ad oggi, il tasso globale medio d'innalzamento – cioè quanto velocemente il livello marino si sta alzando – ammonta a 3.4 mm/anno (Figura 1.1). Tuttavia, negli ultimi 30 anni, esso è più che raddoppiato, passando da 2.0 mm/anno nel 1993 a 4.4 mm/anno nel 2022; un tasso che potrebbe crescere fino a 6.6 mm/anno entro il 2050, secondo le stime della NASA.¹

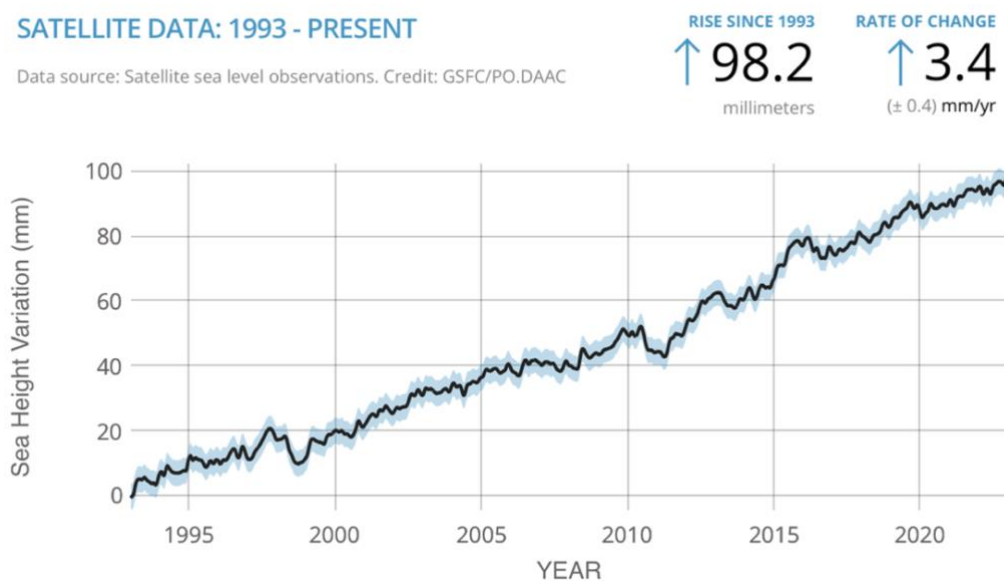


Figura 1.1: andamento annuale del livello medio globale dei mari, dal 1993 al 2023. Fonte: NASA

«Tracciare i gas climalteranti che rilasciamo in atmosfera ci dà un'indicazione di quanto in là stiamo spingendo il clima, ma il livello dei mari ci mostra come questo sta rispondendo», afferma lo scienziato Joshua Willis del *Jet Propulsion Laboratory*.¹ L'innalzamento del livello dei mari è infatti una diretta conseguenza del riscaldamento globale, che contribuisce a tale fenomeno tramite l'espansione dell'acqua marina che si riscalda e l'aggiunta di acqua dolce, proveniente principalmente dalla fusione di ghiacciai e calotte polari. Ciononostante, anche se misurare le variazioni del livello dei mari è piuttosto immediato grazie a mareografi e altimetri radar, quantificare il contributo della dilatazione termica e dell'aggiunta netta di massa richiede stime indipendenti.

Per calcolare l'effettivo spostamento d'acqua dalla terra agli oceani, oltre a dirette misurazioni dell'elevazione e del tasso di fusione dei ghiacciai durante rilievi *in situ*, gli scienziati si affidano soprattutto a rilevazioni satellitari di quasi impercettibili variazioni del campo gravitazionale agente sugli oceani, causate proprio dall'aumento di massa. Circa l'espansione termica, invece, campionamenti effettuati da imbarcazioni di passaggio, satelliti e boe (sia ancorate che alla deriva) permettono di determinare il riscaldamento superficiale, mentre per misurazioni più in profondità sono impiegate imbarcazioni di ricerca oceanografica e flotte di robot acquatici. Il seguente grafico (Figura 1.2) mostra il budget dell'innalzamento medio globale del livello dei mari, comparando le stime analitiche con l'effettivo innalzamento osservato.

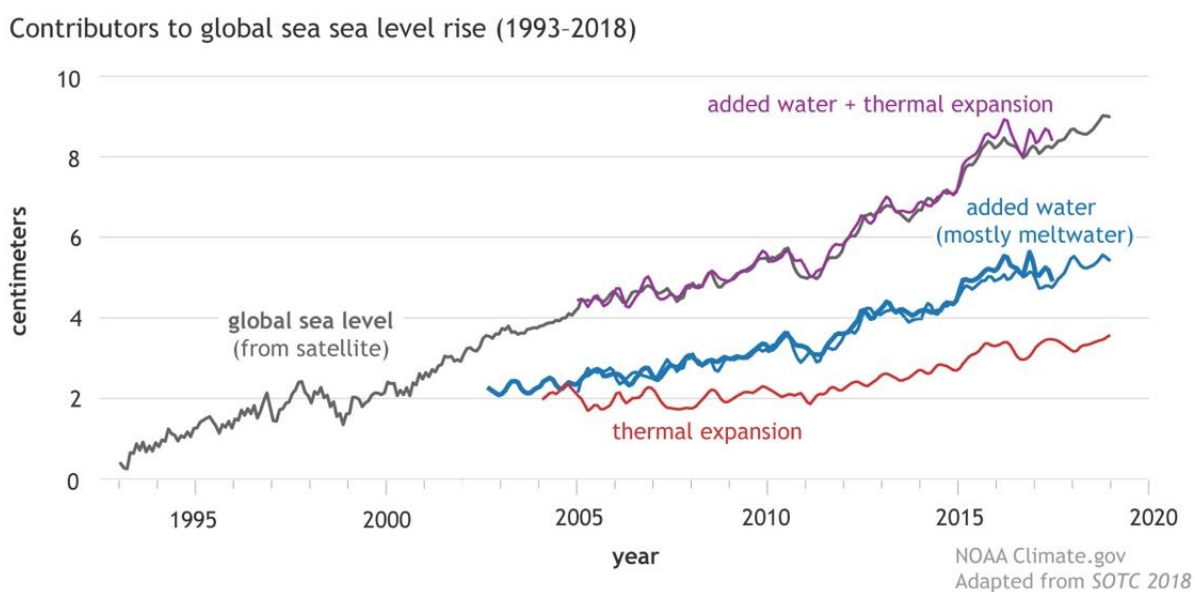


Figura 1.2: innalzamento dei mari osservato a partire dal 1993 (linea nera) e stimato (viola), dato dalla somma dei diversi contributi indipendenti quali espansione termica (rosso) e aggiunta d'acqua, soprattutto di fusione (blu). Fonte: NOAA²

È immediato notare come la somma delle stime dei differenti contributi segue con notevole precisione l'effettivo andamento dell'innalzamento marino. Ciò significa che i metodi adottati dagli scienziati sono solidi e permettono loro di sviluppare affidabili previsioni – sia globali che locali – sulla base dei possibili scenari futuri, «*al fine di aiutare le comunità vulnerabili in tutto il mondo a comprendere meglio i rischi che correranno in un nuovo clima*», afferma l'oceanografa Nadya Shiffer.

1.1.2 Le cause

1.1.2.1 Riscaldamento oceanico

Coprendo più del 70% della superficie terrestre, gli oceani assorbono ad oggi più del 90% del calore in eccesso nel sistema climatico. La loro energia è aumentata a dismisura negli ultimi decenni: dal 1955, nei primi 2000 metri di profondità degli oceani globali è stato registrato un incremento pari a 345 zJ (zetajoules*), mentre l'intera colonna d'acqua riporta dal 1992 un aumento di 187 zJ.¹

Si tratta di quantità importanti di energia il cui sviluppo futuro – difficilmente lineare – resta dipendente dagli scenari emissivi. Secondo l'IPCC, infatti, «entro il 2100 gli oceani assorbiranno un quantitativo di calore da 2 a 4 volte superiore a quello [assorbito] tra il 1970 e il presente se il riscaldamento globale non supera i 2°C, e da 5 a 7 volte superiore nel caso di emissioni superiori».

Nel secolo scorso, misurazioni della temperatura della superficie oceanica hanno evidenziato la relazione tra il riscaldamento della superficie degli oceani (riportata nella *Figura 1.3*) e la loro espansione. Riscaldandosi, infatti, le molecole d'acqua si muovono più velocemente ed occupano più spazio, causando un aumento netto di volume noto come espansione – o dilatazione – termica, un fenomeno che, secondo la NASA, ha causato circa un terzo dell'innalzamento del livello dei mari osservato dagli altimetri satellitari dal 2004. Inoltre, secondo un recente studio, è molto probabile che il riscaldamento oceanico continui anche qualora le temperature medie globali – e quindi il *forcing* radiativo – si dovessero stabilizzare.¹ L'assorbimento di energia degli oceani contribuirà dunque ancora a lungo all'innalzamento del livello dei mari, sia direttamente, per dilatazione termica, sia indirettamente, velocizzando la fusione di ghiacciai e calotte polari.

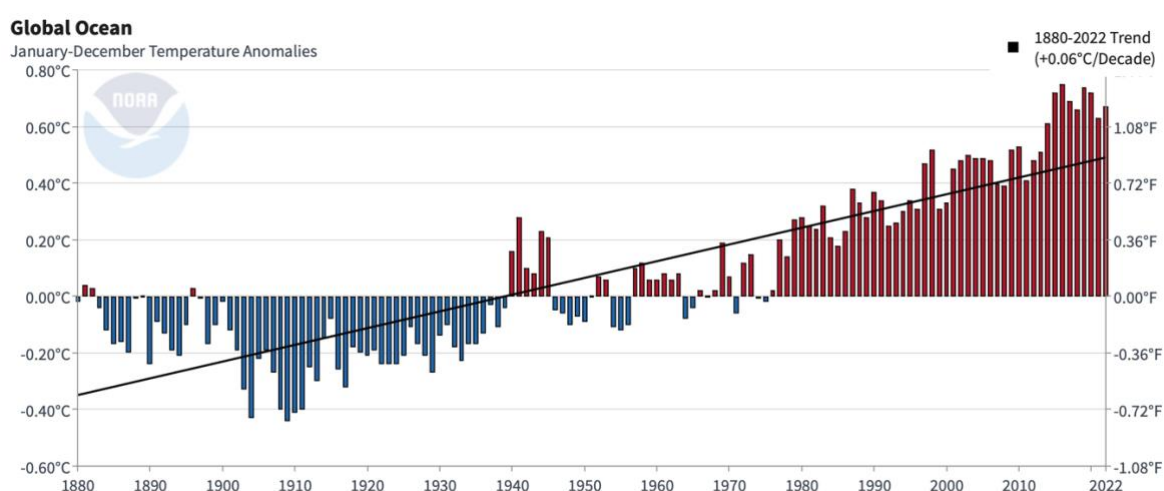


Figura 1.3: anomalia della temperatura oceanica superficiale dal 1880 al 2022, espressa in riferimento alla media 1901-2000. Fonte: NOAA NCEI²

* Un zetajoule (zJ) equivale a 10^{21} Joule ed è approssimativamente il consumo energetico globale annuo.

1.1.2.2 Fusione dei ghiacci terrestri

Come già osservato nella *Figura 1.2*, la maggior parte dell'innalzamento medio globale del livello marino è attribuibile proprio all'aggiunta netta di massa proveniente dalla fusione della criosfera terrestre, suddivisibile principalmente in ghiacciai montani e continentali. Entrambi si formano per accumulo e compattazione – tramite gelo e disgelo – di masse nevose, ma presentano sostanziali differenze dimensionali. I ghiacciai montani, detti anche alpini, sono presenti ad elevate altitudini e latitudini, formandosi solitamente all'interno di un bacino collettore (o nevaio), che ne limita l'estensione. I ghiacciai continentali, anche noti come calotte di ghiaccio (o polari) o *inlandsis*, superano invece i 50.000 km² di estensione e si assottigliano verso le coste, dove avviene il distacco di iceberg (il cosiddetto *calving*) nell'oceano.

➤ Calotte glaciali

I ghiacci che ricoprono la Groenlandia e l'Antartide sono le uniche due calotte glaciali esistenti sulla Terra e insieme contengono approssimativamente il 68% dell'acqua dolce globale e più del 99% del ghiaccio terrestre. La loro acqua di fusione è responsabile di circa un terzo dell'innalzamento medio del livello del mare osservato dal 1993 e, se fusi completamente, i due ghiacciai continentali potrebbero alzare il livello degli oceani di quasi 70 metri.¹

	Groenlandia	Antartide
<i>Estensione (km²)</i>	1,700,000	12,300,000
<i>Volume (km³)</i>	3,000,000	26,500,000
<i>Massimo spessore del ghiaccio (km)</i>	3.0	4.9
<i>Massa (Gt)</i>	2,700,000	24,100,000

Tabella 1: caratteristiche fisiche delle due calotte polari. Fonte: Copernicus³

Dal 2002, i satelliti della missione GRACE e GRACE-FollowOn della NASA monitorano le dimensioni della calotta glaciale antartica e groenlandese, le quali hanno riportato una perdita di ghiaccio annua rispettivamente di 151 e 273 Gt. Come si nota dalle *Figure 1.4 e 1.5*, l'assottigliamento della calotta polare antartica è concentrato in Antartide Ovest, dove esso raggiunge 4.4 metri (–4 metri d'acqua equivalenti*), mentre in alcune regioni si è registrato un contenuto ispessimento, che non supera 1 t/m². A differenza dell'Antartide, l'assottigliamento del ghiacciaio continentale groenlandese riguarda l'isola nella sua quasi totalità, mentre l'accumulo è pressoché trascurabile; in alcune aree costiere a moderate altitudini sono state registrate variazioni fino a 5.5 metri di spessore.

* 1 metro d'acqua equivalente corrisponde a 1,000 kg/m², cioè 1.1 m³ di ghiaccio.

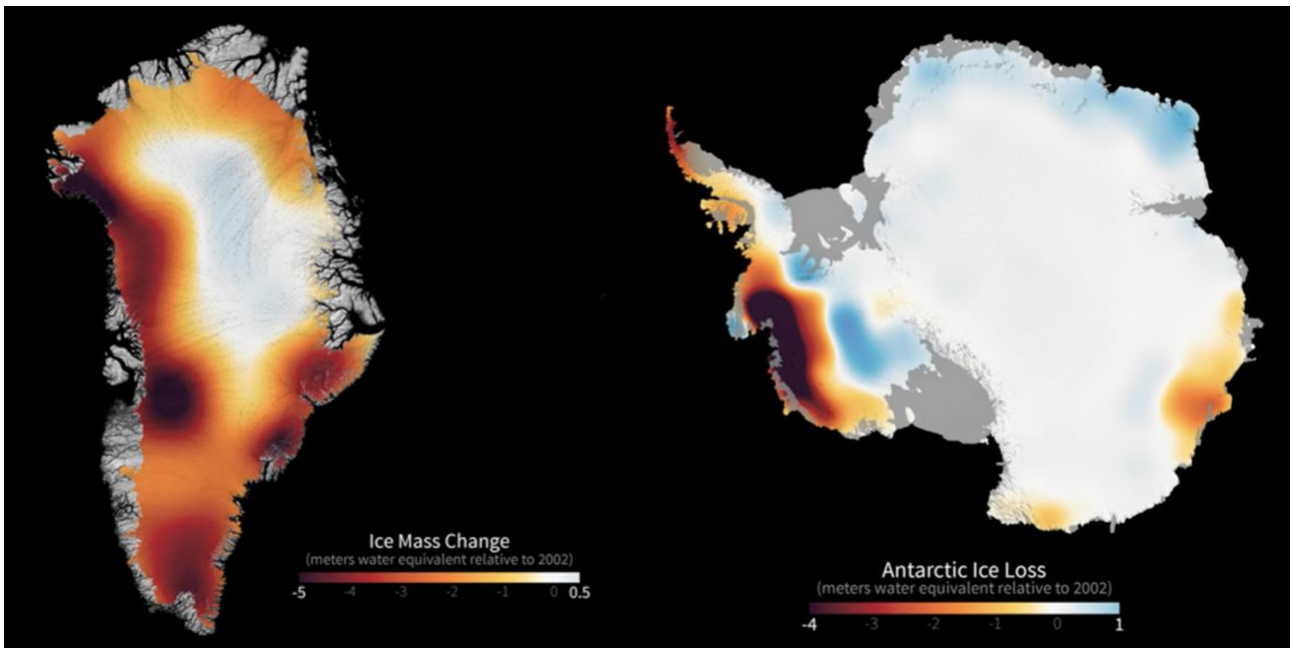


Figura 1.4 e 1.5: perdita di ghiaccio dal 2002 della calotta polare groenlandese (sinistra) e antartica (destra), espressa in metri d'acqua equivalenti. Fonte: NASA SVS¹

➤ Ghiacciai

I ghiacciai presenti sulla Terra sono più di 198.000 e stime del *World Glacier Monitoring Service* evidenziano come la loro massa globale, attorno alle 142.000 Gt, sia diminuita drasticamente negli ultimi decenni: dal 1961 la variazione è di quasi 12.000 Gt, ma la velocità di fusione è in costante aumento, come evidenziato dai seguenti grafici.

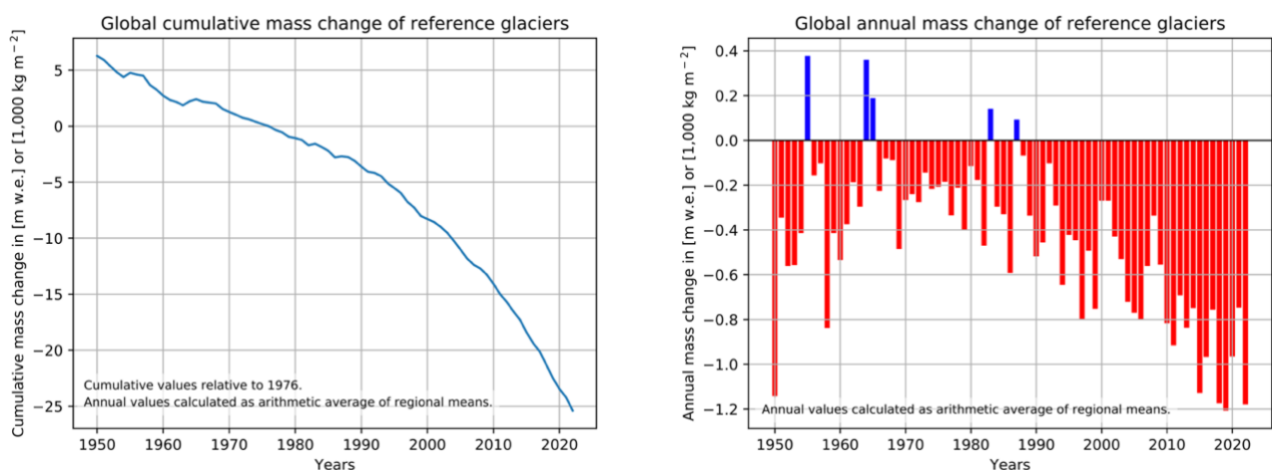


Figura 1.6 e 1.7: variazione globale di massa cumulata (sinistra) e annuale media (destra), dal 1950 al 2022, espressa in metri d'acqua equivalenti. Fonte: WGMS⁴

Dal 1950 i ghiacciai hanno quindi perso, in media, un quantitativo di ghiaccio superiore a 30 t/m² e, negli ultimi anni, la loro perdita annuale di massa – stimata di 267 Gt/anno – ha praticamente eguagliato quella della calotta polare groenlandese e quasi raddoppiato quella antartica, nonostante

la massa complessiva dei ghiacciai alpini sia all'incirca 20 volte inferiore alla prima e 170 volte inferiore alla seconda. È dunque evidente che i ghiacciai montani, considerando le loro perdite in relazione alla massa, siano i maggiori contribuenti dell'innalzamento del livello dei mari, rappresentandone quasi un quarto.ⁱⁱ Tuttavia, l'esponenziale accelerazione del tasso di fusione – osservata nei grafici – fa intendere che il loro protagonismo sia solo destinato ad aumentare. Infatti, secondo un recente studio pubblicato su *Science*, entro il 2100 si perderanno tra il 49% ed l'83% dei ghiacciai – cioè dal 26 al 41% della loro massa totale – e la loro completa scomparsa si stima possa provocare un ulteriore aumento del livello medio globale dei mari di 0.32 ± 0.08 m.ⁱⁱⁱ

➤ *Banchisa polare*

Nonostante la fusione del ghiaccio marino non implichi una diretta aggiunta di massa agli oceani, la parziale o totale assenza della banchisa può accelerare il tasso di ablazione dei ghiacciai continentali e montani ad alte latitudini sia direttamente, favorendo il distacco di iceberg, sia indirettamente, riflettendo meno energia solare e quindi velocizzando il riscaldamento oceanico e atmosferico.

1.1.2.3 Risorse idriche del suolo

Gli oceani sono la parte principale del ciclo idrologico globale e, dal momento che la massa d'acqua sul pianeta è costante, una variazione della quantità d'acqua terrestre comporta una variazione complementare di quella marina, e viceversa.

Nell'ultimo secolo, il volume d'acqua sulla terra – e quindi negli oceani – è variato in modo ragguardevole per mano dell'uomo. Da un lato, la costruzione di grandi dighe su scala mondiale ha trattenuto ingenti quantitativi d'acqua; dall'altro lato, però, in molte zone del mondo si preleva acqua dolce da acquiferi non ricaricabili, acqua che viene eventualmente scaricata nei mari.^{iv}

Tuttavia, le principali variazioni sono attribuibili alla variabilità e stagionalità delle precipitazioni, governate da fattori climatici sia naturali – come *El Niño* e *La Niña* – che antropici. Il riscaldamento globale, in particolare, è responsabile di cicloni e uragani più frequenti o intensi in alcune regioni del pianeta, poiché le acque oceaniche si scaldano ed evaporano più facilmente, mentre un'atmosfera più calda può trattenere maggiori quantitativi d'acqua. Questa alterazione del ciclo idrologico aumenta notevolmente il volume d'acqua che precipita sulla terraferma, molta della quale resta intrappolata nel sottosuolo. L'accumulo netto di acque sotterranee è infatti in crescita e si è stimato che abbia rallentato il tasso del recente innalzamento del livello dei mari del 15%.^v

1.1.3 Previsioni future

Secondo le più recenti previsioni, riportate dal Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) nel sesto *Assessment Report* nel 2021, entro la fine del secolo è previsto un innalzamento del livello medio del mare che varia da 0.38 a 0.77 metri, a seconda dello scenario. L'IPCC ha infatti elaborato cinque differenti percorsi di sviluppo chiamati “*shared socioeconomic pathways*” (SSP), che tengono in considerazione le probabili emissioni, ma anche potenziali cambiamenti socioeconomici – come popolazione, densità urbana, educazione, uso del suolo e benessere – che influenzano l'utilizzo di combustibili fossili. Sulla base di questi cinque SSP sono stati proposti altrettanti scenari di riscaldamento, che riportano il forzante radiativo – ovvero la misura dell'influenza nel bilancio tra energia entrante e uscente dal sistema Terra-atmosfera – raggiunto entro il 2100 (da 1.9 a 8.5 W/m²). In *Figura 1.8* sono riportate le evoluzioni dell'innalzamento medio globale del livello del mare sulla base dei cinque differenti scenari, descritti di seguito.

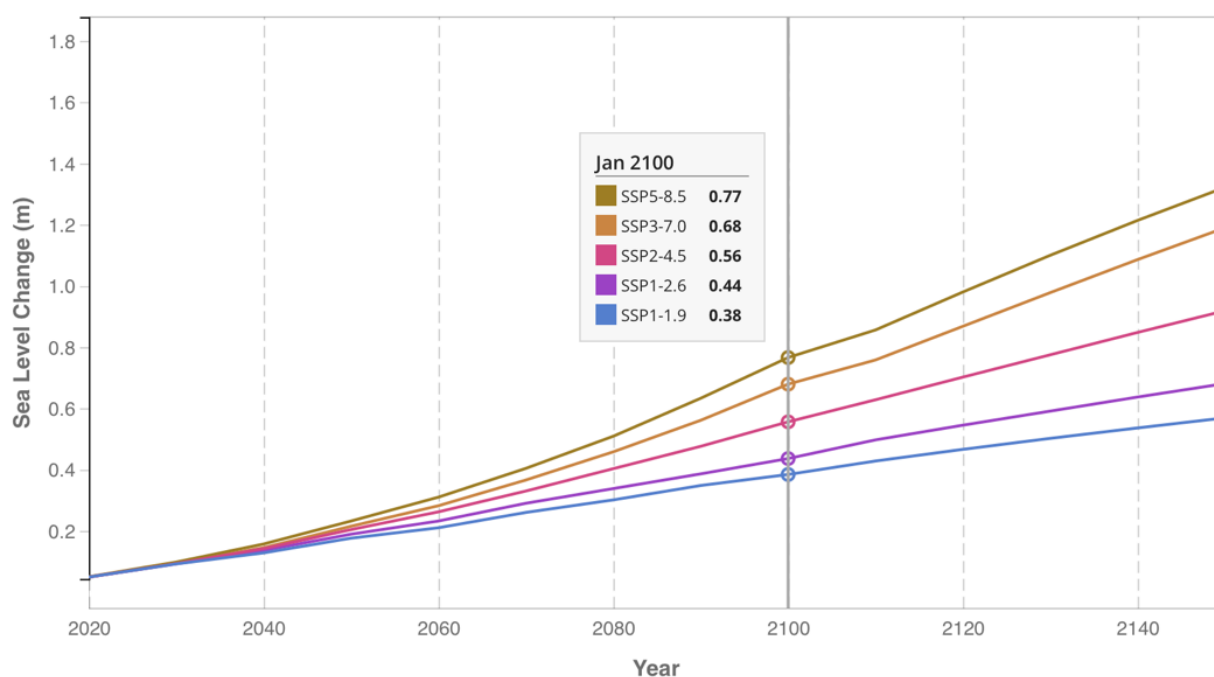


Figura 1.8: previsioni dell'innalzamento del livello medio globale dei mari. *Fonte: IPCC*⁵

- SSP1-1.9: lo scenario “sostenibilità” rispetta gli accordi di Parigi e limita il riscaldamento globale a 1,5°C nel 2100 rispetto ai livelli preindustriali (temperatura media del periodo 1850-1900) e implica emissioni globali nette di CO₂ pari a zero intorno alla metà del secolo.
- SSP1-2.6: il riscaldamento si mantiene al di sotto dei 2,0°C entro il 2100, prevedendo il raggiungimento di emissioni nette nulle nel corso della seconda metà del secolo.

- SSP2-4.5: prevede un riscaldamento, nella migliore delle ipotesi, di circa 2,7°C entro la fine del secolo. Le preoccupazioni ambientali sono di scarso interesse internazionale, con gli Stati che non riducono drasticamente le emissioni entro il 2030, prediligendo lo sviluppo a scapito della sostenibilità.
- SSP3-7.0: questo scenario deriva dall'assenza di politiche climatiche aggiuntive e prevede livelli di CO₂ raddoppiati entro fine secolo a causa di uno sviluppo prettamente fossile e di forti disuguaglianze tra e dentro i Paesi.
- SSP5-8.5: lo sviluppo socioeconomico è accoppiato allo sfruttamento delle risorse fossili, al fine di alimentare uno stile di vita globale estremamente energivoro.

A prescindere dagli scenari emissivi, l'aumento del livello marino varia notevolmente su scala globale e può raggiungere fino a 2 metri entro il 2100 nelle località più esposte. Nel paragrafo successivo vengono discusse le principali cause di queste differenze geografiche.

1.1.4 Il livello del mare relativo

Tralasciando le variazioni frequenti e a breve termine dovute, ad esempio, a maree e mareggiate, è già stato osservato come il livello medio degli oceani sia in aumento. Tuttavia, il tasso di innalzamento varia notevolmente su scala globale (*Figura 1.9*), con alcune regioni che hanno riportato un innalzamento nettamente superiore alla media, altre che hanno addirittura riportato un abbassamento della superficie marina.

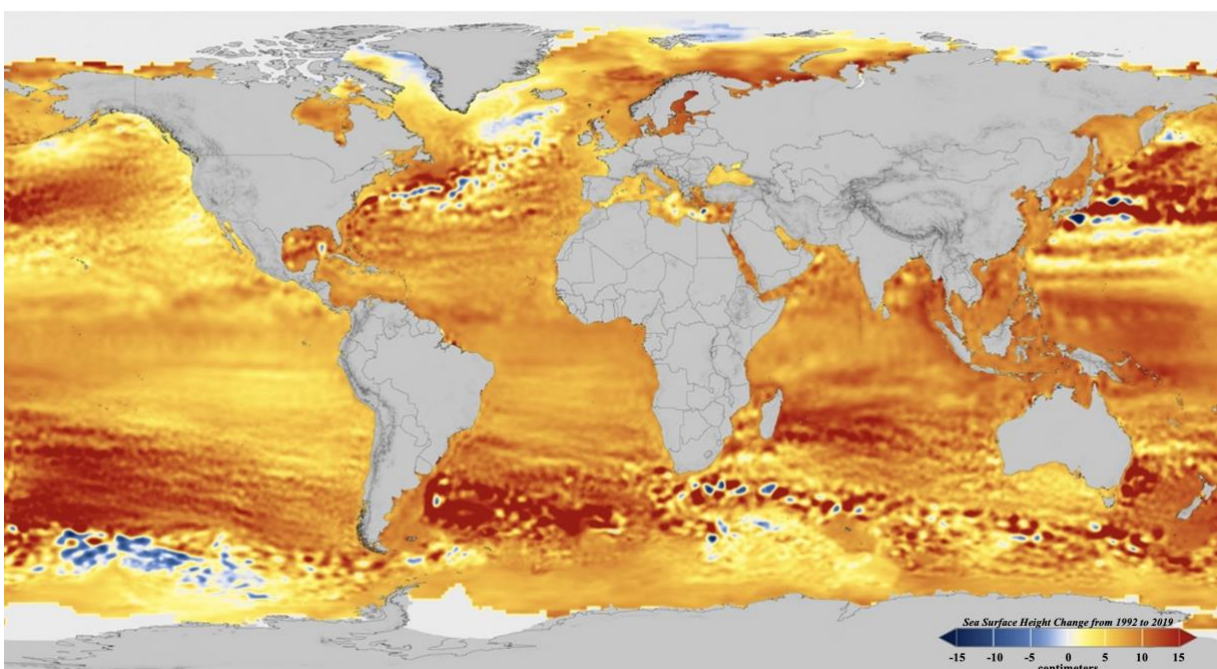


Figura 1.9: variazioni del livello del mare registrate nel periodo 1992-2019. Fonte: NASA¹

Le cause più comuni di questo fenomeno, noto come “livello del mare relativo”, sono le dinamiche oceaniche, l’irregolarità del campo gravitazionale terrestre ed il movimento verticale delle terre emerse.

Per dinamiche oceaniche si intende principalmente la redistribuzione delle masse d’acqua dovuta alle correnti marine e a fattori meteorologici come il vento, il riscaldamento atmosferico e oceanico, e i fenomeni di evaporazione e precipitazione. Il migliore esempio di tali dinamiche sono i *pattern* climatici de *El Niño* e *La Niña*, durante i quali il locale raffreddamento o riscaldamento dell’Oceano Pacifico meridionale possono causare temporanei ma drastici innalzamenti o abbassamenti del livello marino costiero.

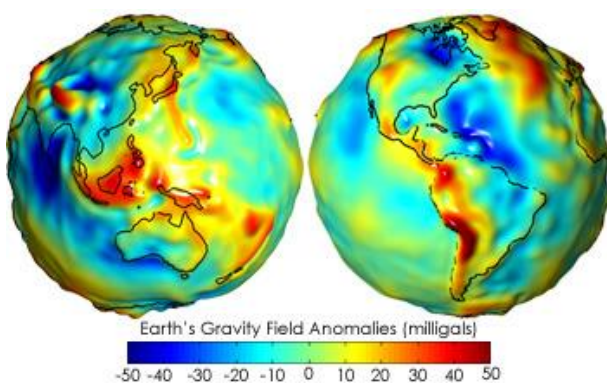


Figura 1.10: anomalie del campo gravitazionale terrestre generate dalla distribuzione di massa.

Fonte: NASA¹

Il secondo fattore riguarda la disuniformità nella distribuzione della massa terrestre, che si riflette in un campo gravitazionale disomogeneo (Figura 1.10). Per questo motivo, la superficie oceanica non è di forma perfettamente sferica o ellissoidale, bensì irregolare e disestata. L’acqua aggiunta negli oceani viene infatti distribuita seguendo anche il campo gravitazionale terrestre, al fine di bilanciare gli scompensi di massa.

Infine, il fattore più rilevante è senza dubbio lo spostamento verticale della terraferma nelle regioni costiere. Il fenomeno di subsidenza si verifica quando la terra sprofonda, con conseguente aumento del livello del mare relativo; al contrario, quando la terra emerge si parla di sollevamento (*uplift*) e si abbassa il livello del mare relativo. Le cause sono molteplici e possono essere sia naturali che indotte dall’uomo. Le prime coprono tempi scala molto lunghi e sono legate alla tettonica delle placche continentali e oceaniche, in particolare al loro slittamento una sull’altra e alla loro reazione elastica ad applicazioni o rimozioni di carichi, come nel caso della fusione delle calotte glaciali. I fenomeni relativi all’attività antropica sono invece compattazione e consolidazione del suolo. In questo caso, l’abbassamento della superficie terrestre è più rapido ed è causato dall’addensamento del terreno, come conseguenza di un sovraccarico che riduce i vuoti tra le particelle (compattazione) o espelle l’acqua dal suolo (condensazione). Motivo di sprofondamento del terreno può quindi essere il peso di una costruzione o edificio, ma anche il peso del terreno stesso. Infatti, gran parte della subsidenza è correlata all’estrazione di risorse dal sottosuolo, prima tra tutte l’acqua dolce, il cui prelievo è molto pronunciato nelle aree agricole densamente popolate.

1.1.5 Impatti costieri

L'innalzamento del livello dei mari mette in serio pericolo le comunità e gli ecosistemi costieri di tutto il mondo. Innanzitutto, esso aumenta il rischio di inondazioni delle aree a bassa altitudine durante tempeste e mareggiate, che possono danneggiare infrastrutture, abitazioni e coltivazioni, causando significative perdite economiche e mettendo a rischio la sicurezza delle persone. L'innalzamento dei mari amplifica inoltre l'azione delle onde e delle correnti marine, accelerando il tasso di erosione di spiagge e scogliere, portando dunque al restringimento del litorale e compromettendo la stabilità delle infrastrutture più esposte. Infine, l'avanzamento e l'innalzamento della superficie marina può provocare l'intrusione di acqua salata nelle falde acquifere costiere, contaminando le risorse di acqua dolce disponibili per l'agricoltura e l'approvvigionamento idrico delle comunità.

Gli ecosistemi costieri offrono protezione dalle mareggiate e dal deterioramento dei litorali; tuttavia, anche la salute e resilienza degli stessi ecosistemi è messa a dura prova da questi sempre più frequenti e intensi fenomeni, che minacciano l'integrità degli habitat e la loro ricca biodiversità.

Per affrontare gli impatti dell'innalzamento del livello del mare, le comunità costiere sono costrette alla gestione delle zone costiere in modo sostenibile e alla protezione degli habitat critici, oltre ad adottare opportune misure di adattamento come la costruzione di opere di difesa. In alcuni casi, invece, l'opzione più conveniente ed efficiente è l'abbandono degli insediamenti vulnerabili, costringendo le popolazioni colpite a migrare verso regioni più sicure.

1.2 Obiettivo

L'obiettivo della presente tesi è, *in primis*, quello di indagare il complesso fenomeno dell'innalzamento del livello dei mari, al fine di comprenderne le cause, gli effetti e le previsioni, prestando particolare attenzione a tre aree geografiche: l'isola-stato Tuvalu, i Paesi Bassi e la città di Bangkok. Saranno successivamente discussi i differenti piani e opzioni di risposta – implementabili oppure già implementati – delle tre aree di studio, commentandone l'efficacia, i possibili scenari futuri e stimandone eventualmente gli impatti sulla popolazione; in due casi studio si considereranno anche rappresentazioni geografiche delle previsioni d'innalzamento del livello del mare. Infine, con riferimento alla letteratura scientifica verranno analizzate le possibili misure di adattamento, valutandone benefici e svantaggi.

1.3 Inquadramento geografico

1.3.1 Tuvalu

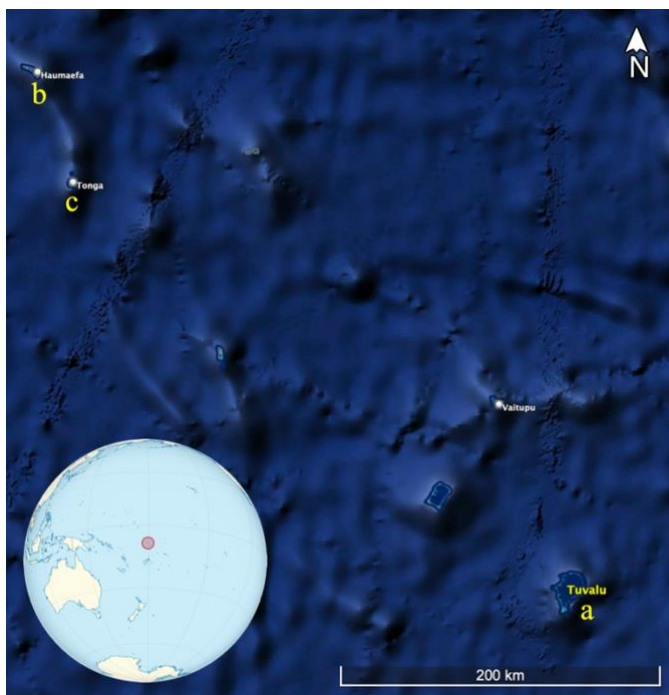


Figura 1.11: inquadramento geografico e satellitare dell'arcipelago di Tuvalu. Con le lettere sono indicati i tre centri abitati principali, riportati nelle *Figure 1.12*.

Fonte: *Google Earth Pro*

Tuvalu è uno Stato insulare situato nell'oceano Pacifico a metà strada tra le isole Hawaii e l'Australia. Comprende quattro isole coralline e cinque atolli, con una superficie totale di appena 26 km² che rende questo Stato il quarto più piccolo al mondo. Tuvalu è anche il secondo Paese meno popolato: la popolazione ammonta a poco più di 11,000 abitanti, 60% dei quali è residente nell'atollo più grande, nonché capitale, Funafuti (*Figura 1.11*). Con un'elevazione media di soli 1.83 metri sul livello del mare, Tuvalu è inoltre il secondo Stato al mondo per altezza media (dopo le Maldive). Dal 1993 al 2008, un mareografo installato e gestito dall'Università delle Hawaii nell'area di Funafuti ha registrato un tasso

d'innalzamento del livello del mare di 5.9 mm all'anno, nettamente superiore alla media globale. L'arcipelago polinesiano sta infatti soffrendo una preoccupante crescita del livello marino, il quale, unito a maree più alte della media, minaccia di sommergere completamente il Paese nel giro di pochi decenni.^{vi}



Figura 1.12a, 1.12b e 1.12c: inquadramento satellitare dei centri abitati di Funafuti (a), Nanumea (b) e Nanumanga (c). Fonte: *Google Earth Pro*

1.3.2 Paesi Bassi



Figura 1.13: inquadramento geografico dei Paesi Bassi. Fonte: Google Earth Pro.

Situati nell'Europa nord-occidentale e con una popolazione di 17,4 milioni di persone, i Paesi Bassi (colloquialmente noti come Olanda) sono il dodicesimo Paese più densamente popolato del mondo e vantano una superficie totale di quasi 42'000 km², di cui l'80% di terraferma. Il nome Paesi Bassi è di per sé un riferimento alla sua bassa elevazione e alla sua piatta topografia: circa metà del suo territorio si trova a meno di un metro sopra il livello del mare e il 27% della superficie totale, in cui risiede il 21% della popolazione, si trova addirittura sotto il livello del mare (Figura 1.14).

Buona parte del territorio è infatti costituito da *polder*, ovvero da terreni strappati al mare, a lagune o a paludi costiere. La reclamazione di questi terreni – sommersi dal mare durante devastanti alluvioni, l'ultima delle quali risalente al 1953 – è stata resa possibile da notevoli opere di bonifica iniziate nel XVI secolo, oltre che dalle più recenti barriere e dighe di sbarramento (discusse in dettaglio al *Paragrafo 3.1.2*).

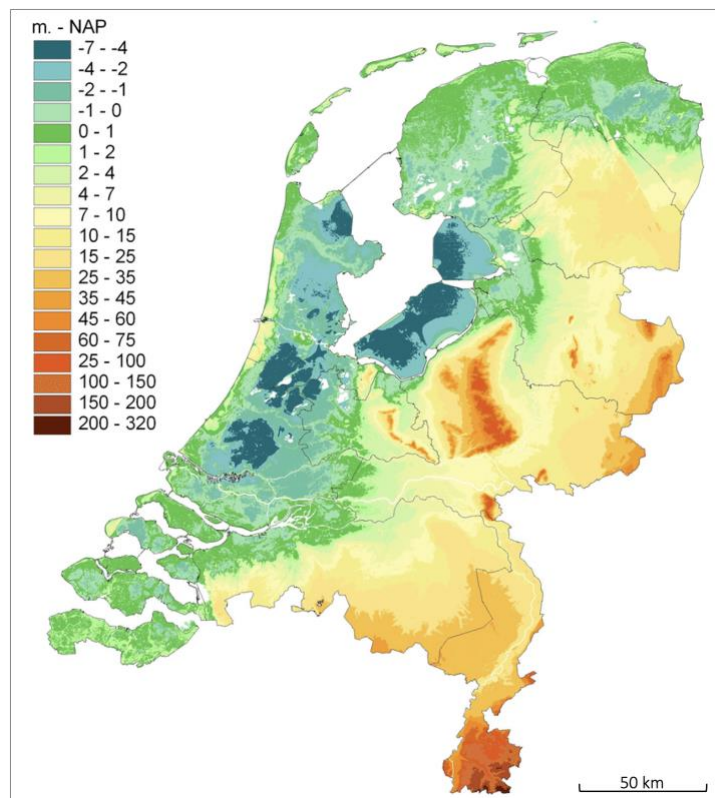


Figura 1.14: mappa di elevazione dei Paesi Bassi. Fonte: Blom-Zandstra et al. (2009)

1.3.3 Bangkok

La regione metropolitana di Bangkok è il grande agglomerato urbano popolato da più di 14 milioni di persone che comprende la metropoli di Bangkok – capitale e città più popolosa ed estesa della Thailandia – e le circostanti province. L'area metropolitana, affacciata sulle acque del Golfo della Thailandia, sorge sul delta del fiume *Chao Phraya* ed è caratterizzata da un'altitudine media di 1.5 metri sul livello del mare. A causa della sua piatta topografia e ravvicinata distanza dal mare, la città di Bangkok subisce frequenti allagamenti durante la stagione delle piogge. La minaccia delle inondazioni è solo che aggravata dall'alto tasso di urbanizzazione e impermeabilizzazione del territorio, oltre che dall'incessante innalzamento del livello dei mari, unito al progressivo affossamento della città. La regione giace infatti su un terreno paludoso che, a causa dell'eccessiva estrazione di acque sotterranee a partire dagli anni '60, è costantemente soggetto alla subsidenza.^{vii} Inoltre, la recente costruzione di centrali idroelettriche a monte sul fiume *Chao Phraya* sta bloccando notevoli quantità di sedimenti, contribuendo ulteriormente all'erosione della zona deltizia. In assenza di efficaci misure di protezione o adattamento, l'acqua marina potrebbe sommergere definitivamente l'area metropolitana di Bangkok nella sua quasi totalità, al più tardi nel prossimo secolo.

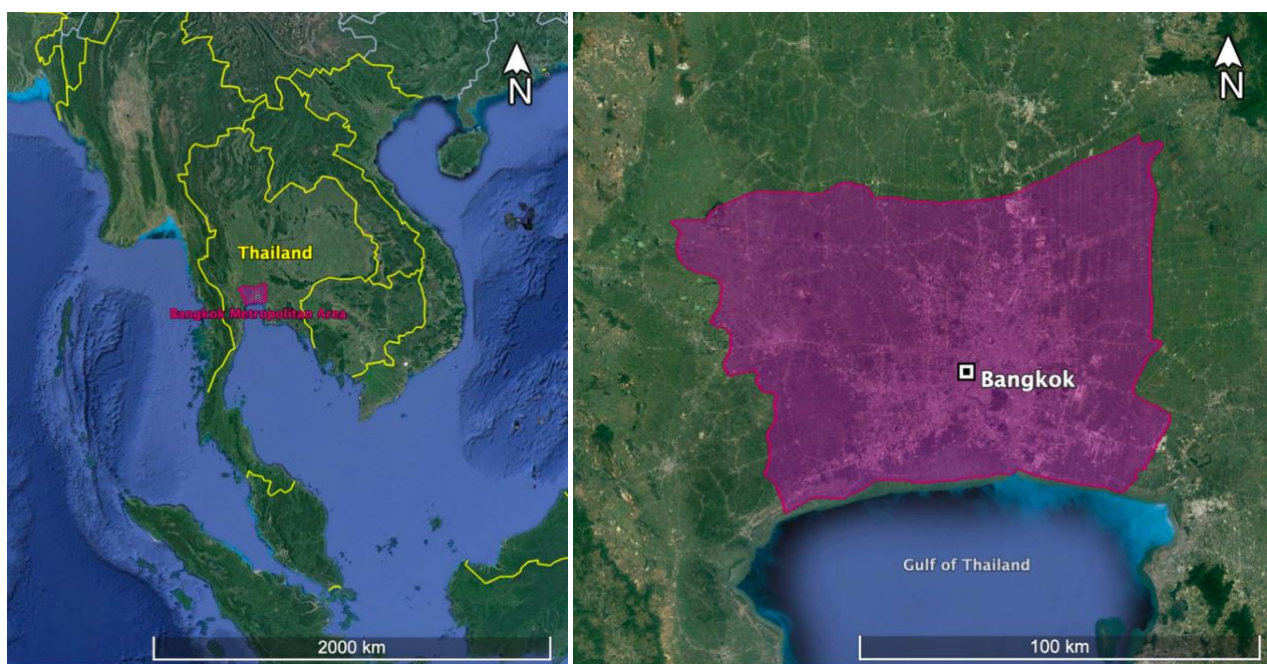


Figura 1.15a e 1.15b: inquadramento geografico della Thailandia (sinistra) e dell'area metropolitana di Bangkok (destra). Fonte: Google Earth Pro.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Materiali

Il Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) è un'organizzazione – istituita nel 1988 dal Programma Ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) e dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) – che ha come unico compito quello di valutare le informazioni già disponibili nella letteratura scientifica, raccogliendole, confrontandole e sintetizzandole.

L'obiettivo principale dell'IPCC è infatti quello di fornire ai governi – e ai relativi *policymakers* – informazioni scientifiche affidabili da utilizzare come basi per sviluppare opportune e fondate politiche climatiche. I *reports* dell'IPCC sono inoltre spunti chiave per le negoziazioni internazionali sui cambiamenti climatici. I “Rapporti di valutazione” (*Assessment Reports*) trattano delle conoscenze relative ai cambiamenti climatici, delle loro cause, e di potenziali impatti e opzioni di risposta; su richiesta, l'IPCC produce anche “Rapporti speciali” (*Special Reports*), che rappresentano una valutazione su specifici temi e questioni.

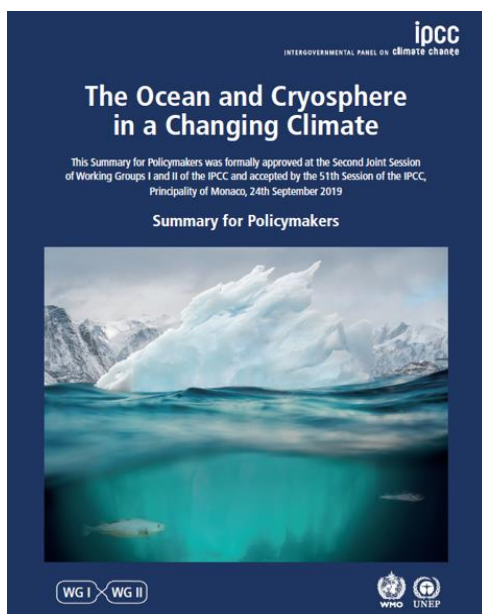


Figura 2.1: copertina dello *Special Report* dell'IPCC “*Oceano e criosfera in un clima che cambia*”.

Documento di riferimento per l'analisi delle misure di adattamento (*Capitolo 3.1*) è lo *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*⁵ (2019), in particolare il quarto capitolo, intitolato *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*. Questo capitolo si focalizza sui cambiamenti del livello del mare a livello globale e regionale, riportando i rischi associati per isole, coste e insediamenti umani, proponendo infine le possibili misure di risposta. Oggetto di discussione saranno proprio queste ultime, suddivise in differenti tipologie e analizzate in base a criteri come efficacia, costo, benefici, difetti, efficienza economica e possibili difficoltà gestionali.

2.2 Metodi

2.2.1 *Sea Level Projection Tool*

Il primo software utilizzato è il *Sea Level Projection Tool*⁶ della NASA. Le previsioni dei futuri valori d'innalzamento del livello dei mari sono di vitale importanza sia per una pianificazione costiera sostenibile sia per i *policymakers*, al fine di considerare correttamente e con largo anticipo gli impatti di tale fenomeno sulle comunità colpite.

Questo strumento si basa esclusivamente sulle stime riportate nel sesto *Assessment Report* dell'IPCC e permette agli utenti di visualizzare le previsioni d'innalzamento marino sia globali che locali, dal presente al 2150. Cliccando su una specifica località registrata, si ottengono le previsioni in quella esatta posizione e sono inoltre riportate le differenti contribuzioni all'innalzamento del livello del mare, in grado di fornire un'indicazione di quali processi fisici o geologici saranno i *drivers* dominanti.

Vi è infine la possibilità di modificare lo scenario emissivo, regolando la quantità di gas serra emessi in atmosfera fino alla data selezionata. Tra i cinque scenari emissivi dell'IPCC disponibili, verrà considerato solo lo scenario intermedio (SSP-4.5), nonché il più probabile, che prevede la stabilizzazione delle emissioni entro metà secolo, con un riscaldamento stimato di 2.7°C sopra i livelli preindustriali entro il 2100.

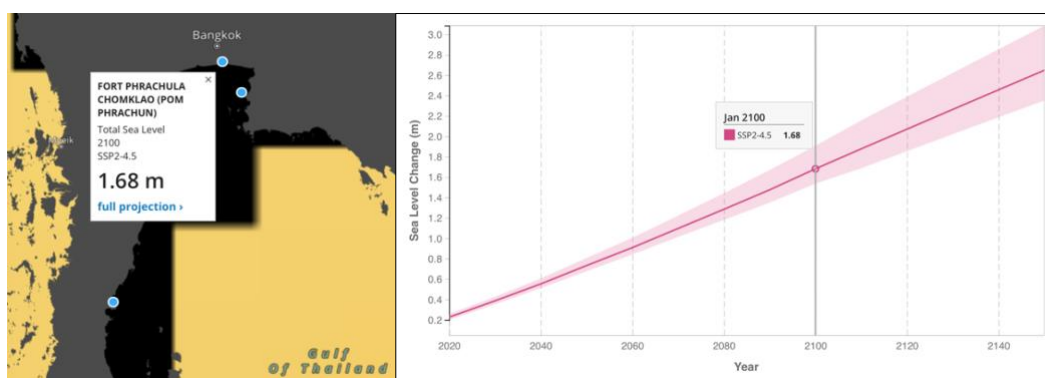


Figure 2.2a e 2.2b: esempio dell'interfaccia (sinistra) e delle previsioni visionabili (destra).

2.2.2 *Coastal Risk Screening Tool*

Il secondo software utilizzato è il *Coastal Risk Screening Tool*⁷, uno strumento sviluppato da *Climate Central* che permette la visualizzazione delle zone geografiche destinate ad essere sommerse dall'acqua marina. Questo è reso possibile dal confronto di una previsione di innalzamento del livello del mare con una mappa di partenza (*Google Maps*), nella quale vengono evidenziate (di colore rosso o azzurro) le aree con altitudine inferiore o uguale al livello di superficie marina previsto.

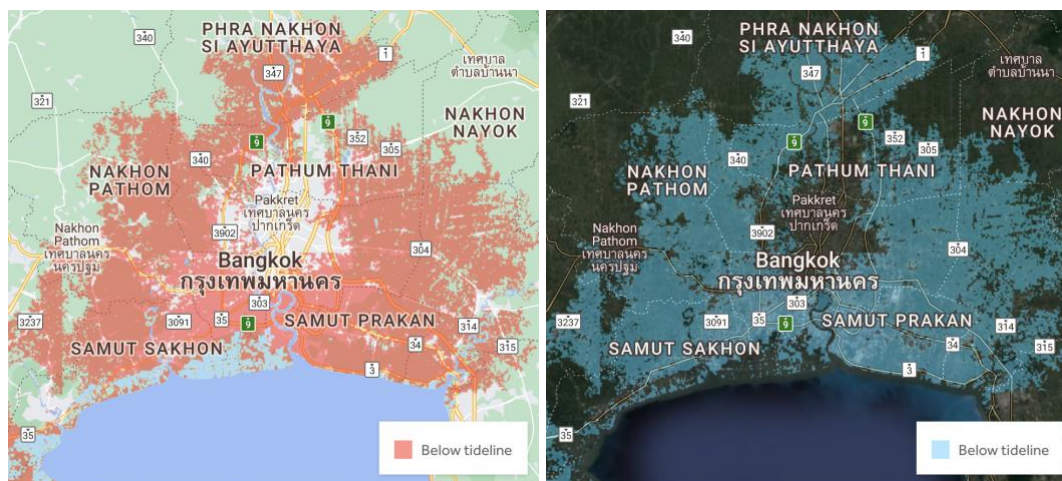


Figure 2.3a e 2.3b: esempio di visualizzazione. Le aree destinate ad essere sotto il livello del mare sono evidenziate in rosso (sinistra) o in azzurro (destra), a seconda della mappa di base.

La previsione può essere effettuata in base all'anno, al livello medio d'innalzamento degli oceani, oppure in base allo scenario di riscaldamento globale. È inoltre possibile selezionare il “tipo di previsione”, ovvero scegliere se visualizzare le sole zone perennemente sommerse – basandosi esclusivamente sulle previsioni di innalzamento del livello dei mari – oppure anche le zone temporaneamente sommerse a causa delle inondazioni, che possono essere di frequenza annuale o “moderata”, cioè che avvengono in media una volta all'anno od ogni dieci anni, rispettivamente.

L'impostazione *Pollution Pathway* regola invece la quantità di gas serra emessi in atmosfera fino alla data selezionata. Anche in questo caso, tra gli scenari emissivi verrà considerato solo lo scenario intermedio SSP2-4.5.

Ulteriori impostazioni comprendono il fattore *luck* (“fortuna”), ovvero quanto più gravi (*bad luck*) o più lievi (*good luck*) rispetto alle previsioni odierne saranno gli impatti del riscaldamento globale sull'innalzamento dei mari. In questa ricerca, la variabile *luck* rimarrà impostata sul valore medio.

Vi è infine la possibilità di selezionare le fonti delle previsioni, che variano dalle più pessimistiche ma meno probabili alle più realistiche e di comune consenso. La fonte selezionata è la più accreditata e deriva da un modello adottato dall'IPCC nel sesto *Assessment Report* (2021), che si basa esclusivamente sui fattori contributivi aventi confidenza media o superiore.

Tutte le mappe discusse al *Paragrafo 3.1* sono state ottenute impostando l'anno di interesse (2100 o 2150), variando esclusivamente il tipo di previsione.

2.2.3 Population Estimator

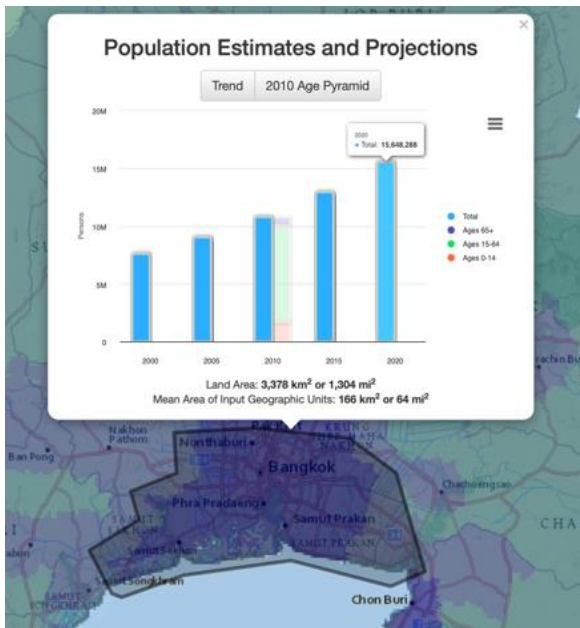


Figura 2.4: esempio di stime demografiche relative all'area descritta dal poligono disegnato.

Il terzo strumento utilizzato è *Population Estimator*⁸, un servizio online della *NASA* che permette di ottenere una rapida stima del numero di persone residenti in una specifica regione geografica definita dall'utente, senza la necessità analizzare grandi quantitativi di dati spaziali e demografici. Una volta selezionata l'area di interesse utilizzando un poligono o una circonferenza, sarà infatti possibile la visualizzazione delle stime demografiche della regione selezionata, per ogni lustro dal 2000 al 2020. Inoltre, per l'anno 2010 è riportata anche la suddivisione in classi d'età, utile per comprendere in maniera più approfondita l'andamento demografico regionale.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Analisi territoriali

Per i casi studio Bangkok e Paesi Bassi verranno innanzitutto riportate le previsioni di innalzamento del livello dei mari ottenute dal *Sea Level Projection Tool*, distinguendone le diverse contribuzioni nelle specifiche regioni. Saranno in seguito proposti i risultati geografici del *Coastal Risk Screening Tool*, che mostrano le previsioni dei territori sommersi dall'acqua marina entro all'anno 2100 e 2150 (quest'ultimo solo per Bangkok); si noti che le aree sommerse sono state ricavate esclusivamente in base all'elevazione e non tengono in considerazione l'eventuale presenza di misure di protezione, le quali verranno successivamente discusse.

Per il caso studio Tuvalu, invece, saranno analizzati direttamente misure e piani di adattamento, dal momento che le previsioni degli strumenti sopracitati non sono disponibili.

3.1.1 Tuvalu

Nessun'altra regione al mondo è più vulnerabile ai cambiamenti climatici dei piccoli Stati insulari a bassa quota e in via di sviluppo, come Tuvalu. Nei prossimi anni, la combinazione tra l'innalzamento del livello del mare (attualmente di 5.9 mm/anno ma in costante accelerazione) e cicloni più intensi avrà un impatto disastroso su questa nazione. Senza appropriate misure di adattamento, infatti, l'aumento del livello del mare potrebbe rendere Tuvalu completamente inabitabile.

Per fronteggiare queste sfide e non permettere all'oceano di sommergere l'intero territorio, il governo di Tuvalu e il Programma delle Nazioni Unite per lo Sviluppo (UNDP) hanno approvato nel 2017 il "Progetto di adattamento costiero di Tuvalu" (TCAP), finanziato quasi interamente dal *Green Climate*

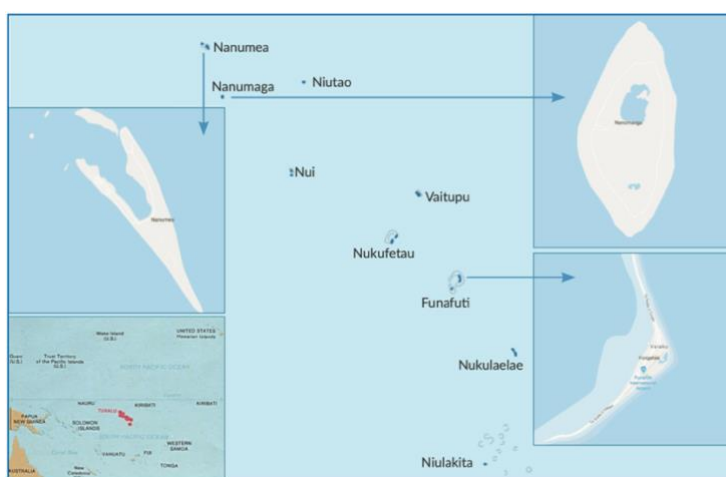


Figura 3.1: inquadramento geografico delle tre isole target del TCAP. Fonte: TCAP⁹

Fund, un fondo delle Nazioni Unite per assistere i Paesi in via di sviluppo nell'attuazione di pratiche di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici. L'obiettivo principale del TCAP, dal costo complessivo di 38.9 milioni di dollari, è quello di migliorare la resilienza costiera di Tuvalu implementando una solida strategia di misure costiere sulle tre isole principali: Funafuti, Nanumanga e Nanumea (Figura 3.1).

«La nostra soluzione, in termini di adattamento, è avanzare verso il mare, costruire muri marini e persino innalzare le nostre isole in alcune zone», queste le parole di Simon Kofe, Ministro della Giustizia, delle Comunicazioni e degli Affari esteri di Tuvalu.

Nel 2020, in seguito alla pubblicazione delle valutazioni degli impatti ambientali e sociali del TCAP, sono cominciati i lavori, in corso tutt'oggi. La misura prevista sull'isola di Funafuti è di avanzamento: 250'000 m³ di sabbia dragata dalla laguna andranno a creare 7.1 nuovi ettari di territorio (*Figura 3.2*) con un'elevazione minima di 4.8 metri sul livello del mare, confinato da barriere frangiflutti.



Figura 3.2: rendering del progetto di avanzamento sulla costa di Funafuti. Fonte: UNDP¹⁰

Sulle isole di Nanumaga e Nanumea, invece, l'attuazione del TCAP prevede la costruzione di barriere – o dighe – di sbarramento (*Berm Top Barriers*) parallelamente alla battigia del villaggio principale. La lunghezza totale delle barriere è di 665 metri a Nanumaga (*Figura 3.3*) e 1.5 km a Nanumea.



Figura 3.3: design del progetto di protezione costiera sull'isola di Nanumaga. La discontinuità è data dalla rampa di accesso alla spiaggia, anch'essa innalzata. Fonte: UNDP

«Mentre la nostra terra scompare, non abbiamo altra scelta se non quella di diventare la prima nazione digitale del mondo»; così il ministro Simon Kofe – in risposta all'innalzamento del livello del mare e al fallimento del mondo esterno nel combattere il riscaldamento globale – ha addirittura annunciato il piano di caricare il Paese nel Metaverso, nel disperato tentativo di preservarsi e di funzionare come nazione anche nel caso in cui venisse sommerso.

3.1.2 Paesi Bassi

Le stime del *Sea Level Projection Tool* prevedono sulla costa dei Paesi Bassi un innalzamento di circa 59 cm nel 2100, di cui più della metà (33 cm) saranno causati dalla dilatazione termica, mentre solo 20 cm dalla fusione di ghiacciai e calotte polari; il restante innalzamento (6 cm) è dovuto al movimento verticale del suolo e ad una variazione delle sue risorse idriche.

I risultati del *Coastal Risk Screening Tool* (Figure 3.5 e 3.6), invece, sembrano allarmanti, ma solamente perché il software considera come sommerse tutte le aree aventi elevazione inferiore al livello del mare previsto. Come già accennato nell'inquadramento geografico (Paragrafo 1.3.2), l'elevazione dei Paesi Bassi è molto contenuta; tuttavia, grazie alle numerose ed estese misure di protezione costiera di cui lo Stato dispone, uno scenario di questo tipo non si verificherà.

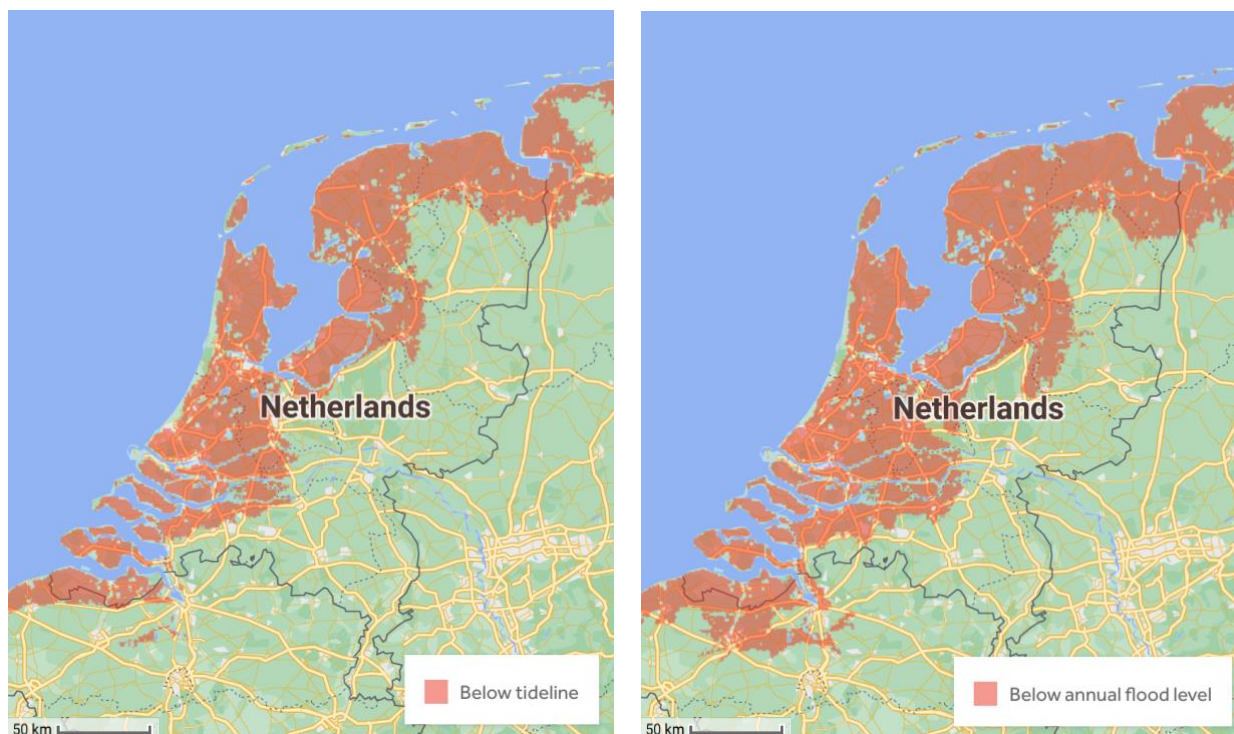


Figure 3.5 e 3.6: in rosso, i territori dei Paesi Bassi completamente sommersi (sinistra) ed inondati con frequenza annuale (destra) entro il 2100 in assenza di misure protettive. Fonte: *Coastal Risk Screening Tool*

Il prosciugamento delle fasce costiere situate sotto il livello dei mari è infatti stato possibile grazie alla costruzione di notevoli opere e progetti di contenimento, il cui esempio più eclatante sono gli *Zuiderzeewerken* (letteralmente “i lavori del Mare Meridionale”), il più grande progetto di ingegneria idraulica intrapreso dai Paesi Bassi durante lo scorso secolo. Il progetto prevedeva lo sbarramento di una grande insenatura poco profonda del Mare del Nord, lo *Zuiderzee*, con la creazione di due laghi artificiali (*Ijsselmeer* e *Markermeer*) e la successiva bonifica di buona parte dei terreni, tramite sistemi di chiuse e stazioni di pompaggio. Le *Figure 3.7a* e *3.7b* mostrano l’esito dei lavori, indicando le terre prosciugate con successo e le dighe di sbarramento, una delle quali è mostrata nella *Figura 3.8*.



Figure 3.7a e 3.7b: rappresentazione geografica degli Zuiderzeewerken. In rosso i nuovi terreni (1700 km² totali), in bianco le dighe di sbarramento. Fonte: Google Earth Pro



Figura 3.8: la diga di sbarramento Afsluitdijk separa l’Ijsselmeer dal Mare del Nord. Conclusa nel 1932, la diga è attraversata da un’autostrada ed è lunga 32 km, larga 90 metri ed arriva a un’altezza di 7.25 metri sopra il livello del mare. Fonte: Noord Holland¹¹

Un ulteriore esempio di protezione dalle inondazioni costiere nei Paesi Bassi è *Maeslantkering* (Figura 3.9), un'opera di sbarramento idraulico situata sul canale artificiale del delta del Reno che collega il porto di Rotterdam con il Mare del Nord. La struttura, inaugurata nel 1991, è costituita da due paratoie rotanti in acciaio alte 22 metri e lunghe 210 metri l'una, incernierate ciascuna sulle opposte sponde del canale; le paratoie vengono azionate da un sistema automatico che si attiva all'innalzamento del livello delle acque.



Figura 3.9: *Maeslantkering*, l'opera sbarramento che protegge Rotterdam e il suo porto dalle inondazioni.

Foto: John Doxey

È proprio grazie a misure di rafforzamento costiero quali dune naturali, sbarramenti, dighe e barriere anti-inondazioni che i Paesi Bassi sono in grado di proteggere le proprie terre dalle mareggiate e dall'innalzamento del livello dei mari. Secondo uno studio condotto nel 2008 da Olsthoorn et al. intitolato "*The Netherlands under a 5-m sea level rise*", con le attuali tecnologie ingegneristiche è possibile preservare l'integrità del territorio nazionale fino a 5 metri d'innalzamento dei mari, oltre i quali si raggiungerebbero serie limitazioni tecniche, con costi di protezione che toccherebbero 18 miliardi di euro annui, superando quelli di una completa dislocazione programmata.^{viii} I Paesi Bassi sembrano quindi al sicuro, almeno per ora, anche se non è da escludere la possibilità che il loro assetto geografico possa subire drastici mutazioni nei prossimi secoli.

3.1.3 Bangkok

Secondo le stime generate dalla NASA sulla base del sesto *Assessment Report* dell'IPCC, l'innalzamento previsto sulle coste dell'area metropolitana di Bangkok è di ben 1.68 metri, entro il 2100 sotto lo scenario SSP2-4.5. Rispetto al *budget* del livello marino dei Paesi Bassi, però, le contribuzioni sono differenti: dei 168 cm previsti, 21 cm sono dovuti all'espansione termica, mentre 33 cm all'aggiunta di acqua di fusione dei ghiacci. La frazione di innalzamento marino relativo dovuto alla subsidenza ammonta invece a 111 cm. Di seguito sono riportate le aree sommerse – definitivamente o temporaneamente dalle inondazioni – dall'acqua marina entro all'anno 2100 (*Figure 3.10 e 3.11*) e 2150 (*Figure 3.12 e 3.13*).

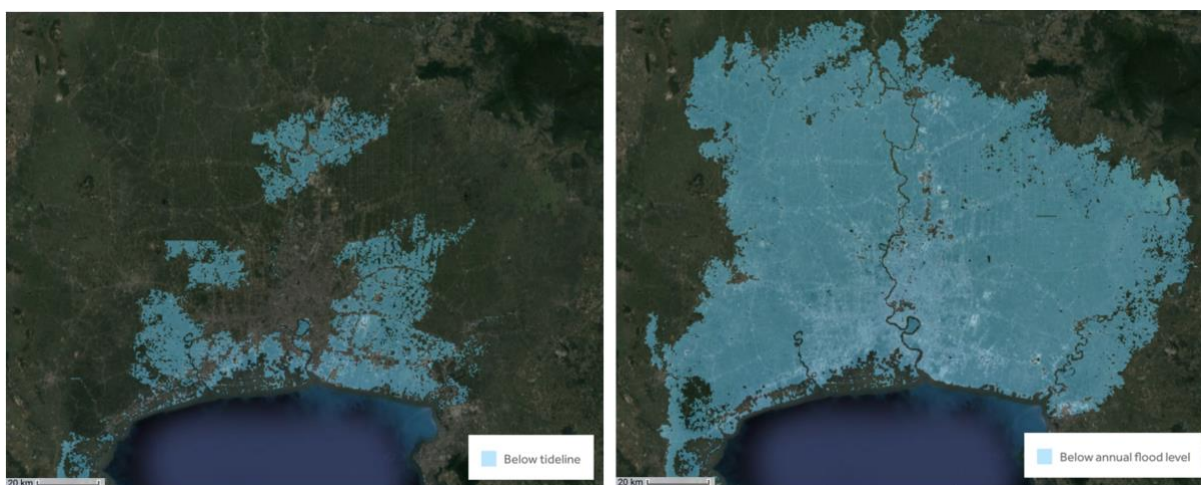


Figure 3.10 e 3.11: in azzurro, i territori della Regione metropolitana di Bangkok completamente sommersi (sinistra) ed inondati con frequenza annuale (destra) entro il 2100 in assenza di misure protettive. Fonte: Coastal Risk Screening Tool

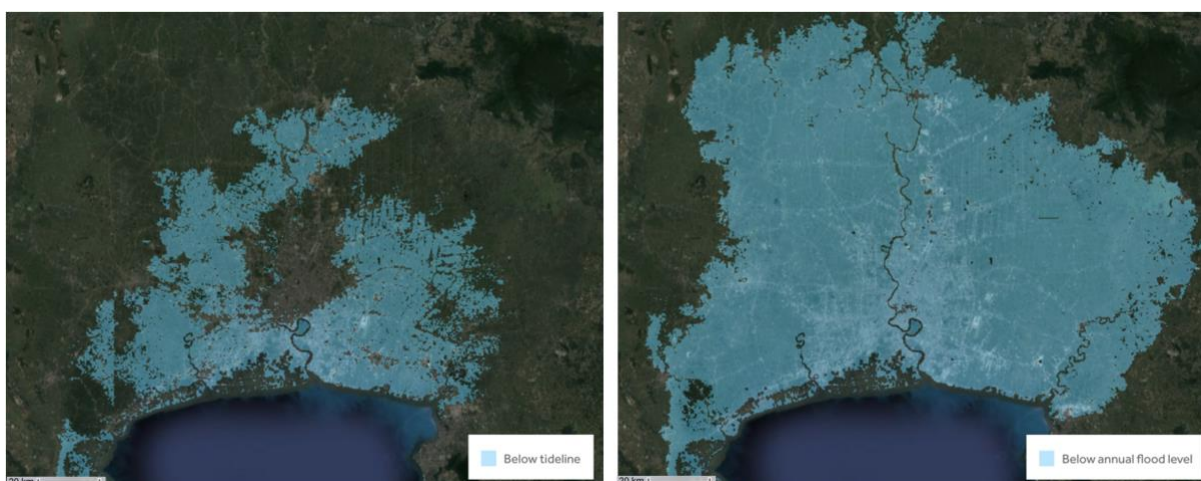


Figure 3.12 e 3.13: in azzurro, i territori della Regione metropolitana di Bangkok completamente sommersi (sinistra) ed inondati con frequenza annuale (destra) entro il 2150 in assenza di misure protettive. Fonte: Coastal Risk Screening Tool

Entro il 2100, quindi, l'intera area metropolitana di Bangkok sarà sommersa almeno una volta all'anno dalle acque alluvionali, mentre gran parte di essa sarà perennemente sott'acqua, con il mare che arriverà a circondare il centro di Bangkok. Ad oggi, la città si difende dalle inondazioni solo con preventivi muri di sacchi di sabbia (*Figura 3.14*), mentre sulla costa sono presenti, a tratti, rudimentali barriere contro l'erosione (*Figura 3.15*).



Figura 3.14 e 3.15: (a sinistra) un muro di sacchi di sabbia protegge una banca della capitale thailandese; (a destra) file di canne di bambù impiantate nel fondale marino fungono da barriera contro il moto ondoso, attenuando l'erosione costiera. Fonte: Bangkok Post¹²

L'efficacia delle odierne misure di difesa è dunque solo parziale, provvisoria e temporanea, e l'intera area metropolitana necessita di nuovi piani di adattamento per fronteggiare l'incessante innalzamento del livello del mare, accentuato dai fenomeni di subsidenza, i quali sembrano essere solo appena cominciati. Pianificatori, legislatori e ricercatori stanno studiando e sperimentando differenti soluzioni per tenere lontana l'acqua, tra cui una gigantesca barriera con chiuse che attraversa l'intero Golfo della Thailandia (*Figura 3.16*). Secondo gli esperti, tuttavia, questo “megaprogetto” potrebbe portare più danni che benefici, distruggendo i già fragili ecosistemi marini dai cui prodotti dipendono intere comunità; tra l'altro, Bangkok ha già perso gran parte delle sue originarie foreste di mangrovie, che fungevano da barriera naturale contro l'erosione.

L'Amministrazione Metropolitana di Bangkok ha in programma ben 28 progetti per la protezione della città dalle inondazioni, dal valore complessivo di oltre 765 milioni di dollari. Al sistema di drenaggio urbano sono già state apportate sostanziali miglioramenti e allargamenti e tra i progetti proposti vi è la costruzione di un sistema di barriere alla foce del fiume *Chao Phraya* (per contenere l'ingresso e la risalita di acqua marina durante le mareggiate) e il rinforzamento dei suoi argini, oltre all'elevazione delle strade che corrono parallele alla costa, le quali saranno poste su un terrapieno frangiflutti.^{ix}

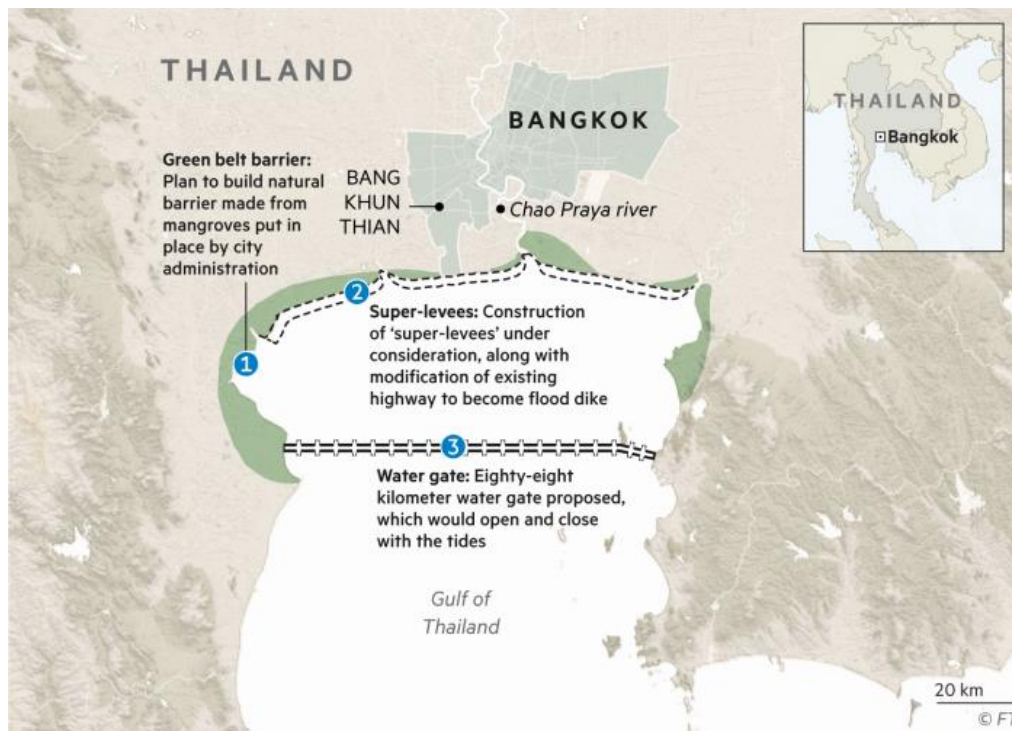


Figura 3.16: il megaproject prevede la costruzione di una diga di sbarramento lunga 88 km da una parte all'altra del Golfo, oltre ad argini a protezione delle coste e una "fascia verde" di mangrovie. Fonte: FT¹³

Considerando ora le sole zone soggette, secondo la previsione, ad essere completamente sommerse dal livello del mare entro il 2150, è stata effettuata un'analisi demografica con *Population Estimator* al fine di ottenere una cifra indicativa delle persone che, senza opportune misure di adattamento, si troveranno verosimilmente costrette al più entro quella data ad abbandonare le proprie abitazioni ed insediarsi altrove. Si tratta di stime approssimative che potrebbero sovrastimare come sottostimare le popolazioni colpite; tuttavia, i numeri ottenuti forniscono soprattutto una misura dell'entità delle conseguenze.

La superficie sommersa entro il 2150, secondo il *Coastal Risk Screening Tool* e le successive analisi con *Population Estimator* (Figura 3.17), è approssimativamente 8000 km², con 12 milioni di residenti (nel 2020) e una densità abitativa media di 1500 ab/km². Le future aree sommerse delle Regione metropolitana di Bangkok riportano inoltre un tasso di crescita demografica di circa +0.3 milioni di abitanti all'anno, cioè del +2.5%. Sintomo di questa ripida crescita è proprio la percentuale di bambini con età inferiore ai 14 anni, prossima al 20% della popolazione nel 2010.

Si noti che tali stime riguardano solo ed esclusivamente le zone completamente sommerse dai mari entro il 2150 senza idonee misure protettive, e non quelle colpite dalle inondazioni annuali. Il numero effettivo di sfollati è pertanto verosimile che sia di gran lunga superiore. L'innalzamento ed avanzamento dell'acqua marina potrebbe danneggiare, se non distruggere, collegamenti stradali, infrastrutture sanitarie, porti e mercati, coltivazioni agricole, risorse alimentari e vitali. Anche la vita

delle persone residenti nelle aree limitrofe a quelle sommerse verrebbe dunque stravolta, alzando a dismisura il tasso di profughi vittime della crisi climatica.

Qualsiasi siano le future strategie di adattamento di Bangkok, è fondamentale che misure di protezione efficaci, adeguate ed economicamente efficienti vengano realizzate il prima possibile, al fine di evitare il collasso e l'evacuazione dell'intera area metropolitana.

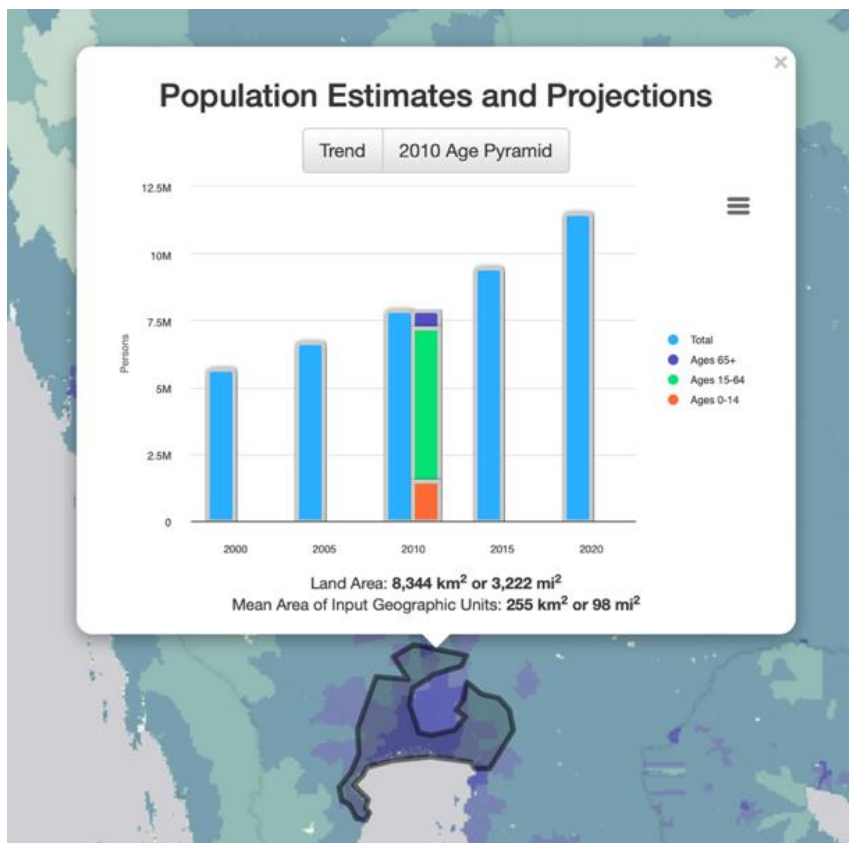


Figura 3.17: stime demografiche delle zone dell'area metropolitana di Bangkok sommerse entro il 2150, ottenute con *Population Estimator*

3.1 Strategie e meccanismi di adattamento

Con riferimento al quarto capitolo dello *Special Report* dell'IPCC introdotto nella sezione "Materiali" (Paragrafo 2.1), verranno ora analizzate le possibili risposte all'innalzamento del livello dei mari e ai rischi costieri associati, riassunte ed illustrate nella *Figura 3.1*. Le differenti misure di adattamento verranno valutate tenendo conto di costi, limiti, co-benefici e svantaggi, oltre a considerare l'efficacia strutturale, l'efficienza economica ed eventuali sfide gestionali.

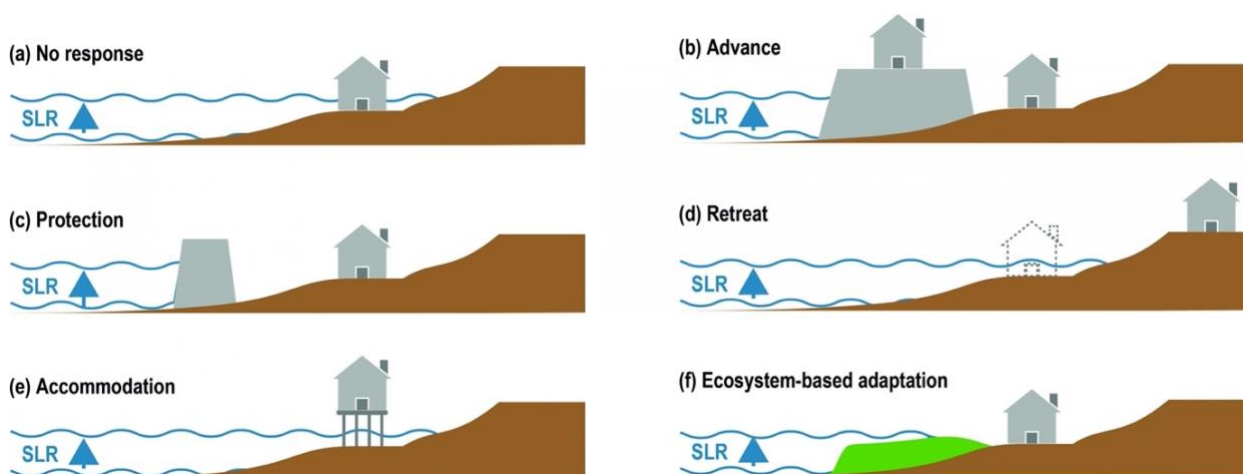


Figura 3.18: illustrazione delle differenti tipologie di risposta all'innalzamento del livello dei mari e ai rischi costieri associati: nessuna risposta (a), avanzamento (b), protezione (c), arretramento (d), sistemazione (e), adattamento *ecosystem-based* (f). Fonte: IPCC AR6 (2021)

3.2.1 Protezione (*hard and sediment-based protection*)

Le misure di protezione sono molto diffuse nel mondo e riducono rischi e impatti costieri bloccando la propagazione nell'entroterra del livello medio o estremo del mare e degli effetti ad essi associati. Opere di protezione concreta (*hard protection*) – come argini, muri marini, frangiflutti, barriere e sbarramenti (*Figure 3.19a-3.19d*) – o basate sui sedimenti (*sediment-based protection*) – come le dune e il ripascimento delle spiagge – offrono un'adeguata protezione da inondazioni e mareggiate, rallentano i fenomeni di erosione ed evitano l'intrusione di acqua salata nelle falde o nei terreni coltivati.

Strutture di protezione propriamente progettate sono molto efficaci; tuttavia, mantenere questa efficacia sufficientemente alta nel tempo richiede regolari ed appropriate operazioni di monitoraggio e manutenzione, non solo per garantire l'integrità della struttura stessa, ma anche per individuare e gestire i rischi residui, che possono essere ridotti ma mai eliminati definitivamente. È difficile stabilire a quale punto nel tempo e per quale entità di innalzamento del livello marino saranno raggiunti i limiti tecnici di protezione costiera; ad oggi, non sussistono ostacoli tecnologici per proteggere le coste di

fronte all'innalzamento previsto nel XXI secolo, ma le sfide gestionali e gli elevati costi rendono queste opzioni di adattamento già inaccessibili in molte regioni del pianeta.



Figure 3.19a-3.19d: esempi di strutture di *hard protection*: argine o diga di sbarramento (a), muro marino (b), frangiflutti (c) e barriera anti-inondazioni (d).

Il costo delle strutture di *hard-protection* varia sostanzialmente in base a fattori come la tipologia di materiali impiegati, il costo della manodopera e l'ambientazione (rurale o urbana). Sotto il migliore scenario futuro (SSP2.6), i costi globali di protezione sono stati stimati in 40–170 miliardi di dollari (USD) annui considerando i soli argini e barriere anti-inondazioni, con costi di manutenzione generalmente intorno al 1-2% del costo di costruzione.^x Circa le misure *sediment-based*, invece, il costo è dato esclusivamente dal volume di materiale impiegato (sabbia o ghiaia) e dal suo trasporto, il che rende questo tipo di misure convenienti laddove vi sia una grande disponibilità naturale di materiale; i costi di posa e di manutenzione sono quasi trascurabili.

Le barriere *hard* possono essere innalzate, allargate e rinforzate per fronteggiare il crescente livello dei mari, anche se questo “*lock-in*” non fa altro che amplificarne le conseguenze in caso di un cedimento strutturale. Misure di questo tipo hanno inoltre un rilevante impatto sul paesaggio ma soprattutto sull'ambiente, alterando habitat, ecosistemi, e i processi idro- e morfodinamici del mare, la cui modificazione è in grado di trasferire i rischi ad altre zone costiere. Un notevole punto a favore delle barriere rigide è però la loro potenziale multifunzionalità; sopra e dietro di esse si generano infatti nuovi spazi, destinabili a parcheggi, strade, edifici o spazi di pubblica utilità, una possibilità per ottimizzare al massimo gli spazi laddove questi siano limitati, come in un contesto urbano. Le

protezioni *sediment-based*, invece, preservano le spiagge e i loro habitat, assicurando i benefici economici derivanti dal loro valore ricreazionale e turistico. Tuttavia, la scarsità di sabbia e ghiaia può portare al dragaggio di tali materiali direttamente dal fondale marino, con effetti negativi sugli ecosistemi acquatici.

I principali fattori che ostacolano l'implementazione delle misure di protezione sono da un lato i conflitti di interesse tra gli *stakeholders* – ad esempio il settore turistico contro i pescatori – e dall'altro lato la disapprovazione delle comunità non interessate riguardo tale distribuzione dei fondi pubblici. Ciononostante, nuovi studi su scala globale evidenziano come nel XXI secolo i benefici di misure di protezione *hard* per la riduzione del rischio di inondazioni eccedano (ed eccederanno) mediamente i costi delle stesse misure, per le città e aree densamente popolate.^{xi}

3.2.2 Adattamento *Ecosystem-based*

L'adattamento di tipo *Ecosystem-based* (EbA) si fonda esclusivamente su tecniche di gestione, conservazione e ripristino degli ecosistemi costieri quali mangrovie (Figura 3.20), barriere coralline, banchi di ostriche, praterie marine e zone paludose. Le misure EbA proteggono le coste attenuando od ostacolando il moto ondoso, ma soprattutto riducendo drasticamente il tasso di erosione

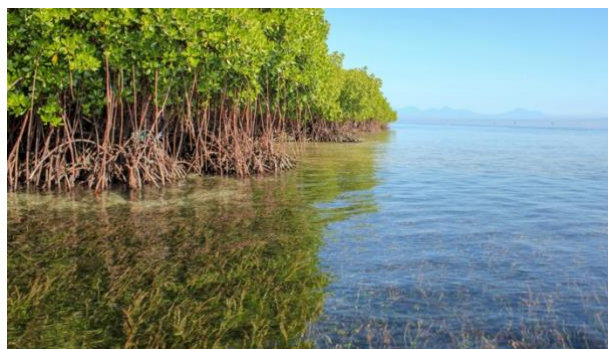


Figura 3.20: una foresta di mangrovie.

attraverso la cattura e stabilizzazione dei sedimenti, oltre alla produzione propria di detriti e materia organica. Per questo motivo, spesso misure *ecosystem-based* sono implementate come integrazioni di altre misure di adattamento, soprattutto di quelle difensive, sia per preservare l'integrità delle opere, sia per ridurre l'impatto sulla flora e sulla fauna locali.

Nelle giuste condizioni, le misure EbA rispondono e si adattano spontaneamente ai cambiamenti dell'ambiente costiero, anche se operazioni di manutenzione o ripristino possono essere necessarie in seguito a danneggiamenti causati da forti mareggiate o dalle attività umane. Gli ecosistemi costieri sono infatti tra gli ecosistemi con i tassi più alti di distruzione antropogenica, a causa degli elevati valori economici dei terreni su cui sorgono e dei forti interessi per i loro usi alternativi. I costi non dipendono quindi molto dai lavori di implementazione o gestione, quanto piuttosto dai valori e dai permessi territoriali.

L'efficacia delle cosiddette misure "naturali" varia considerevolmente sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del paesaggio e dipende anche dalla stagionalità, variabilità e dal tempo di adattamento (in seguito alla messa in opera) degli ecosistemi. Tuttavia, non ci sono ancora sufficienti

conoscenze per determinare la salute e la resistenza di questi ultimi di fronte a cambiamenti climatici come il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani.

Le misure *ecosystem-based* offrono una moltitudine di co-benefici, tra cui il sequestro di carbonio, maggiori ricavi dal turismo, migliore qualità dell'acqua, maggiore produttività della pesca, disponibilità di materie prime per differenti usi e molti altri benefici immateriali e culturali che aiutano a rafforzare la resilienza delle comunità vulnerabili. A differenza delle strutture concrete, le misure EbA richiedono però maggiori superfici, spesso non disponibili oppure soggette a forte competizione. Inoltre, come qualsiasi altro elemento che interagisce con i processi marini costieri, queste misure potrebbero alterare la ridistribuzione e accelerazione dei flussi nei passaggi più stretti, aumentando occasionalmente l'energia delle onde e gli effetti delle mareggiate.^{xii}

Nonostante non esistano, ad oggi, previsioni su larga scala riguardo possibili limiti futuri, le misure di protezione basate sugli ecosistemi naturali sono sempre più riconosciute a livello internazionale come efficaci strategie per uno sviluppo costiero sostenibile e resiliente, volto anche alla preservazione della biodiversità. Grazie alla loro agevole ed economica implementazione, le misure di adattamento EbA sono la prima scelta di molti Stati costieri, specialmente delle piccole isole, per fronteggiare i rischi dell'innalzamento del livello dei mari.

3.2.3 Avanzamento (*advance*)

L'avanzamento consiste in interventi di innalzamento ed estensione del territorio costiero verso il mare, riducendo i rischi per l'entroterra e il nuovo terreno sopraelevato. Opere di avanzamento includono la bonifica dei terreni mediante il riempimento con materiale sabbioso o ghiaioso, la piantumazione di vegetazione con l'intento specifico di sostenere l'accrescimento naturale del terreno, e la "polderizzazione", ovvero il prosciugamento – mediante opportuni sistemi di drenaggio e di pompaggio – delle aree a bassa elevazione (polder), circonscritte da strutture di contenimento fisiche. La pratica dell'avanzamento è molto comune nel mondo, soprattutto nelle aree costiere caratterizzate da un'elevata densità popolativa e carenza di superficie. A livello globale, si stima che nel trentennio dal 1986 al 2016 siano stati recuperati dal mare circa 33,700 km² di terra, il 50% in più di quella persa, con i maggiori guadagni dovuti alle bonifiche in luoghi come Dubai, Singapore e Cina.^{xiii}

Analogamente alle opere di protezione rigida, la bonifica del territorio è una tecnologia matura ed efficace e può fornire livelli prevedibili di sicurezza. Inoltre, nel caso in cui un terreno venga innalzato al di sopra dell'altezza degli eventi di livello marino estremo, i rischi residui sono addirittura inferiori rispetto alle strutture protettive, poiché non vi è il rischio di un catastrofico cedimento della difesa.

I costi dell'avanzamento sono estremamente variabili e dipendono principalmente dal costo unitario del riempimento rispetto al requisito volumetrico, oltre al suo trasporto e posa; pertanto, sollevare il terreno è più conveniente in aree poco profonde e con ampia disponibilità di materiale.

In passato, l'avanzamento non è mai stata una risposta primaria all'innalzamento del livello dei mari, ma a causa di una serie di fattori come scarsità di terreno, pressione demografica ed eventi estremi, si prevede che in futuro le misure di avanzamento saranno sempre più integrate con l'adattamento costiero e in alcuni casi potrebbero essere viste come un'opportunità per sostenere e finanziare l'adattamento stesso.

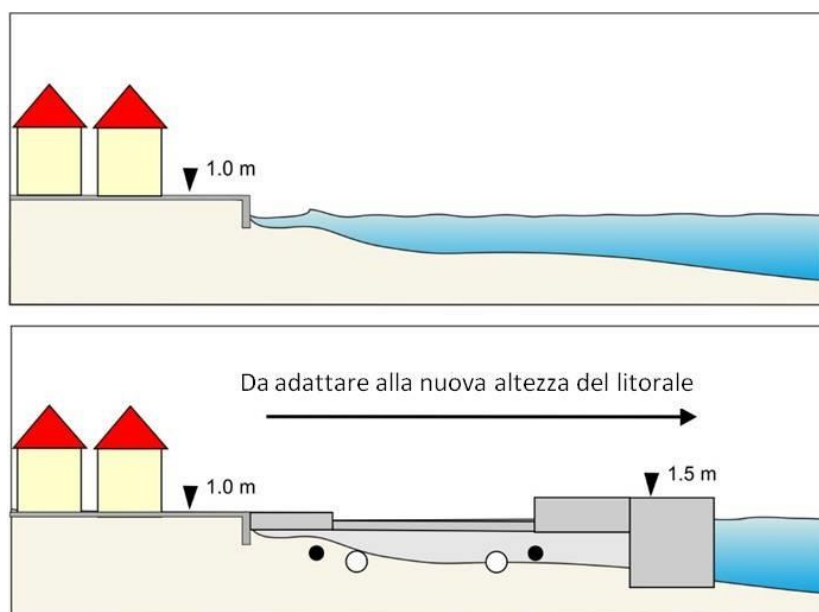


Figura 3.21: esempio di costruzione di un nuovo litorale e ampliamento della fascia costiera. Fonte: *Adriadapt*¹⁴

Il principale co-beneficio dell'avanzamento è proprio la creazione di nuova superficie territoriale; tuttavia, gli interventi di estensione del litorale portano notevoli svantaggi, tra cui l'aumento dell'erosione e la perdita di ecosistemi e habitat, nonché la crescita della pianura alluvionale costiera. In Cina, ad esempio, quasi il 50% degli ecosistemi costieri è andato perduto a causa della bonifica, provocando una sostanziale perdita di biodiversità, il declino delle specie di uccelli e delle risorse ittiche, la riduzione della depurazione delle acque e una maggiore frequenza di fioriture algali dannose.^{xiv} Inoltre, è possibile che la bonifica storica dei terreni attraverso la polderizzazione abbia aumentato l'esposizione al rischio di inondazioni, in seguito alla creazione e popolazione di nuove pianure alluvionali; non sono però disponibili sufficienti valutazioni.

L'evidenza sull'efficacia delle opere di bonifica del territorio costiero è limitata, anche se i rapporti costi-benefici possono essere molto elevati nelle aree urbane a causa degli alti prezzi dei terreni e

degli immobili edificabili. L'accesso e la distribuzione delle nuove terre create, assieme al coinvolgimento di capitali e interessi privati, sollevano tuttavia dibattute questioni di equità socioeconomiche.

3.2.4 Sistemazione (*accomodation*)

Le misure di sistemazione comprendono diverse risposte biofisiche e istituzionali che mitigano il rischio e gli impatti costieri, riducendo la vulnerabilità di attività e insediamenti umani, degli ecosistemi e dell'ambiente costruito, al fine di consentire l'abitabilità delle zone costiere nonostante i crescenti livelli di pericolosità.



Figura 3.22: case galleggianti in Vietnam.

L'adattamento contro le inondazioni include molte alternative che spaziano dall'innalzamento delle case (ad esempio su palafitte) e il trasferimento dei beni di valore ai piani più alti, fino alla costruzione di case e orti galleggianti (Figura 3.22). Inoltre, specifici materiali o accorgimenti strutturali possono rendere gli edifici meno vulnerabili alle inondazioni, se non addirittura impermeabili; anche piccoli e poco costosi interventi di protezione sono

in grado di ridurre notevolmente i danni. Altrettanto importanti nelle zone urbane più sviluppate sono i sistemi di drenaggio estensivi, che permettono di gestire i grandi volumi di deflusso superficiale generati durante gli eventi temporaleschi e di mareggiata. Contro l'erosione, invece, rivestono un ruolo fondamentale le norme e le prescrizioni edilizie. Per fronteggiare l'intrusione di acqua salata sono previsti opportuni cambiamenti nell'uso del suolo – come la transizione dalla coltivazione all'acquacoltura di specie salmastre – oppure la scelta di coltivazioni resistenti alla salinità. Infine, le risposte istituzionali di adattamento includono sistemi di allarme rapido, piani di emergenza e la predisposizione di zone di arretramento. Di recente, sono stati sviluppati anche regimi assicurativi a livello nazionale e internazionale, volti a tutelare soprattutto i Paesi in via di sviluppo dagli ingenti impatti finanziari degli eventi estremi improvvisi.

Le misure di sistemazione possono essere molto efficaci per l'attuale livello dei mari e per contenuti innalzamenti, permettendo di risparmiare notevoli quantità di denaro, oltre a guadagnare tempo per prepararsi ai futuri scenari. Il principale co-beneficio della sistemazione è infatti il miglioramento della resilienza delle comunità senza l'arretramento o l'utilizzo di terreni e risorse per la costruzione di misure di protezione. L'impermeabilizzazione dalle inondazioni, ad esempio, aiuta a prevenire la demolizione o il trasferimento degli edifici e mantiene i benefici che derivano dalla dinamica delle

inondazioni, come la redistribuzione dei sedimenti. Strutture sopraelevate come le palafitte, invece, hanno il potenziale di mantenere parzialmente inalterato il paesaggio e la sua connettività, consentendo l'accesso all'oceano e la migrazione verso terra degli ecosistemi, almeno parzialmente. Le misure di sistemazione, tuttavia, non prevengono in alcun modo gli eventi dannosi, che potrebbero avere comunque conseguenze non contrastate dalla misura di sistemazione stessa; ad esempio, l'allagamento di un'area in cui le case sono a prova di inondazioni causa lo stesso l'interruzione della scolarizzazione e delle attività commerciali, molte delle quali possono avere difficoltà a riprendersi. Inoltre, dopo l'ingresso dell'acqua alluvionale negli edifici, possono essere necessari significativi interventi di pulizia e rimozione di sedimenti, detriti o altri residui. Un'efficace gestione del rischio costiero, comunque, si basa innanzitutto sulla comprensione delle probabilità e delle conseguenze degli impatti, che vanno mappati e resi noti, al fine di informare e formare la popolazione circa i sistemi di allerta e le procedure da seguire in caso di emergenza. Tra i casi più conosciuti si può citare quello del Bangladesh, dove il miglioramento degli allarmi precoci, la costruzione di rifugi e lo sviluppo di adeguati piani di evacuazione hanno contribuito a ridurre notevolmente le vittime di inondazioni e cicloni, nonostante l'analfabetismo, la mancanza di consapevolezza e la scarsa comunicazione ostacolino ancora l'efficienza delle procedure di emergenza.^{xv} Se ben concepite, anche opportune polizze assicurative possono efficacemente scoraggiare ulteriori investimenti nelle aree a rischio, anche se gli assicurati, non dovendo sostenere i costi di eventuali danni o perdite, potrebbero essere meno inclini a prendere misure precauzionali ed agire con imprudenza.^{xvi}

A causa del preoccupante tasso di innalzamento del livello dei mari, le sistemazioni appena discusse presenteranno, nel medio e lungo termine, limiti pratici ed economici non trascurabili. Esse continueranno comunque a essere un'opzione di adattamento diffusa, ma soprattutto in combinazione con misure di protezione, avanzamento e ritiro, le quali possono fronteggiare con maggiore sicurezza i rischi associati.

3.2.5 Arretramento (*retreat*)

L'arretramento è senza dubbio la misura di adattamento più efficace nel ridurre il rischio costiero, dal momento che sposta persone, beni e attività esposte direttamente fuori dalla zona di pericolo. Si parla di migrazione se lo spostamento è volontario, e di sfollamento nel caso in cui esso sia forzato e imprevisto. Con il termine trasferimento, dislocazione o reinsediamento, invece, si indicano le operazioni di arretramento avviate, supervisionate e attuate dai governi, dai livelli nazionali a quelli locali; il reinsediamento di solito coinvolge piccoli siti e/o comunità e può anche essere condotto allo scopo di creare un nuovo habitat. Ciononostante, il confine tra queste tre sottocategorie non è netto:

la decisione di una famiglia di ritirarsi può essere volontaria in teoria, ma in pratica deriva da opzioni molto limitate.

Oltre a ridurre efficacemente i rischi e gli impatti dell'innalzamento del livello dei mari, i risultati delle risposte di arretramento sono complessi e riguardano sia l'origine che la destinazione. In generale, il ritiro ha un impatto sulle reti sociali e sull'accesso ai servizi e alle opportunità economiche e sociali, oltre che sulla stessa identità e benessere delle persone coinvolte, colpite da sostanziali impatti culturali, sociali e psicologici.

I benefici socioeconomici della migrazione possono includere un migliore accesso ai servizi sanitari e di istruzione, nonché ai mercati del lavoro. Inoltre, nel caso di migrazione verso aree con economie in crescita, la disuguaglianza di reddito può essere ridotta. Anche le aree di destinazione possono però trarre vantaggio economico dal trasferimento di persone e capitali, che portano aggiuntiva manodopera e investimenti più consistenti.

Allo stesso tempo, migrazione e sfollamento possono generare una maggiore competizione per le risorse e per i posti lavoro, così come un'eccessiva pressione sui servizi primari e una scarsa coesione sociale, come risultato di un'accentuata tensione culturale o etnica.^{xvii} Il trasferimento volontario non pianificato o assistito, invece, pone spesso una serie di sfide pratiche legate ai servizi igienici, all'accesso all'acqua potabile e ai trasporti.

Il successo del reinsediamento pianificato in termini di equilibrio tra co-benefici e svantaggi varia a seconda dei programmi di ricollocazione e i risultati sono molto disomogenei. Da un lato, programmi ben progettati e accuratamente implementati possono migliorare gli standard abitativi e ridurre la vulnerabilità; dall'altro lato, le comunità trasferite spesso si impoveriscono ulteriormente, sia perché allontanate dalle risorse culturali e materiali su cui fanno affidamento, sia perché aggravate da un'inadeguata attuazione del piano, che può non garantire equità, benessere e giustizia sociale e ambientale.^{xviii}

Nonostante il grande consenso sulla capacità dei cambiamenti climatici di alterare drasticamente l'entità e la direzione dei flussi migratori, resta scarsa l'affidabilità delle proiezioni quantitative circa il trasferimento come risposta esclusiva all'innalzamento del livello del mare e ai suoi eventi estremi. Inoltre, nessuno dei pochi studi modellistici che affrontano l'arretramento tiene conto di tutti i fattori che appoggiano od ostacolano tali decisioni, sul piano e individuale e comunitario.^{xix}

4. CONCLUSIONI

In assenza di appropriate politiche di contrasto al corrente riscaldamento globale, il complesso fenomeno dell'innalzamento del livello dei mari rappresenterà un rischio sempre più concreto e diffuso in tutto il mondo. Gli impatti più seri, tuttavia, riguarderanno soprattutto le regioni costiere a bassa elevazione, tra cui le tre aree oggetto di studio: lo Stato insulare di Tuvalu, i Paesi Bassi e la provincia metropolitana di Bangkok.

L'isola-stato di Tuvalu è tra le regioni del Pianeta più vulnerabili all'innalzamento dei mari, per via della sua bassa topografia e contenuta estensione, oltre alla isolata posizione geografica. Le sempre più intense mareggiate causano ingenti danni alle infrastrutture e alle abitazioni; ad oggi, in difesa dei principali centri abitati tuvaluani sono in costruzione misure sia di avanzamento sia di protezione, nella speranza di ritardare il più possibile la prima dislocazione al mondo di un'intera nazione.

Il caso dei Paesi Bassi e dei loro ambiziosi programmi di protezione costiera, invece, rappresenta un perfetto esempio di successo di ingegneria ambientale e idraulica. Infatti, essi sono in grado – con avanguardistiche misure di protezione e sistemazione – non solo di proteggere vasti territori dalle inondazioni, ma addirittura di sottrarre estese fasce costiere al mare. Tali misure garantiscono da decenni un elevato grado di protezione al Paese, anche se la loro efficacia potrebbe decadere nei secoli a venire, portando al reinsediamento di buona parte della popolazione.

Vi è infine la città di Bangkok, minacciata dalle periodiche inondazioni e dall'innalzamento del livello del mare relativo, il cui preoccupante tasso è dovuto soprattutto ai notevoli fenomeni di subsidenza del territorio deltizio. La capitale thailandese e le province limitrofe, tra le aree più densamente popolate del mondo, dispongono attualmente di limitate e poco efficaci misure di adattamento; tuttavia, l'amministrazione locale ha in programma nei prossimi anni l'attuazione di numerose strategie e piani di mitigazione, onde evitare l'arretramento e la migrazione di milioni di abitanti.

Governi e amministrazioni locali hanno il compito di mettere in atto idonee strategie di adattamento e misure di difesa del territorio, valutate in base alle specifiche caratteristiche ed esigenze delle regioni. Una combinazione di queste può contribuire a contenere l'impatto dell'innalzamento marino, garantendo una maggiore resilienza alle comunità coinvolte, anche se l'efficacia a lungo termine di tali infrastrutture e sistemazioni è messa in seria discussione soprattutto dalle preoccupanti previsioni. Qualora eventuali costruzioni difensive, per il mutare delle condizioni, non fossero più edificabili, potenziabili o sufficientemente efficaci, è indispensabile disporre di opportune strategie alternative di adattamento, inclusi adeguati piani di sfollamento in caso di emergenza, oppure di emigrazione preventiva e controllata.

Inoltre, come qualsiasi altra crisi di carattere climatico, l'innalzamento del livello del mare è una sfida globale che non conosce confini nazionali e richiede pertanto solidarietà, cooperazione e supporto tra i Paesi, al fine di limitare gli effetti socioeconomici ed ambientali al massimo delle capacità e possibilità. Uno dei principali strumenti di cooperazione è la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), firmata nel 1992, il cui obiettivo principale è stabilizzare le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera a un livello tale da evitare pericolose interferenze antropiche nel sistema climatico. Il risultato ad oggi più significativo della Convenzione è l'Accordo di Parigi, adottato nel 2015 con l'obiettivo di limitare entro fine secolo l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali, con uno sforzo per limitare l'aumento a 1,5°C.

Oltre agli accordi internazionali, sono state create varie piattaforme e iniziative di cooperazione internazionale per affrontare i cambiamenti climatici. Ad esempio, il *Fondo verde per il clima* è stato istituito per sostenere i Paesi in via di sviluppo nell'adattamento ai cambiamenti climatici e nella mitigazione delle emissioni. Inoltre, le conferenze annuali sul clima delle Nazioni Unite, conosciute come COP (*Conference of the Parties*), offrono un'opportunità per i Paesi di collaborare, negoziare e prendere decisioni sulle politiche climatiche.

Un ruolo chiave è coperto anche dal settore privato, dalle organizzazioni non governative e dalla società civile. Le *partnership* tra quest'ultime e i governi sono fondamentali per promuovere l'innovazione tecnologica, la condivisione delle migliori pratiche e l'implementazione di soluzioni sostenibili.

Nonostante gli sforzi compiuti, è importante sottolineare che l'impegno e la cooperazione internazionale contro i cambiamenti climatici devono essere intensificati. Da un lato, gli obiettivi dell'Accordo di Parigi richiedono azioni ambiziose e immediate per ridurre le emissioni di gas serra e promuovere la transizione ecologica; dall'altro lato, la collaborazione tra i Paesi è essenziale per condividere conoscenze, risorse e responsabilità nella lotta contro i cambiamenti climatici, al fine di garantire un futuro sostenibile per le generazioni future.

Bibliografia

- ⁱ Cheng L., Abraham J., Zhu J., Trenberth K.E., Fasullo J., Boyer T., Locarnini R., Zhang B., Yu F., Wan L., Chen X., Song X., Liu Y. & Mann M.E. (2020): *Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019*. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142. DOI: 10.1007/s00376-020-9283-7.
- ⁱⁱ Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussailant I., Brun F. & Kääh A. (2021): *Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century*. *Nature*, 592, 726–731. DOI: 10.1038/s41586-021-03436-z.
- ⁱⁱⁱ Rounce D.R., Hock R., Maussion F., Hugonnet R., Kochtitsky W., Huss M., Berthier E., Brinkerhoff D., Compagno L., Copland L., Farinotti D., Menounos B. & McNabb R.W. (2023): *Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters*. *Science*, 379(6627), 78–83. DOI: 10.1126/science.abo1324.
- ^{iv} Wada Y., Reager J.T., Chao B.F., Wang J., Lo M.-H., Song C., Li Y. & Gardner A.S. (2017): *Recent Changes in Land Water Storage and its Contribution to Sea Level Variations*. *Surveys in Geophysics*, 38, 131–152. DOI: 10.1007/s10712-016-9399-6.
- ^v Reager J. T., Gardner A.S., Famiglietti J.S., Wiese D.N., Eicker A. & Lo M.-H.: *A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology*. *Science*, 351(6274), 699–703. DOI: 10.1126/science.aad8386.
- ^{vi} Than A., Awnesh S. and Uma P. (2009): *Sea Level Threat in Tuvalu*. *American Journal of Applied Sciences*, 9(6), 1169–1174. DOI: 10.3844/AJASSP.2009.1169.1174.
- ^{vii} Phienweij N. & Prinya N. (2005): *Subsidence and Flooding in Bangkok*. Oxford Academic, *The Physical Geography of Southeast Asia*. DOI: 10.1093/oso/9780199248025.003.0033.
- ^{viii} Olsthoorn X., van der Werff P., Bouwer L.M. & Huitema D. (2008): *Neo-Atlantis: The Netherlands under a 5-m sea level rise*. *Climatic Change*, 91(1–2), 103–122. DOI: 10.1007/s10584-008-9423-z.
- ^{ix} Causevic A., LoCastro M., David D., Selvakkumaran S., Gren A. (2021): *Financing resilience efforts to confront future urban and sea-level rise flooding: Are coastal megacities in Association of Southeast Asian Nations doing enough?*. *Urban Analytics and City Science*, 48(5), 989–1010. DOI: 10.1177/2399808321994437.
- ^x Tamura M., Kumano N., Yotsukuri M. & Yokoki H. (2019): *Global assessment of the effectiveness of adaptation in coastal areas based on RCP/SSP scenarios*. *Climatic Change*, 152(3–4), 1–15. DOI: 10.1007/s10584-018-2356-2.
- ^{xi} Nicholls R. J., Lincke D., Hinkel J. & van der Pol T. (2019): *Global Investment Costs for Coastal Defence Through the 21st Century*. World Bank Group, 8745. DOI: 10.1596/1813-9450-8745.
- ^{xii} Marsooli R., Orton P.M., Georgas N. & Blumberg A.F. (2016): *Three-dimensional hydrodynamic modeling of coastal flood mitigation by wetlands*. *Coastal Engineering Journal*, 111, 83–94. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.01.012.
- Roeber V. & Bricker J.D. (2015): *Destructive tsunami-like wave generated by surf beat over a coral reef during Typhoon Haiyan*. *Nature Communications*, 6, 7854. DOI: 10.1038/ncomms8854.
- ^{xiii} Donchyts G., Baart F., Winsemius H., Gorelick N., Kwadijk J. & van de Giesen N. (2016): *Earth's surface water change over the past 30 years*. *Nature Climate Change*, 6(9), 810–813. DOI: 10.1038/nclimate3111.
- ^{xiv} Wang W., Liu H., Li Y. & Su J. (2014): *Development and management of land reclamation in China*. *Ocean & Coastal Management*, 102, 415–425. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.03.009.
- ^{xv} Haque U., Hashizume M., Kolivras K.N., Overgaard H. J., Das B. & Yamamoto T. (2012): *Reduced death rates from cyclones in Bangladesh: what more needs to be done?*. *Bulletin of the World Health Organisation* 90(2):150–6. DOI: 10.2471/BLT.11.088302.
- ^{xvi} Duus-Otterström G. & Jagers S.C. (2011): *Why (most) climate insurance schemes are a bad idea*. *Environmental Politics*, 20(3), 322–339. DOI: 10.1080/09644016.2011.573354.
- ^{xvii} Werz M. & Hoffman M. (2015): *Climate change, migration, and the demand for greater resources: challenges and responses*. *SAIS Review of International Affairs*, 35 (1), 99–108. DOI: 10.1353/sais.2015.0016.

^{xviii} Wilmsen B. & Webber M. (2015): *What can we learn from the practice of development-forced displacement and resettlement for organised resettlements in response to climate change?*. *Geoforum*, 58, 76–85. DOI: 10.1016/j.geoforum.2014.10.016.

^{xix} Goodwin-Gill G. S. and McAdam J., (2017): *Climate Change Disasters and Displacement*. United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR): refworld.org/pdfid/5aa695874.pdf.

Sitografia

¹ National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Sea Level Change, Observations from Space. *Understanding Sea Level:*

sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/key-indicators/global-mean-sea-level

Jet Propulsion Laboratory, *NASA uses 30-year satellite record to track and project rising seas:*

sealevel.nasa.gov/news/259/nasa-uses-30-year-satellite-record-to-track-and-project-rising-seas/

Global Climate Change, Vital Signs of the Planet. *Ocean Warming:*

climate.nasa.gov/vital-signs/ocean-warming/

Global Climate Change, Vital Signs of the Planet. *Ice Sheets:*

climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/

Scientific Visualization Studio (SVS). *Greenland and Antarctic Ice Mass Loss:*

svs.gsfc.nasa.gov/31156; svs.gsfc.nasa.gov/31158

Sea Level Change, Observations from Space. *Are sea levels rising the same all over the world, as if we're filling a giant bathtub?*

sealevel.nasa.gov/are-sea-levels-rising-the-same-all-over-the-world-as-if-were-filling-a-giant-bathtub/

² National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Climate.gov, *Climate Change: Global Sea Level:*

climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level

National Centers for Environmental Information (NCEI), *Ocean Heat Content Rises:*

ncei.noaa.gov/news/ocean-heat-content-rises

National Centers for Environmental Information (NCEI), *Global Temperature Anomalies Time Series:*

ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land/12/12/1880-2022?trend=true&trend_base=10&begtrendyear=1880&endtrendyear=2022

³ The Copernicus Programme, *Climate Indicators, Cryosphere:*

climate.copernicus.eu/climate-indicators/cryosphere

⁴ World Glacier Monitoring Service (WGMS), *Global Glacier State:*

wgms.ch/global-glacier-state/

⁵ IPCC, *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (2019):

ipcc.ch/srocc/

⁶ NASA Sea Level Change, *IPCC AR6 Sea Level Projection Tool:*

sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool

⁷ Climate Central, *Coastal Risk Screening Tool:*

coastal.climatecentral.org

⁸ NASA/SEDAC, *Population Estimator Service:*

sedac.ciesin.columbia.edu/mapping/popest/pes-v3/

-
- ⁹ Tuvalu Coastal Adaptation Project (TCAP):
tcap.tv
- ¹⁰ UNDP, *Coastal construction designs to benefit three target islands in Tuvalu* (2021):
undp.org/pacific/news/coastal-construction-designs-benefit-three-target-islands-tuvalu
- ¹¹ Provincie Noord-Holland, *La nuova Afsluitdijk*:
leidraadlc.noord-holland.nl/initiatief-inspiratie-project/de-nieuwe-afsluitdijk/
- ¹² Bangkok Post, *Group ends sea wall protests*:
bangkokpost.com/thailand/general/2457235/group-ends-sea-wall-protests
- ¹³ Financial Times, *Rising sea levels leave Bangkok seeking ways to keep water at bay*:
ft.com/content/bed1cb22-c28d-11e9-a8e9-296ca66511c9
- ¹⁴ Adriadapt, *Interventi di innalzamento ed estensione del territorio costiero*:
adriadapt.eu/it/adaptation-options/interventi-di-innalzamento-ed-estensione-del-territorio-costiero/