

1 Sommario

1. Introduzione	3
2. Implementazione degli scenari futuri e di laguna regolata	4
3. Risultati delle simulazioni	5
3.1 Simulazione di riferimento per il presente	5
3.2 Confronto tra scenari presente, futuro e di laguna regolata	6
4. Conclusioni	11
Bibliografia	12
Allegato: informazioni di supporto al deliverable D2.2.5.4. Risultati dell’analisi modellistica e confronto tra scenari presente e futuro di laguna “regolata”	13

1. Introduzione

Questo documento presenta i risultati dell'analisi per scenari sugli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo del mercurio nella laguna di Venezia. L'analisi è stata effettuata tramite comparazione di una simulazione di riferimento per il presente (2005) con delle simulazioni relative agli anni 2050 e 2100 che riproducono la variazione delle forzanti climatiche e dei boundary marini secondo lo scenario climatico RCP8.5, sia in presenza che in assenza di chiusure alle bocche di porto dovute al sistema Mose.

Le simulazioni sono state condotte con il modello Shyfem-Hg, sviluppato durante questo progetto attraverso l'accoppiamento di un modulo per la biogeochimica del Hg e uno per la dinamica dei sedimenti con il modello idrodinamico agli elementi finiti Shyfem (Umgiesser et al., 2003).

2. Implementazione degli scenari futuri e di laguna regolata

Gli scenari futuri e di laguna regolata sono stati implementati mantenendo invariate le condizioni iniziali, le condizioni al contorno e le parametrizzazioni relative alle specie del Hg nelle acque e al fondo, così da poter focalizzare l'analisi sugli effetti dei cambiamenti delle forzanti idrodinamiche e meteo-climatiche. Un'analisi dell'impatto delle variazioni future degli input di Hg alla laguna è stata svolta in precedenza con il modello a box (Rosati et al., 2020), nella fase iniziale del progetto.

Le variazioni degli scenari rispetto alle condizioni presenti riguardano i livelli delle acque alle bocche di porto e le forzanti meteorologiche. L'andamento delle forzanti fisiche per il futuro è stato stimato seguendo le previsioni per lo scenario di cambiamento climatico RCP8.5 dai partecipanti alla Linea 5.2 (Milestone M.5.2.1.7). Le forzanti fisiche meteorologiche sono state acquisite dal modello CMCC-COSMO (Bucchignani et al., 2016; Zollo et al. 2016), le condizioni al boundary marino della laguna sono state acquisite dal modello CMCC-NEMO (Lovato et al. 2013; Reale et al. 2022) e gli scenari di innalzamento di livello del mare sono stati calcolati applicando un trend con un aumento lineare del livello tra il 2005 e il 2100, con un massimo di 71 cm nel 2100, in accordo a Zanchettin et al. (2021).

A partire da queste forzanti, sono stati implementati gli scenari futuri (2050 e 2100) per la biogeochimica del mercurio: uno che riproduce le chiusure delle bocche di porto tramite il sistema MOSE ed uno senza le chiusure.

3. Risultati delle simulazioni

3.1 Simulazione di riferimento per il presente

Sia lo studio preliminare con il modello a box (Rosati et al., 2020) che le simulazioni condotte successivamente con il modello agli elementi finiti Shyferm-Hg hanno evidenziato il forte accoppiamento benthico-pelagico del ciclo del Hg nella laguna di Venezia per lo stato attuale, con un ruolo cruciale della risospensione e deposizione e dei sedimenti organici e inorganici per la rimobilizzazione e il trasporto del Hg, come già evidenziato da studi precedenti (Bloom et al., 2004; Molinaroli et al., 2013).

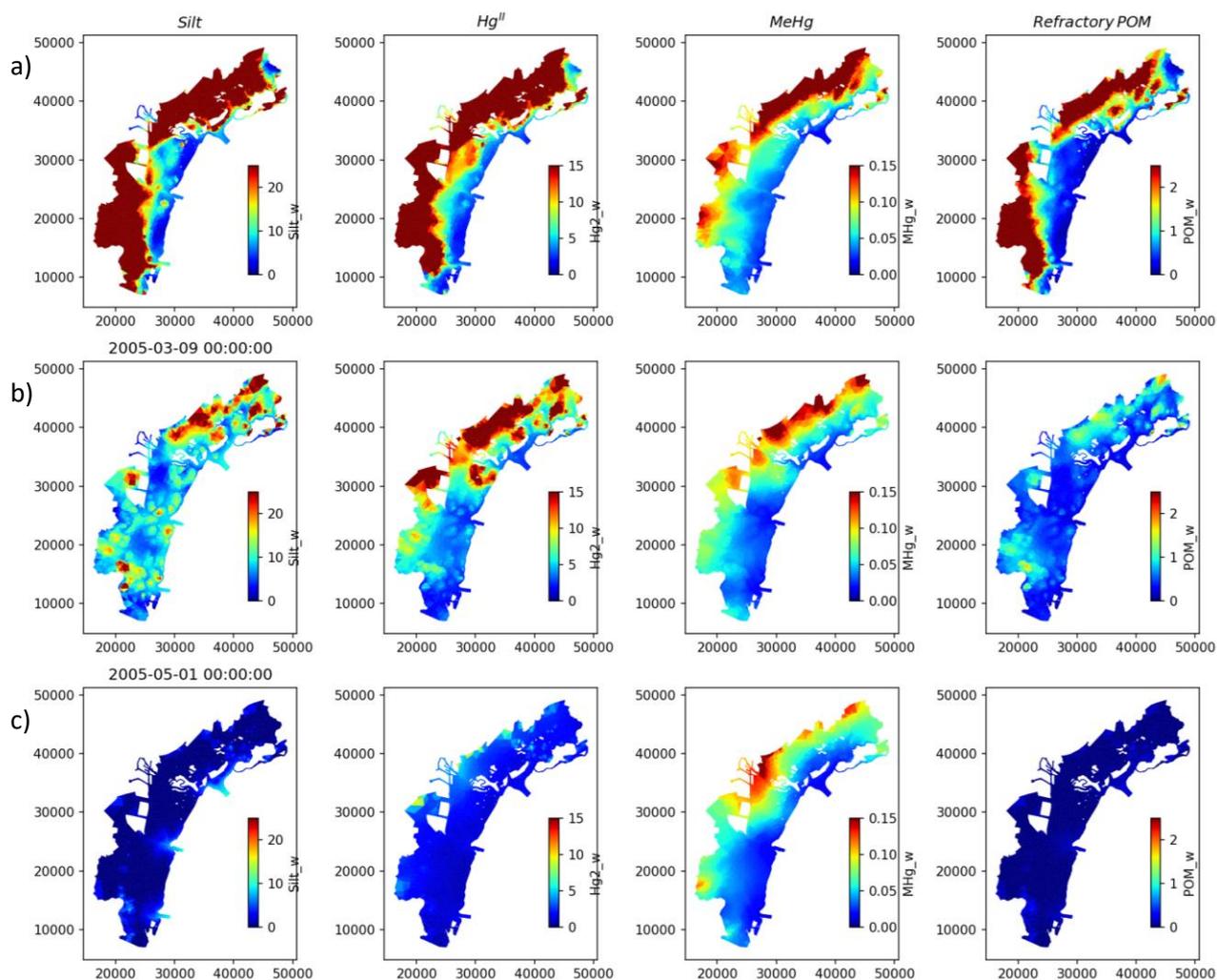


Figura 1. Distribuzione spaziale delle concentrazioni di silt, HgII, MeHg, e POM refrattario (colonne da sinistra verso destra) nelle acque della laguna, come media giornaliera di tre giorni con condizioni ambientali differenti: (a) 5 Febbraio 2005, (b) 9 Marzo 2005, (c) 1 Maggio 2005.

La distribuzione del mercurio nelle acque della laguna per lo stato attuale (2005) è fortemente influenzata da quella del silt e della sostanza organica refrattaria (Figura 1). L'effetto dell'aumento delle concentrazioni legato alla risospensione del sedimento (Figura 1a, b) è più accentuato per il Hg inorganico (Hg^{II}) che per il metilmercurio (MeHg). In condizioni di bassa risospensione (Figura 1c), le concentrazioni di solidi in sospensione sono massime alle bocche di porto e la distribuzione di Hg e MeHg diventa maggiormente legata agli input fluviali, con un effetto più forte per il MeHg. Questa dinamica è coerente con il budget stimato

tramite box-model, secondo il quale su scala annuale il contributo dei fiumi al pool di MeHg nelle acque è comparabile a quello della risospensione, mentre le concentrazioni di Hg^{II} sono controllate prevalentemente dalla risospensione (Rosati et al., 2020). Le concentrazioni di Hg e MeHg riprodotte dal modello sono nel range delle osservazioni sperimentali disponibili (Bloom et al., 2004; MAV-CVN, 2005; MAV-CORILA, 2011), così come le concentrazioni di solidi in sospensione, come descritto nei precedenti deliverable D2.2.5.1, D2.2.5.2, D2.2.5.3 (Melaku Canu and Rosati, 2019; Canu and Rosati, 2020) e sintetizzato in allegato.

3.2 Confronto tra scenari presente, futuro e di laguna regolata

Per gli scenari futuri del 2050 e 2100 (Figura 2), in assenza di chiusure alle bocche il modello prevede un significativo decremento delle concentrazioni medie di Hg^{II} (Figura 2a) e MeHg (Figura 2b) nelle acque della laguna, tranne che per i mesi estivi (luglio-settembre) del 2100 in cui le concentrazioni di MeHg sono paragonabili a quelli dello scenario di riferimento (2005). Per il Hg inorganico, vi è un picco (~9 ng/l) delle concentrazioni medie mensili nel gennaio 2050, mentre per gli altri mesi le concentrazioni rimangono sempre al di sotto dei 3 ng/l sia nel 2050 che nel 2100, con una riduzione di circa il 70% rispetto al presente. La riduzione media delle concentrazioni di MeHg in proporzione è minore, intorno al 45% per il 2050 e al 37% per il 2100 rispetto al riferimento.

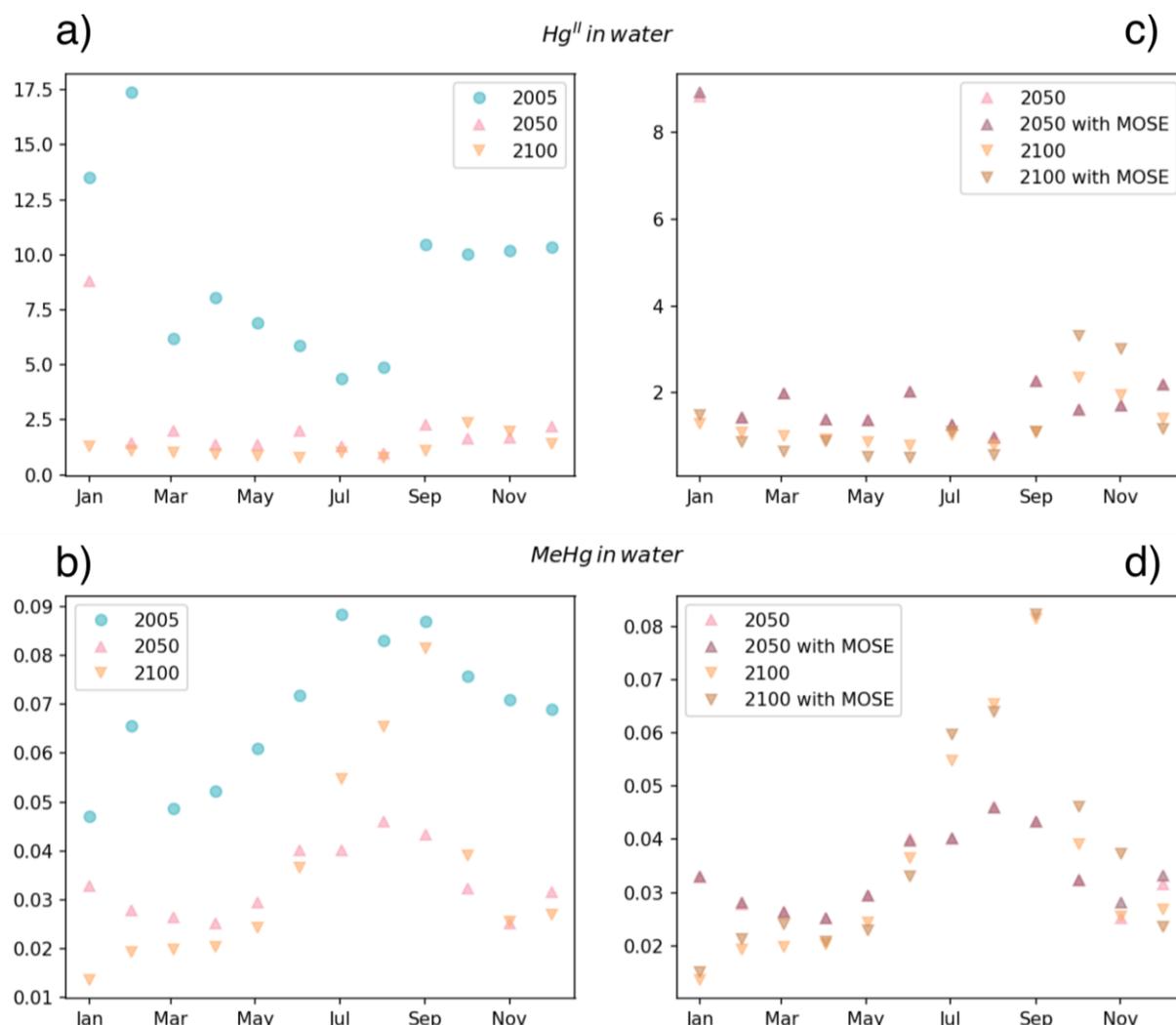


Figura 2. Confronto dell'andamento medio mensile delle concentrazioni di Hg e MeHg nelle acque della laguna per la simulazione di riferimento (2005) e gli scenari futuri. I pannelli a) e b) mostrano l'andamento del 2005 e degli scenari futuri (2050 e 2100) senza chiusure alle bocche. I pannelli c) e d) mostrano l'andamento degli scenari futuri con e senza le chiusure indotte dal Mose.

La diversa dinamica del MeHg rispetto al Hg inorganico è guidata dalla temperatura che incrementa significativamente nel 2100 rispetto al 2005 e al 2050 (Figura 3a), determinando un aumento della produzione di MeHg nelle acque e nei sedimenti. Le chiusure alle bocche indotte dal Mose determinano solo minime variazioni della temperatura media per il 2100 (Figura 3d) e causano un leggero aumento del POM refrattario tra ottobre e novembre 2100 (Figura 3e), indicativo di un aumento della risospensione dovuto a cambiamenti idrodinamici.

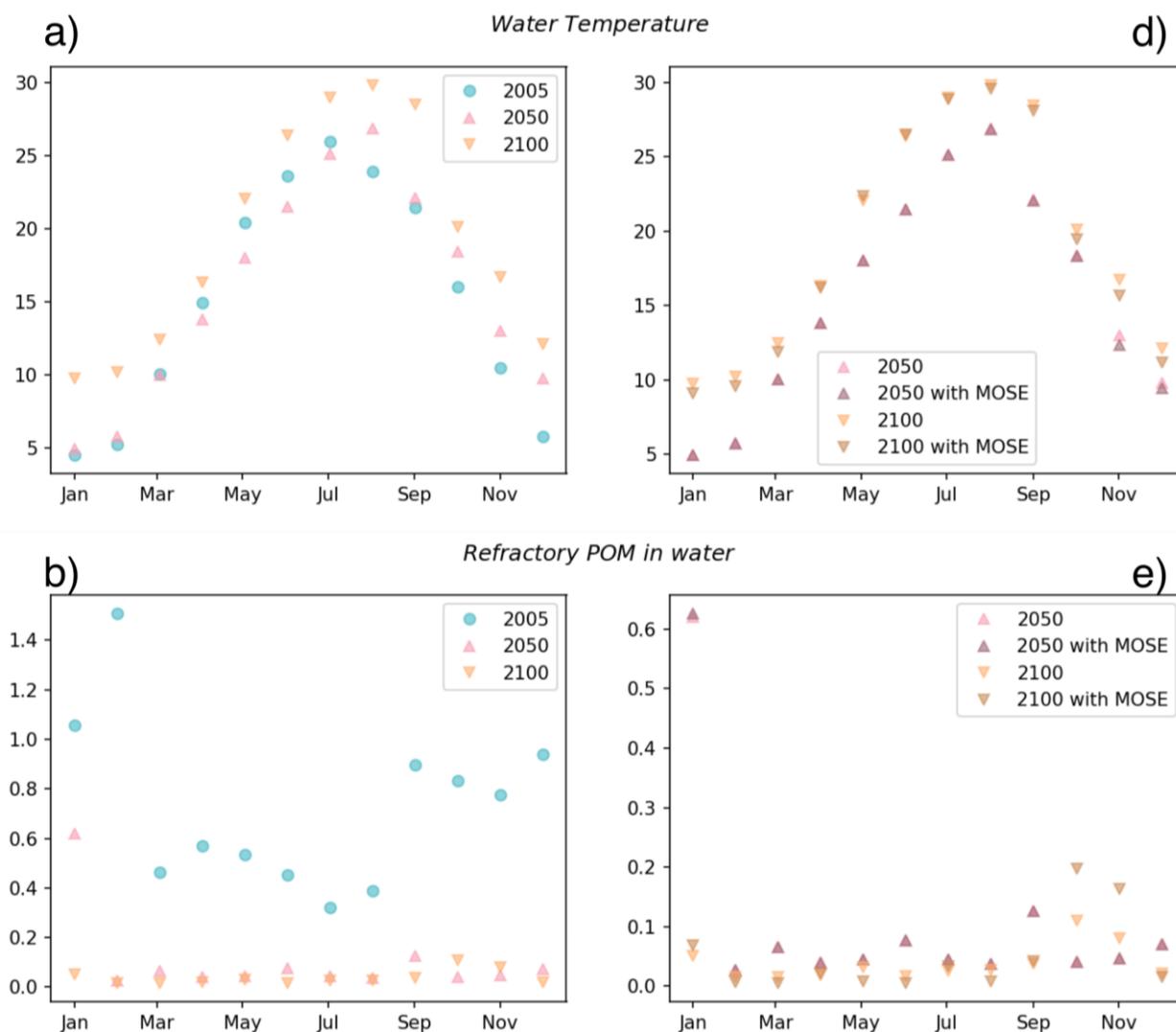


Figura 3. Confronto dell'andamento medio mensile della temperatura delle acque e delle concentrazioni di POM refrattario nelle acque della laguna per la simulazione di riferimento (2005) e gli scenari futuri. I pannelli a) e b) mostrano l'andamento del 2005 e degli scenari futuri (2050 e 2100) senza chiusure alle bocche. I pannelli c) e d) mostrano l'andamento degli scenari futuri con e senza le chiusure indotte dal Mose.

La riduzione delle concentrazioni negli scenari futuri è più marcata e spazialmente omogenea per il Hg^{II} (Figura 4) che per il MeHg (Figura 5) poiché è dovuta principalmente alla riduzione dello stress al fondo che regola la risospensione dei sedimenti, la quale è più rilevante per le dinamiche del mercurio inorganico che per il MeHg (Figura 1). La riduzione dello stress al fondo (Figura 6) è dovuta a sua volta al diverso idrodinamismo previsto per il futuro in risposta alle differenti condizioni meteo climatiche e all'aumento del livello medio del mare. Lo stress al fondo nel 2050 è inferiore al 2005 ma con valori ancora sostenuti nel mese di gennaio, durante il quale il modello predice livelli di Hg e MeHg nelle acque comparabili a quelli del presente, mentre risulta estremamente ridotto nel 2100.

Tali risultati presentano un'incertezza intrinseca legata al tentativo di predire condizioni future nonché alle semplificazioni necessariamente adottate negli scenari, come l'assunto che non vi siano variazioni nelle condizioni al contorno e nelle condizioni iniziali. In particolare, il modello non considera la risospensione legata alle attività antropiche o i cambiamenti della batimetria e delle morfologie lagunari attesi in risposta alla variazione del livello del mare e dell'idrodinamismo lagunare (Tognin et al., 2021), poiché tali informazioni non sono attualmente disponibili a scala di bacino. Un altro processo difficilmente quantificabile ma che potrebbe incidere fortemente sulle dinamiche del Hg in laguna è l'aumento dell'erosione costiera con l'aumento del livello medio del mare.

Hg^{II} in water

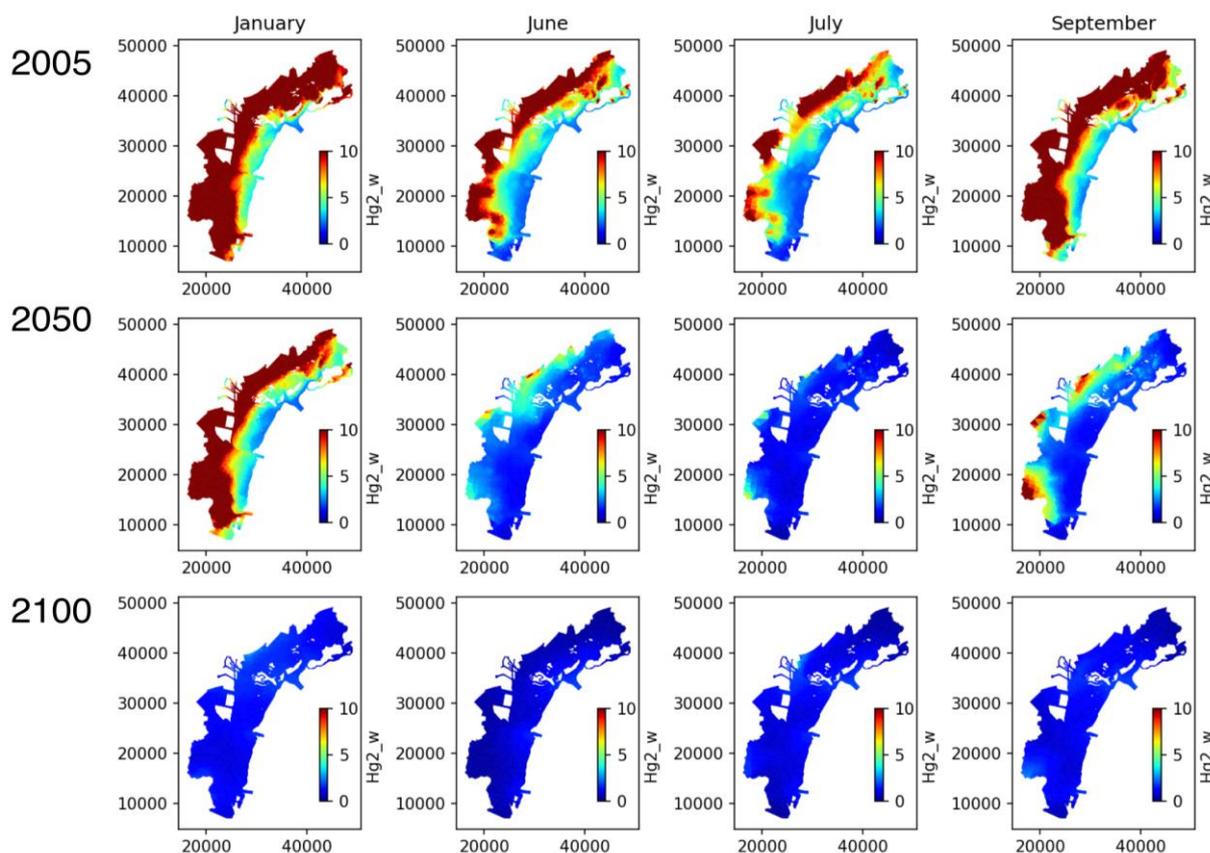


Figura 4. Confronto della distribuzione spaziale delle concentrazioni (ng/l) di Hg inorganico (Hg^{II}) nelle acque nel 2005, 2050 e 2100 per i mesi di gennaio, marzo, luglio e settembre.

Per gli scenari futuri, si osserva un aumento del disaccoppiamento della distribuzione spaziale del MeHg (Figura 5) da quella del Hg inorganico (Figura 4), dovuto alla variazione delle dinamiche di trasporto e trasformazione in seguito all'attenuarsi della risospensione. Le concentrazioni di MeHg nelle acque sono mediamente ridotte (Figura 2), ma si osserva anche una variazione della distribuzione spaziale (Figura 5) delle concentrazioni, che diventano più elevate nella zona sud della laguna rispetto alla zona nord, contrariamente alle dinamiche attuali. Sia per Hg^{II} che per MeHg, aumenta l'impatto relativo degli apporti fluviali, ma il MeHg tende ad essere maggiormente presente in tutte le aree maggiormente confinate della laguna, sia per la minore tendenza a sedimentare insieme ai solidi inorganici, sia perché in queste zone le temperature e i tempi di residenza delle acque sono maggiori, favorendo la produzione e l'accumulo di MeHg nelle acque. L'importanza delle dinamiche di produzione del MeHg in situ è evidenziata anche dal forte incremento delle concentrazioni estivo-autunnali nelle aree interne che si osserva nel 2100 rispetto al 2050.

MeHg in water

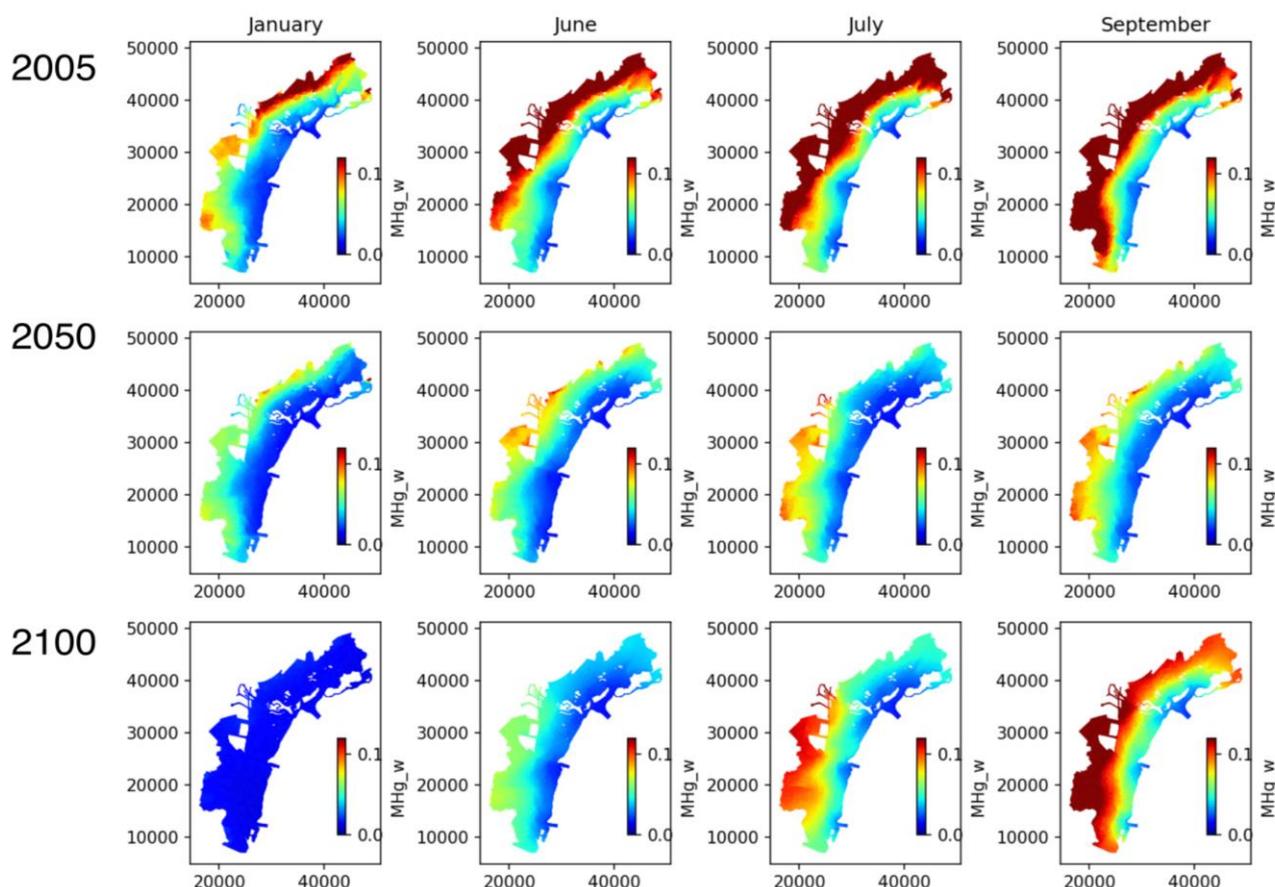


Figura 5. Confronto della distribuzione spaziale delle concentrazioni (ng/l) di metilmercurio (MeHg) nelle acque nel 2005, 2050 e 2100 per i mesi di gennaio, marzo, luglio e settembre.

Le differenze tra dinamiche presenti e future sono evidenziate dalla variazione delle concentrazioni nelle acque in risposta alla rimozione di diversi processi chiave (risospensione dei sedimenti, diffusione, apporti fluviali e marini) per il 2005 e il 2050 riportata in Tabella 1. Nello scenario futuro diventano maggiormente rilevanti gli apporti marini, che contribuiscono per circa il 40% alle concentrazioni di Hg^{II} in laguna e per il 55% a quelle di MeHg, ma anche gli input fluviali, il cui impatto nel 2050 è stimato intorno al 3% per il Hg^{II} (rispetto allo 0.6% attuale) e al 12% per il MeHg (rispetto al 6% attuale).

Questa conclusione è coerente con l'analisi per scenari condotta con il modello a box (Rosati et al., 2020), secondo la quale con l'attenuazione della risospensione del sedimento e degli input industriali vi è un aumento relativo dell'importanza degli input dal bacino scolante. La sola variazione degli input atmosferici in base agli scenari di emissione globali può determinare a fine secolo una variazione delle concentrazioni di Hg in laguna entro un range del $\pm 15\%$ (Rosati et al., 2020).

Pertanto i risultati degli scenari futuri implementati con il modello agli elementi finiti, insieme a quelli del modello a box, sottolineano l'importanza di una gestione locale e globale delle emissioni del Hg e delle sorgenti secondarie.

Bottom Shear Stress

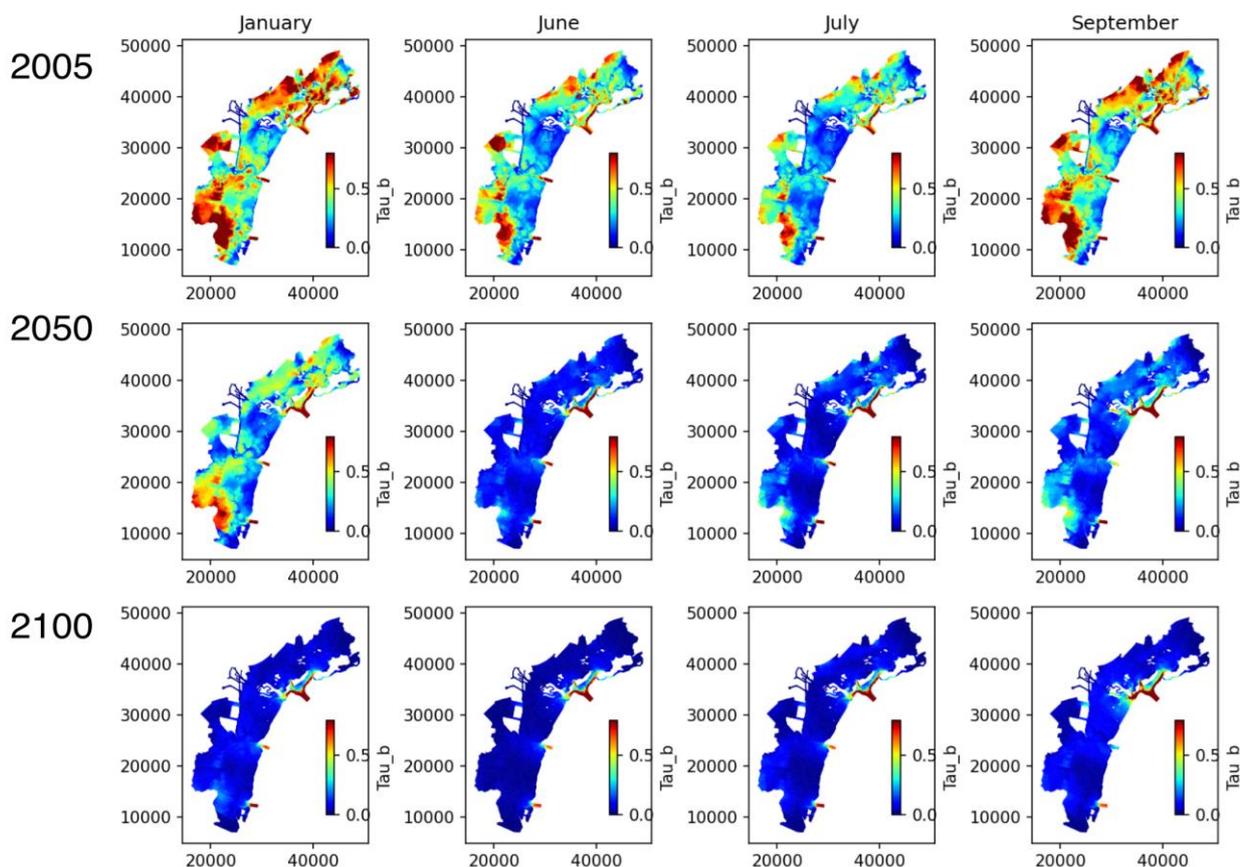


Figura 6. Confronto della distribuzione spaziale dello shear stress al fondo (media mensile) nel 2005, 2050 e 2100 per i mesi di gennaio, marzo, luglio e settembre.

Tabella 1. Confronto tra alcuni processi chiave del budget del mercurio per la simulazione di riferimento per lo stato attuale (2005) e lo scenario di cambiamento climatico 2050 senza chiusure alle bocche di porto.

Anno simulazione	2005		2050	
	HgII	MeHg	HgII	MeHg
Risospensione dei sedimenti	83.4%	56.9%	53.7%	25.3%
Diffusione	0.01%	0.27%	0.07%	0.36%
Carichi fluviali	0.58%	5.6%	2.7%	12.3%
Boundaries marini	13.7%	24.0%	39.3%	55.2%

4. Conclusioni

L'analisi per scenari suggerisce un decremento delle concentrazioni di Hg nelle acque della laguna per il futuro, a causa della diminuzione della risospensione dei sedimenti indotta dallo shear stress al fondo, a sua volta influenzato dalle alterazioni idrodinamiche.

Poiché la dinamica della risospensione è più importante per regolare le dinamiche del Hg inorganico che quelle del MeHg, la riduzione delle concentrazioni di MeHg (45%) è inferiore a quella del Hg (70%) per 2050.

Le proiezioni per il 2100 suggeriscono una possibile inversione del decremento di MeHg, con un aumento medio annuale delle concentrazioni del 5% circa rispetto al 2050. Questa dinamica è guidata dall'incremento delle temperature delle acque che favorisce la metilazione batterica, determinando un forte incremento delle concentrazioni estive del MeHg.

Per gli scenari analizzati, le variazioni indotte dal Mose hanno impatti piuttosto limitati sul ciclo del Hg in laguna.

I risultati sottolineano l'importanza di una gestione locale e globale delle emissioni del Hg e delle sorgenti secondarie per il controllo delle concentrazioni nelle acque.

Il lavoro evidenzia l'importanza dello sviluppo ed utilizzo di modelli biogeochimici accoppiati come strumenti per l'analisi di dinamiche ambientali complesse e multifattoriali, nonché come strumenti previsionali.

Bibliografia

- Bloom, N.S., Moretto, L.M., Scopece, P., Ugo, P., 2004. Seasonal cycling of mercury and monomethyl mercury in the Venice Lagoon (Italy). *Mar. Chem.* 91, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.002>
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A. L., & Mercogliano, P. (2016). High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *International Journal of Climatology*, 36(2), 735-756.
- Canu, D., Rosati, G., 2020a. Analisi dello scenario di riferimento. Venezia 2021 Programma di ricerca scientifica per una laguna regolata. Linea 2.2. inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose dal sedimento. D2.2.5.3.
- Canu, D., Rosati, G., 2020b. Calibrazione del modello e set-up degli scenari. Venezia 2021 Programma di ricerca scientifica per una laguna regolata. Linea 2.2. inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose dal sedimento. D2.2.5.2.
- MAV-CORILA, 2011. Rapporto Finale CORILA - Bioavailability and toxicity of pollutants in the Venice Lagoon, and regulatory changes (in italian). Programma di ricerca “La laguna di Venezia nel quadro dei cambiamenti climatici, delle misure di mitigazione ed adattamento e dell’evoluzione degli usi del territorio”, Linea “Biodisponibilità e biotossicità dei contaminanti lagunari ed evoluzione normativa”.
- MAV-CVN, 2005. Attività di monitoraggio ambientale della laguna di Venezia-MELa. Esecutivo del II stralcio triennale (2002 - 2005) - Environmental monitoring in the Venice Lagoon. Triennial Report (2002 - 2005) (in italian).
- Lovato, T., Vichi, M., Oddo, P. (2013). High-resolution simulations of Mediterranean Sea physical oceanography under current and scenario climate conditions: model description, assessment and scenario analysis. *CMCC Research Paper*, 961 RP0207.2013
- Melaku Canu, D., Rosati, G., 2019. Venezia 2021 Programma di ricerca scientifica per una laguna regolata. Linea 2.2. inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose dal sedimento Deliverable D2.2.5.1. Rappresentazione del ciclo del mercurio in multi-box.
- Reale, M., Cossarini, G., Lazzari, P., Lovato, T., Bolzon, G., Masina, S., Solidoro, C., Salon, S., 2021. Acidification, deoxygenation , nutrient and biomasses decline in a warming Mediterranean Sea. *Biogeosciences Discuss.* 1–44.
- Rosati, G., Solidoro, C., Canu, D., 2020. Mercury dynamics in a changing coastal area over industrial and postindustrial phases: Lessons from the Venice Lagoon. *Sci. Total Environ.* 743, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140586>
- Tognin, D., Alpaos, A.D., Marani, M., Carniello, L., 2021. Marsh resilience to sea-level rise reduced by storm-surge barriers in the Venice Lagoon 14. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00853-7>
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Solidoro, C., Ambrose, R., 2003. A finite element ecological model: a first application to the Venice Lagoon. *Environ. Model. Softw.* 18, 131–145. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00056-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00056-7)
- Zanchettin, D., Bruni, S., Raicich, F., Lionello, P., Adloff, F., Androsov, A., Antonioli, F., Artale, V., Carminati, E., Ferrarin, C., Fofonova, V., Nicholls, R.J., Rubinetti, S., Rubino, A., Sannino, G., Spada, G., Thiéblemont, R., Tsimplis, M., Umgiesser, G., Vignudelli, S., Wöppelmann, G., Zerbini, S., 2021. Sea-level rise in Venice: historic and future trends (review article). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 21, 2643–2678. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2643-2021>
- Zollo, A. L., Rillo, V., Bucchignani, E., Montesarchio, M., & Mercogliano, P. (2016). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high-resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *International Journal of Climatology*, 36(2), 987-1004.

Allegato: informazioni di supporto al deliverable D2.2.5.4. Risultati dell’analisi modellistica e confronto tra scenari presente e futuro di laguna “regolata”

Viene riportata una sintesi relativa alla calibrazione del modello accoppiato Shyferm-Hg condotta durante il progetto Venezia2021.

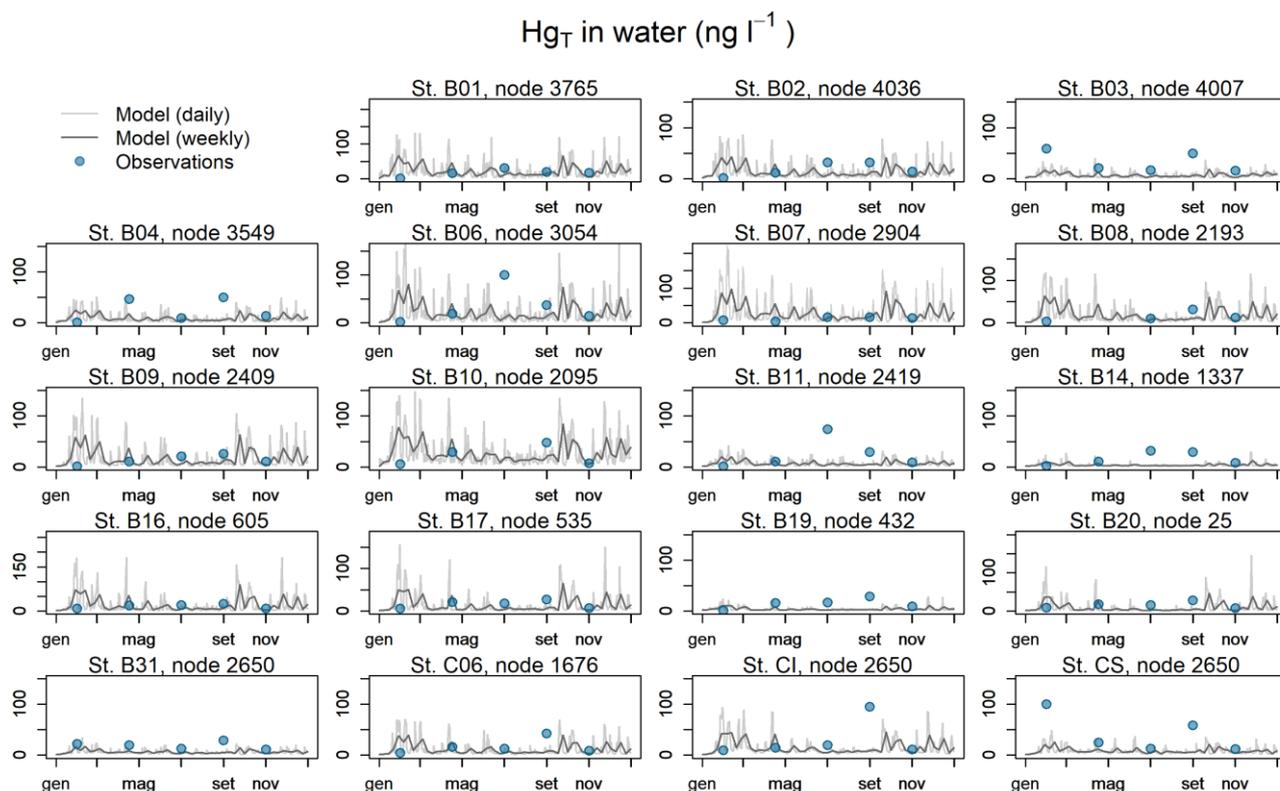


Figura 1. Andamento annuale del mercurio totale (Hg_T, ng/l) nelle acque della laguna di Venezia simulato con il modello a scala giornaliera (linea grigio chiaro) e settimanale (linea grigio scuro), confrontato con le concentrazioni misurate (punti verdi) nel 2005 in 18 stazioni lagunari durante il progetto Mela (MAV-CVN, 2005).

Tabella 1. Dati sperimentali (2001 - 2003) di Hg e MeHg nelle acque della laguna come presentati in letteratura (media ± SD) (Bloom et al., 2004) a confronto con la media e il massimo del modello, estrapolate per le stesse aree.

	Dati (acque non filtrate)		Modello Media / Max	
	Hg _T	MeHg	HgII	MeHg
	pM	pM	pM	pM
NORD zone umide	145 ± 43	1.03 ± 0.25	60 / 250	0.3 / 1.0
NORD acque aperte	74 ± 16	0.35 ± 0.07	30 / 150	0.1 / 0.3
Marghera Ai Pili	281 ± 113	0.56 ± 0.21	60 / 250	0.4 / 1.0
Canali Industriali	134 ± 29	0.46 ± 0.12	60 / 250	0.6 / 1.0
SUD zone interne	ND	ND	40 / 250	0.4 / 1.0
SUD acque aperte	15.7 ± 5.2	0.13 ± 0.08	10 / 120	0.2 / 0.5

Particulate Organic Matter (mg l^{-1})

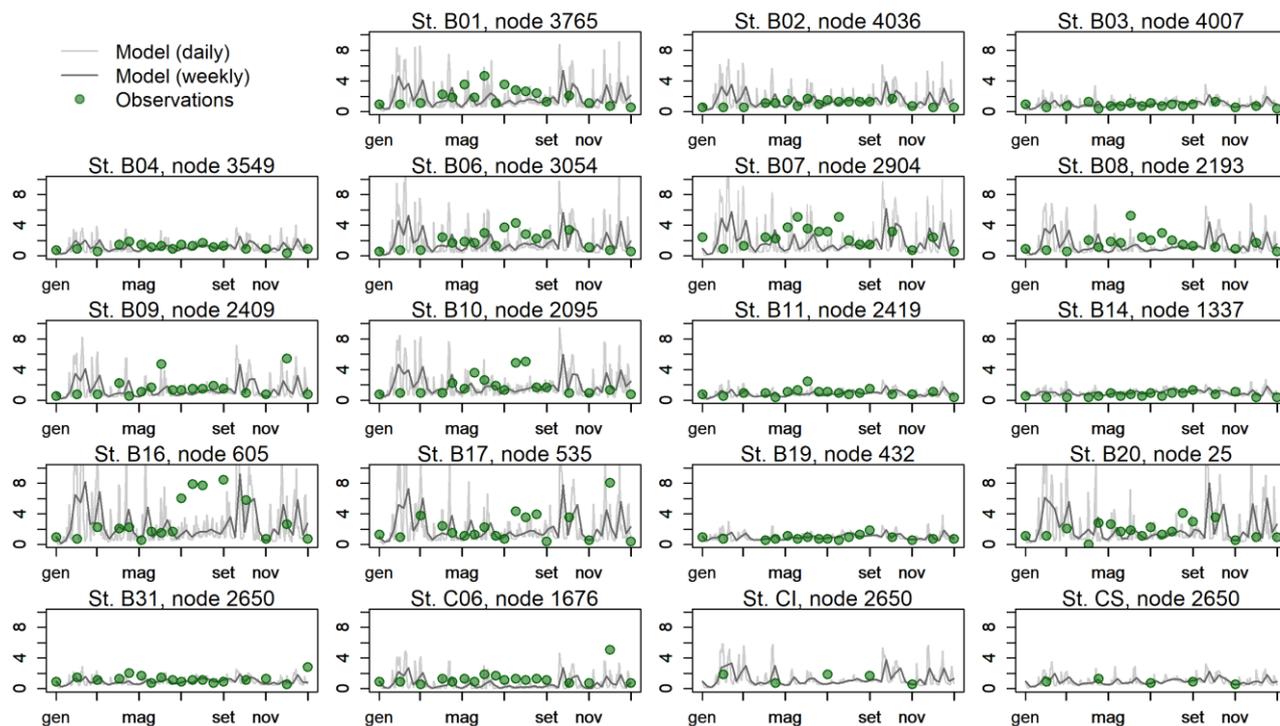


Figura 2. Andamento annuale del particolato organico in sospensione (POM, mg/l) nelle acque della laguna di Venezia simulato con il modello a scala giornaliera (linea grigio chiaro) e settimanale (linea grigio scuro), confrontato con le concentrazioni misurate (punti verdi) nel 2005 in 18 stazioni lagunari ogni 15 gg circa durante il progetto Mela (MAV-CVN, 2005).

Suspended Particulate Matter (mg l^{-1})

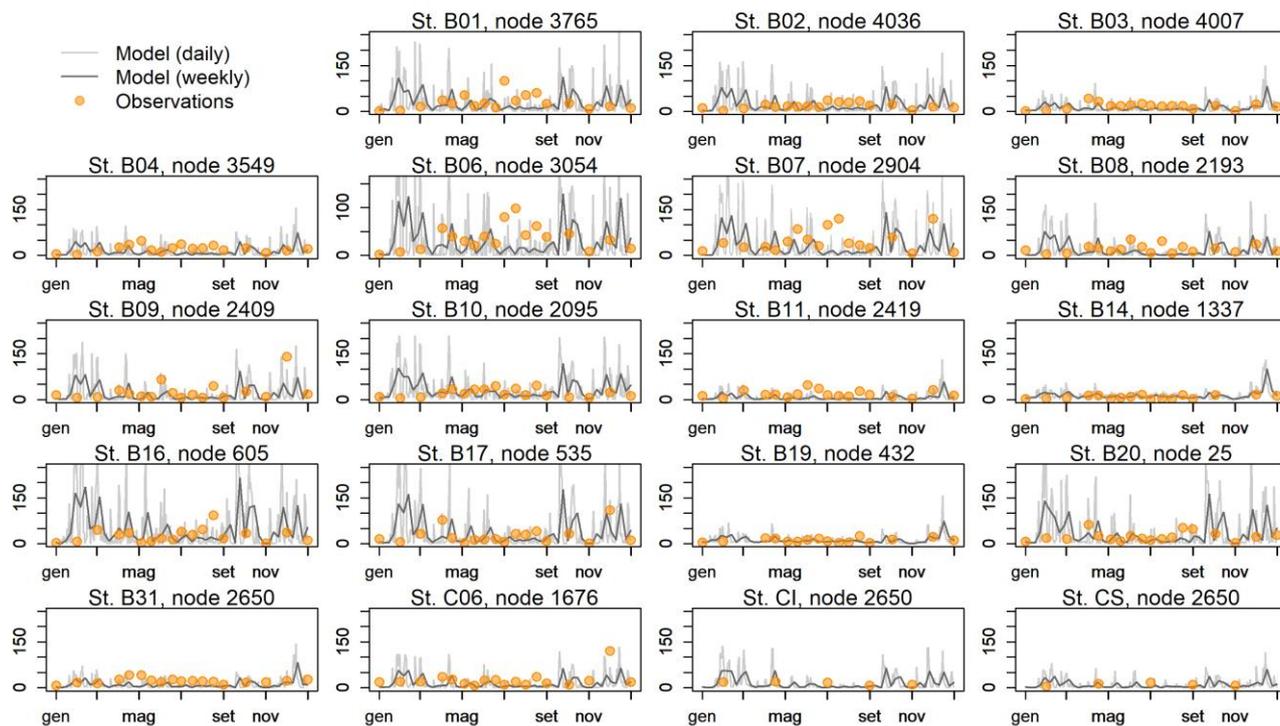


Figura 3. Andamento annuale del particolato totale in sospensione (SPM, mg/l) nelle acque della laguna di Venezia simulato con il modello a scala giornaliera (linea grigio chiaro) e settimanale (linea grigio scuro), confrontato con le concentrazioni misurate (punti verdi) nel 2005 in 18 stazioni lagunari ogni 15 gg circa durante il progetto Mela (MAV-CVN, 2005).

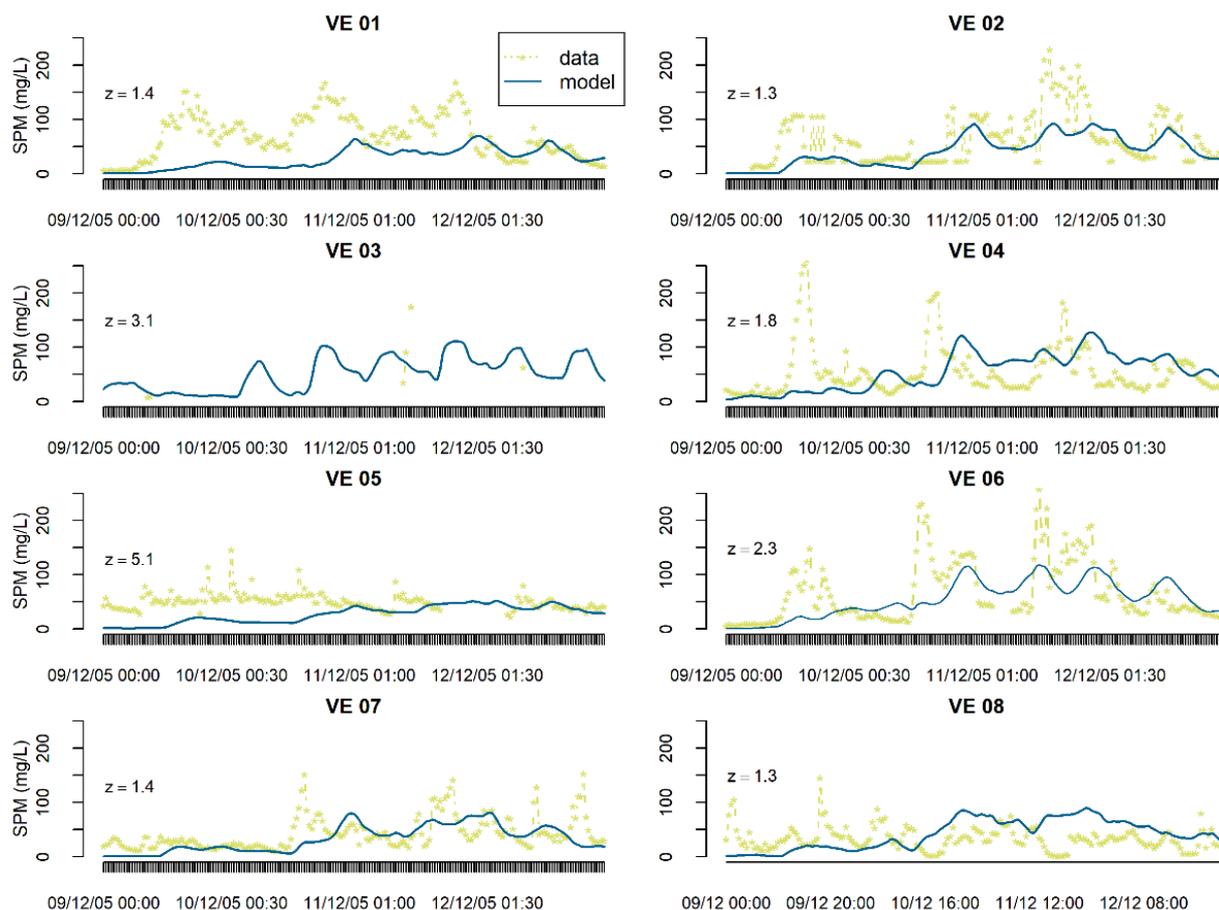


Figura 4. Confronto tra concentrazioni di solidi sospesi nelle acque (mg/l) modellizzate (linea blu) per il 9–12 dicembre 2005 durante un evento di bora e le osservazioni (punti gialli) acquisite con risoluzione temporale di 30 minuti (Carniello et al., 2012).

Referenze

Bloom, N.S., Moretto, L.M., Scopece, P., Ugo, P., 2004. Seasonal cycling of mercury and monomethyl mercury in the Venice Lagoon (Italy). *Mar. Chem.* 91, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.002>

Carniello, L., Defina, A., D’Alpaos, L., 2012. Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 102–103, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.03.016>

MAV-CVN, 2005. Attività di monitoraggio ambientale della laguna di Venezia. Esecutivo del II stralcio triennale (2002 - 2005) - Environmental monitoring in the Venice Lagoon. Triennial Report (2002 - 2005) (in italian).