

SCAMBI GASSOSI DI Hg TRA ATMOSFERA E SUPERFICI NATURALI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

DMG dipartimento
di matematica
e geoscienze

mercurilab
mercury research interdisciplinary laboratory

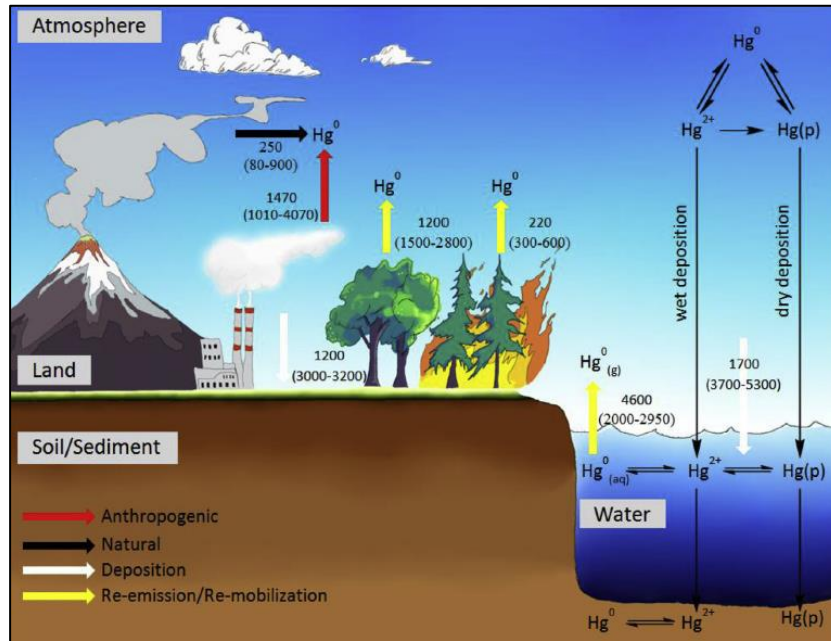


TREE
Lab

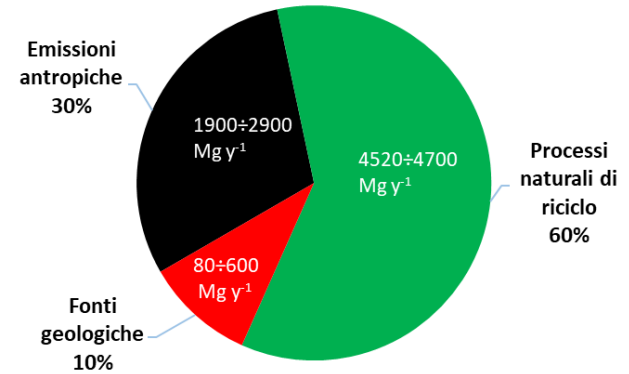
University of Trieste



Ciclo biogeochimico del mercurio



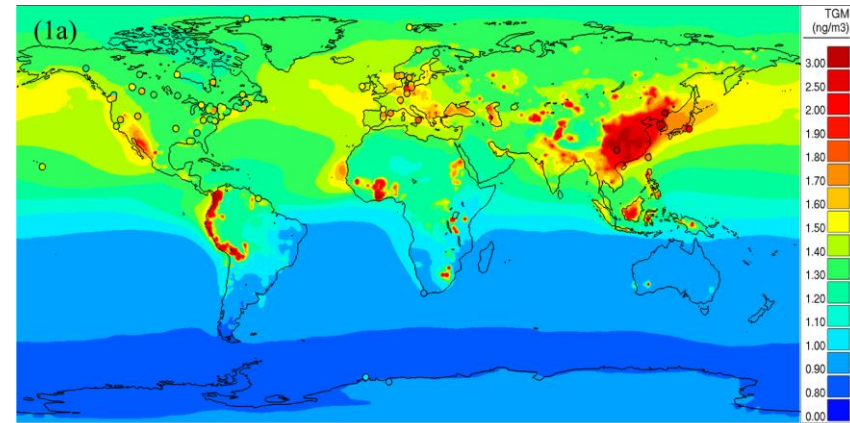
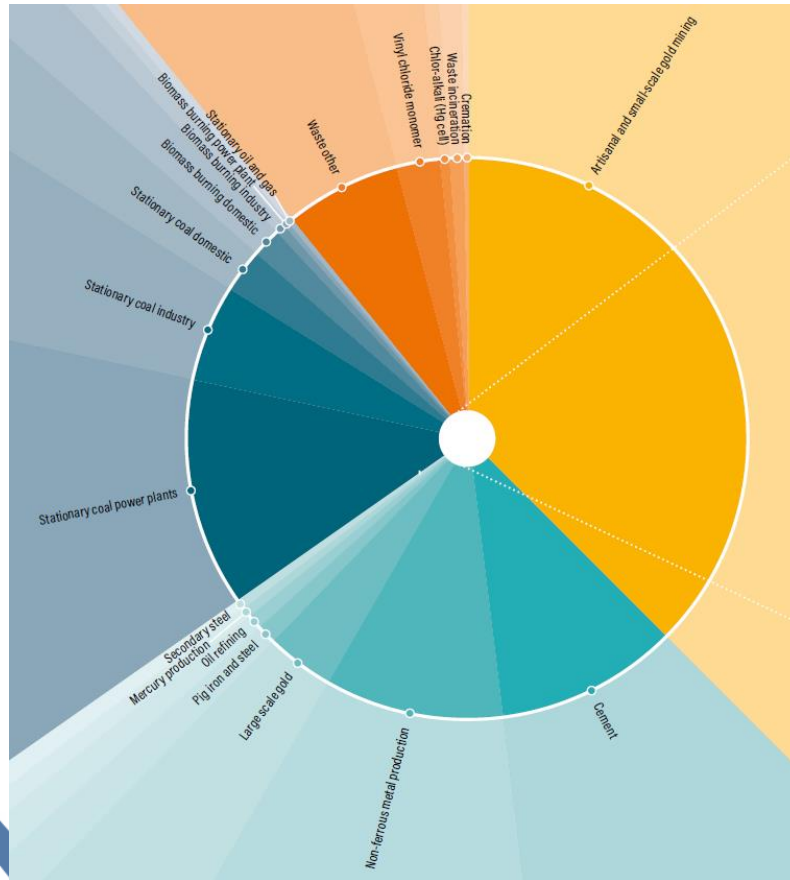
Gonzalez-Raymat et al., 2017, Env.Poll.



Fonti di emissione naturali:

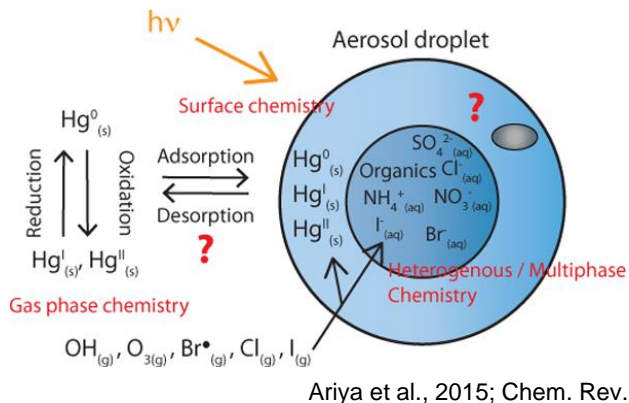
- **PRIMARIE:** mobilizzazione del Hg nelle riserve litosferiche;
- **SECONDARIE:** re-emissione del Hg precedentemente depositato (suoli, corpi idrici)

Fonti di emissione del Hg



Ariya et al., 2015

Il mercurio in atmosfera



- 3 diverse forme: Hg^0 (GEM: *Gaseous Elemental Mercury*, ~95% del totale), Hg^{2+} , Hg-p
- Background emisfero boreale = $1.5\text{-}1.7 \text{ ng m}^{-3}$ (Sprovieri et al., 2010)

GEM	RGM
Fonti naturali e antropiche	Fonti antropiche e ossidazione GEM
Alta tensione di vapore	Bassa tensione di vapore
Elevata persistenza (0,5÷2 y)	Adsorbimento sul particolato
<u>Trasporto a lunga distanza</u>	Deposizioni umide e secche

- Tra zone marine, rurali e urbane si osservano concentrazioni e pattern temporali (sia giornalieri che stagionali) diversi in funzione di numerosi fattori (es. radiazione solare, venti e rimescolamento atmosferico, distanza dalle sorgenti antropiche, composizione chimica dell'atmosfera, ...)

Monitoraggio Hg atmosferico

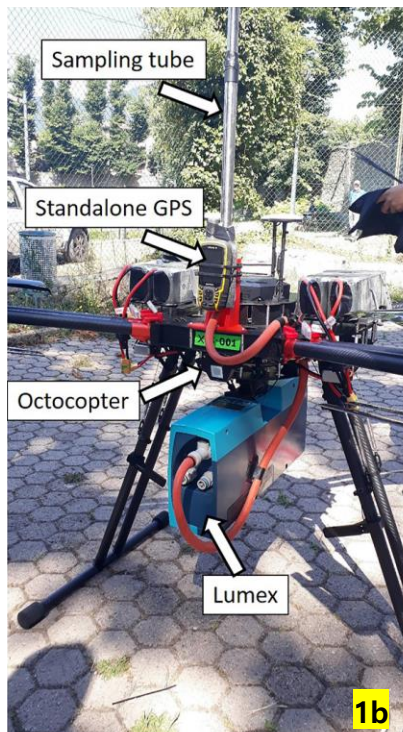
1. Aspirazione attiva del campione d'aria
 - a) Postazioni fisse
 - b) Strumentazione portatile
2. Campionatori passivi
3. Biomonitoraggio



TEKRAN 2537X (CV-AFS)



Ren et al., 2020



Cabassi et al., 2022



LUMEX RA915M (AAS)

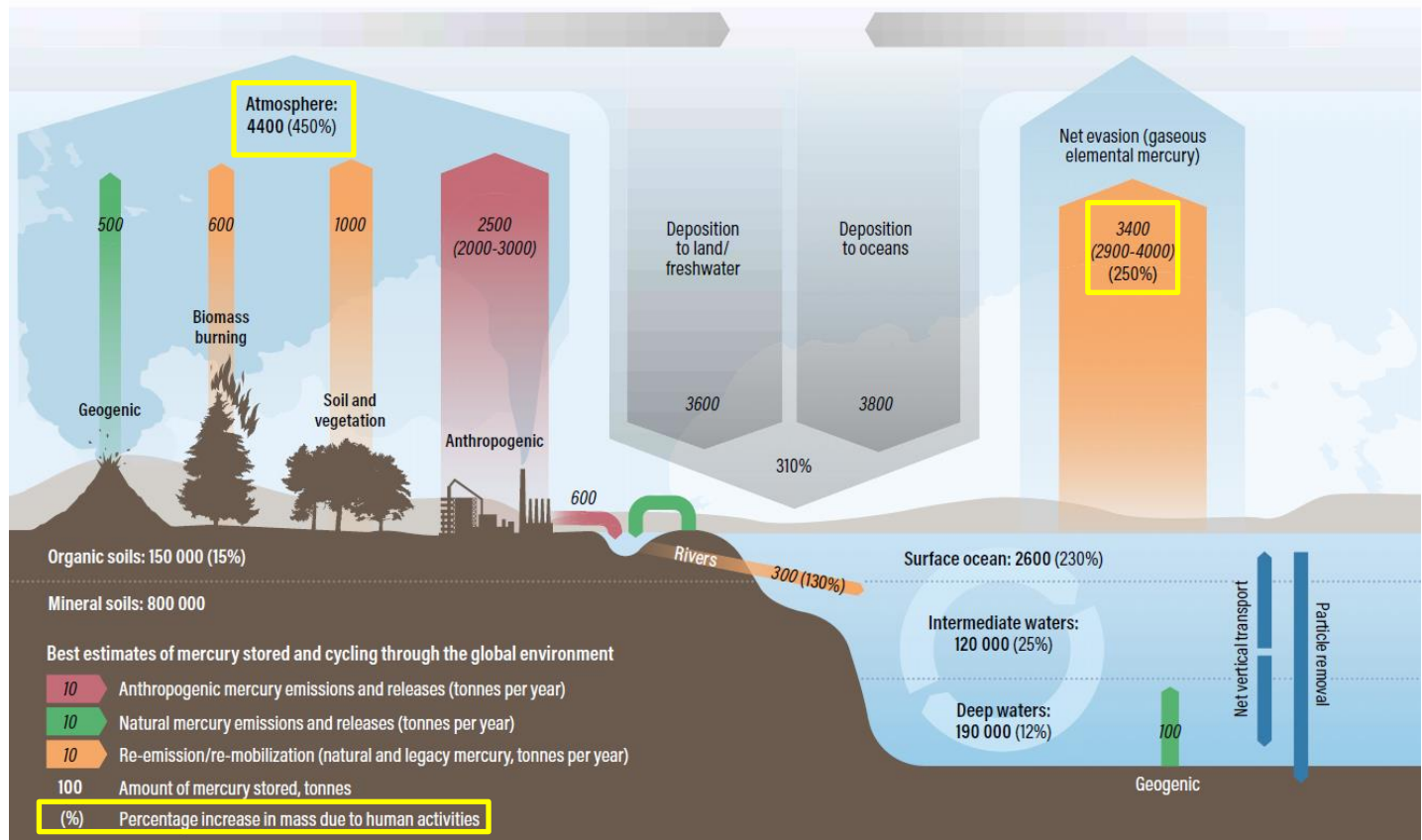


Xanthoria parietina



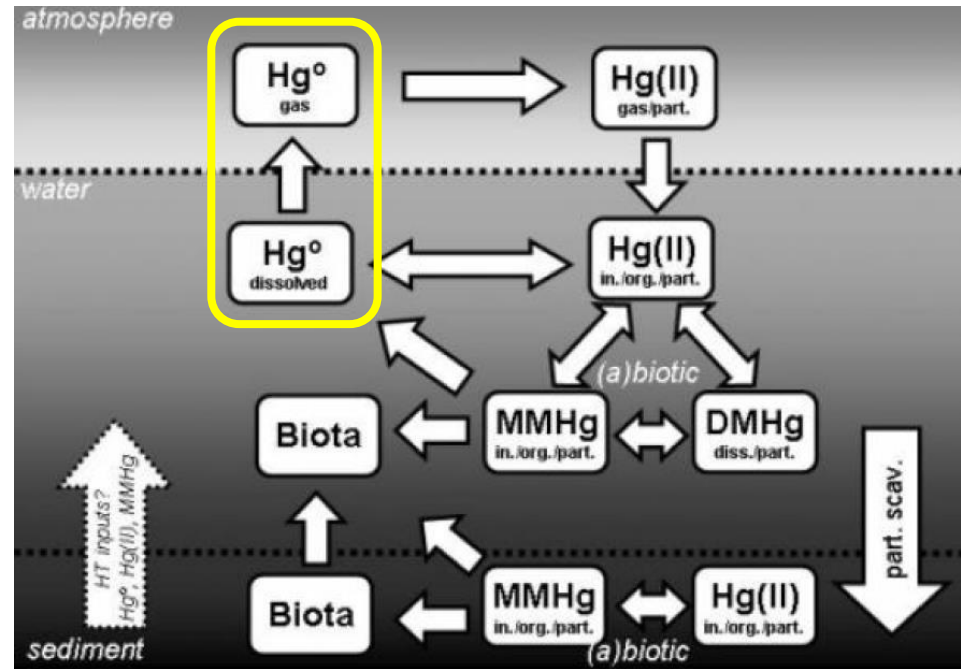
McLagan et al., 2016

Ciclo biogeoquímico del mercurio



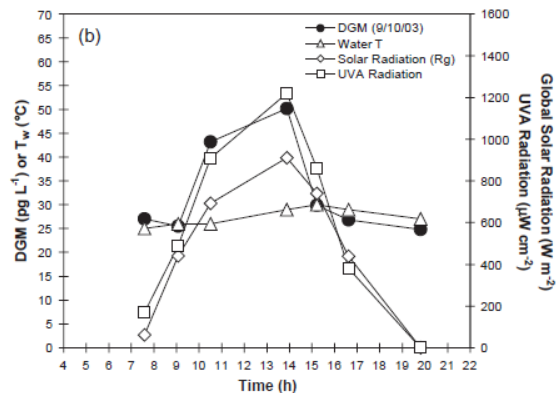
Il mercurio in ambiente marino

- Hg^{2+} specie chiave nel ciclo biogeochimico del Hg in acqua:
 - Complessazione e sedimentazione
 - Metilazione
 - **Riduzione a Hg^0**
- Sedimenti: sink e/o fonte secondaria
- Deposizioni atmosferiche (umide e secche) principale fonte di Hg in ambiente oceanico
- Apporti legati al trasporto fluviale, scarichi diretti o erosione importanti solo in aree costiere

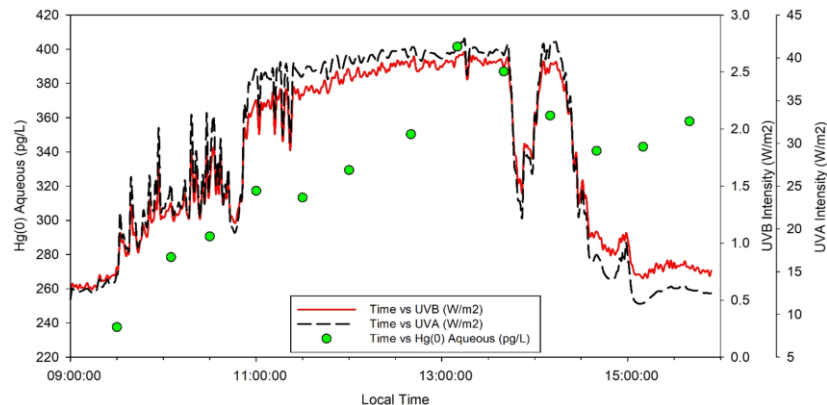


Flussi effusivi all'interfaccia acqua-aria

- Oceani responsabili di circa 1/3 emissioni GEM globali
- Potenziale via di detossificazione per l'ambiente acquatico (riduzione Hg^{2+} disponibile per la metilazione)
- Emissione in forma di Hg^0 volatile (in acqua indicato come DGM, *Dissolved Gaseous Mercury*) formato per via:
 - Fotochimica (irraggiamento UV, abbondanza e struttura materia organica disciolta)
 - Biotica (detossificazione, *dark reduction*, rilascio essudati riducenti)



Dill et al., 2006



O'Driscoll et al., 2019

Flussi effusivi all'interfaccia acqua-aria

- Flussi innescati quando le acque superficiali risultano soprassature in DGM rispetto all'atmosfera secondo l'equilibrio previsto dalla legge di Henry

$$SR = [DGM]_{aq} \frac{H}{[GEM]_{air}}$$

SR > 1 = EMISSIONE
SR < 1 = DEPOSIZIONE

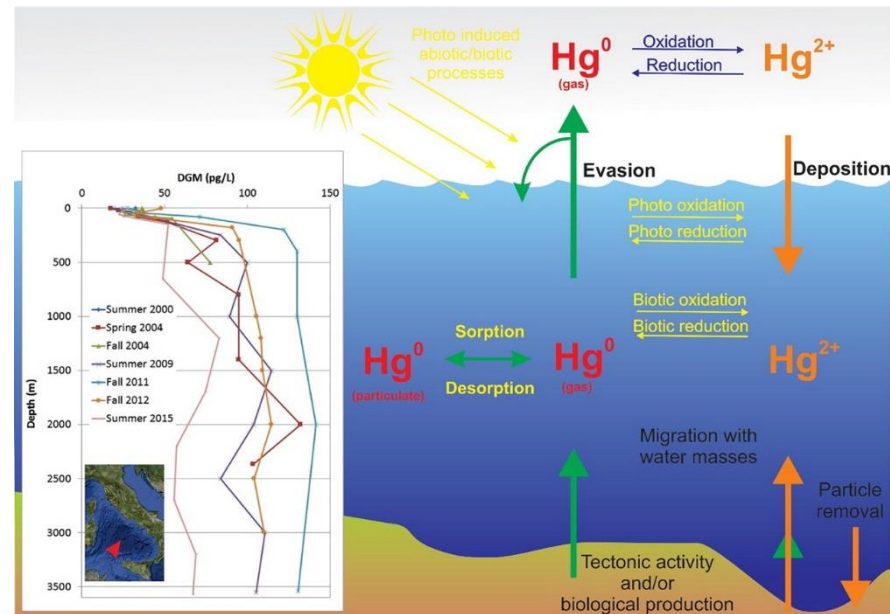
SR=saturation rate

[DGM]=concentrazione DGM in acqua

[GEM]=concentrazione GEM in aria

H=costante di Henry (0.33 a 298 K per il Hg)

- Svariati fattori influenti:
 - Concentrazioni di Hg in acqua e aria
 - Radiazione incidente, temperatura, salinità
 - Presenza di particolato e materia organica
 - Turbolenza (vento, correnti, onde, maree)

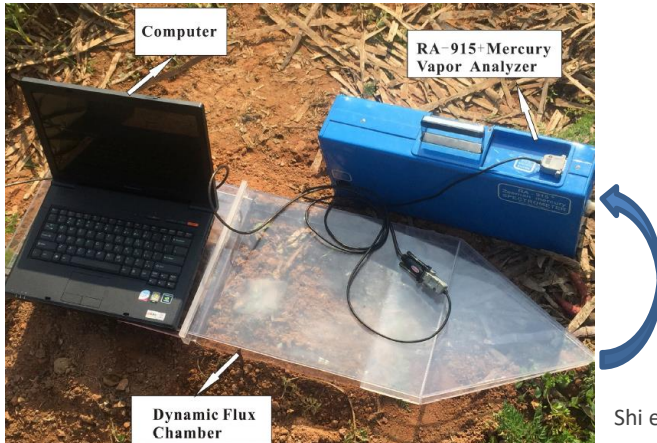


Kotnik et al., 2017

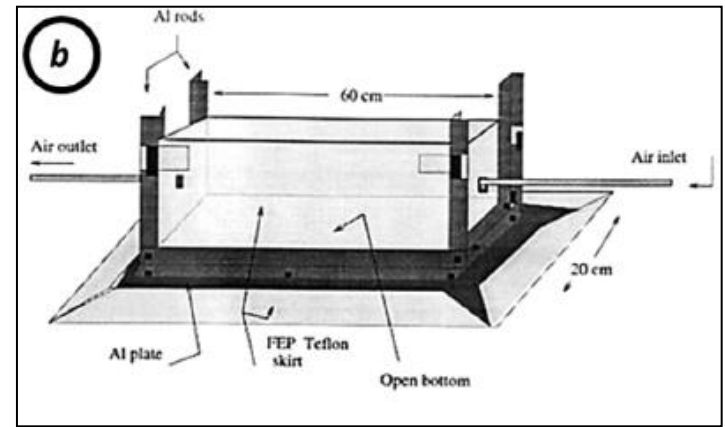
- Stima attraverso metodi diretti (camere di flusso) o indiretti (modelli micrometeorologici, eddy covariance, ...)

Camere di flusso

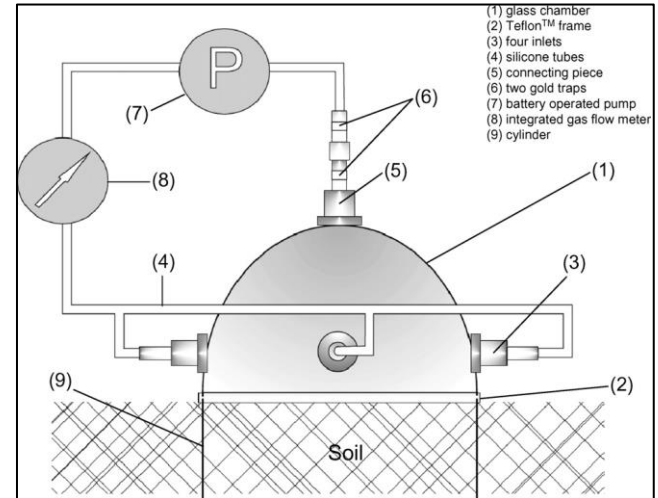
- Flussi stimati in base alla variazione delle concentrazioni di GEM all'interno di uno spazio confinato
- Parete trasparente (plexiglas, teflon, quarzo, ...)
- Accoppiate ad analizzatori in continuo di Hg gassoso
- Assenza di un protocollo standard → diverse forme e dimensioni in letteratura



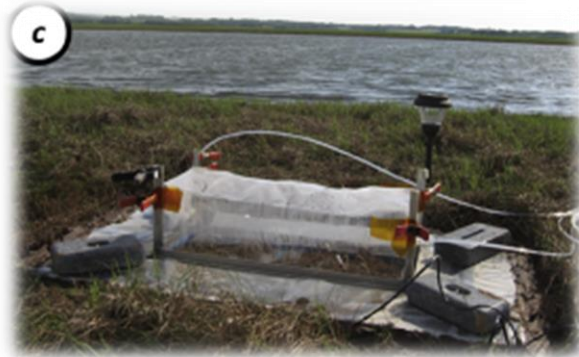
Shi et al., 2020



Sizmur et al., 2017



Rinklebe et al., 2009

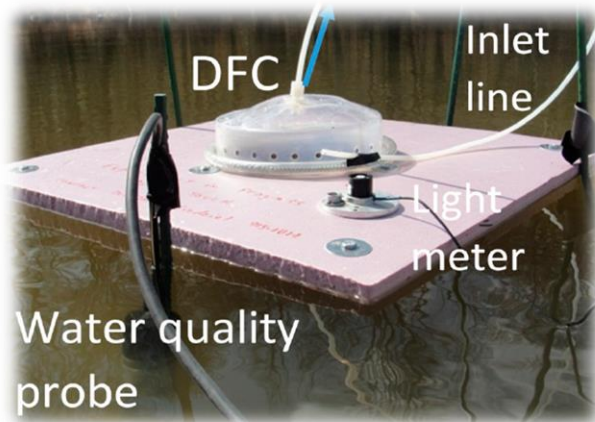


Sizmur et al., 2017

Canario et al., 2017



Bagnato et al., 2014

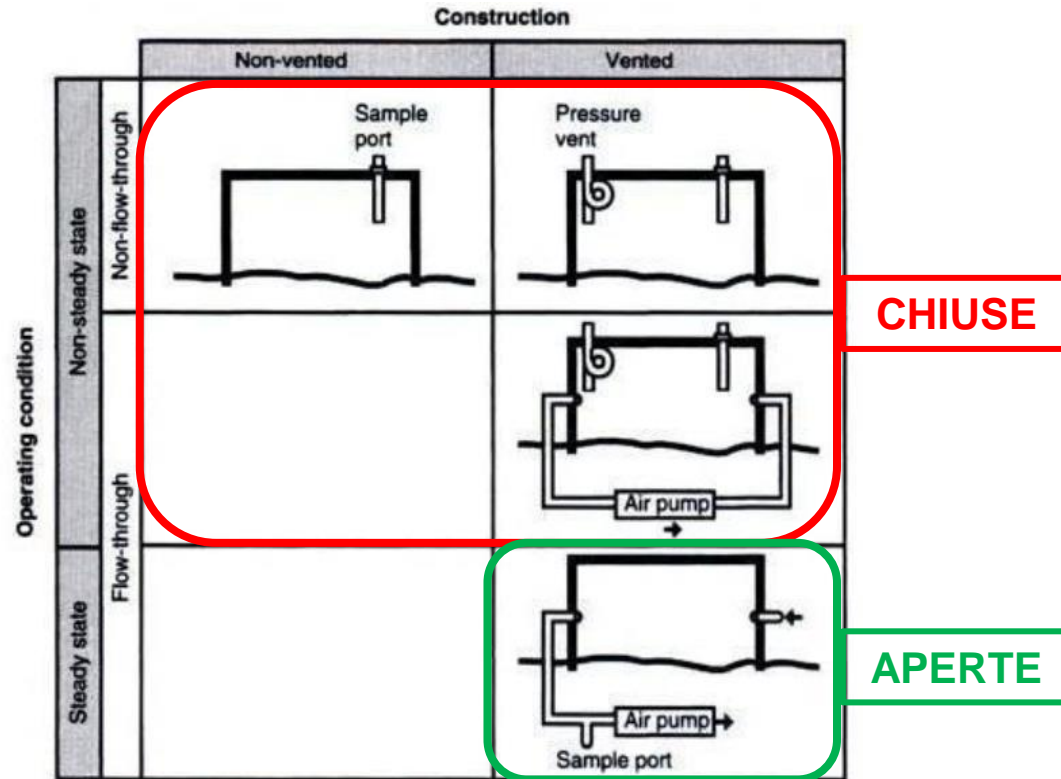


Cizdziel et al., 2019



Graydon et al., 2006

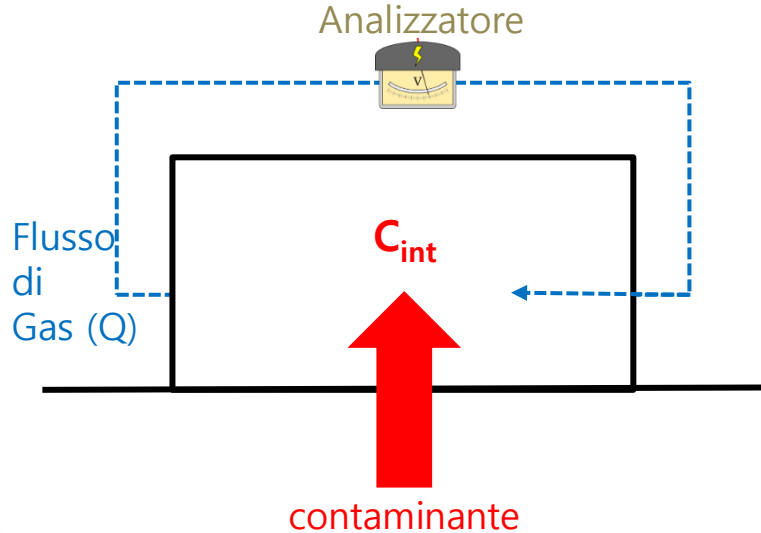
Camere di flusso



Camere di flusso

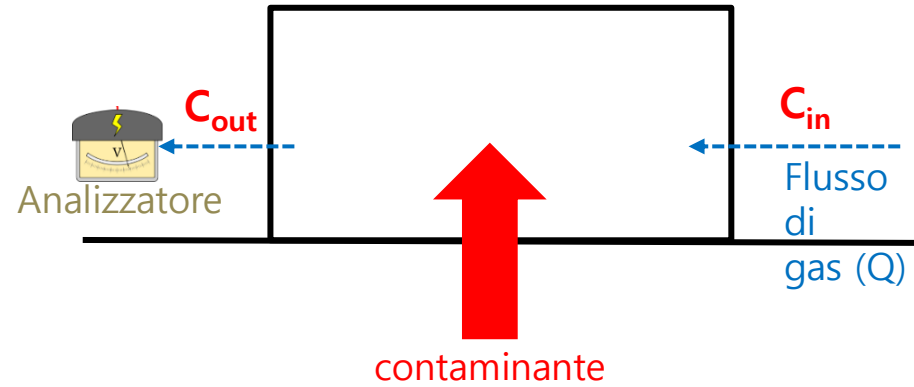
Schemi di funzionamento

CAMERA DI ACCUMULO



$$Flusso = \frac{dC_{int}}{dt} * \frac{V}{A}$$

CAMERA DI FLUSSO DINAMICA



$$Flusso = (C_{out} - C_{in}) * \frac{Q}{A}$$

Camere di flusso

Vantaggi

- Elevata sensibilità per le condizioni di sito
- Adatte per lo studio delle dinamiche alla base dei processi
- Semplice applicazione in contesti ambientali diversi
- Semplice utilizzo, versatilità, portabilità e costi contenuti

Svantaggi

- Mancanza di un protocollo standard di misura
- Alterazione delle condizioni micrometeorologiche interne (es. temperatura, vento)
- Ridotta impronta a terra
- Possibili bias nella stima dei flussi dati da:
 - Parametri della camera (*turnover time*, forma, dimensione)
 - Instaurarsi di flussi turbolenti all'interno

Caso studio:

Flussi di Hg gassoso all'interfaccia acqua-aria in ambienti costieri contaminati

Science of the Total Environment 668 (2019) 925–935



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Diurnal fluxes of gaseous elemental mercury from the water-air interface in coastal environments of the northern Adriatic Sea

Federico Floreani ^a, Alessandro Acquavita ^b, Elisa Petranich ^a, Stefano Covelli ^{a,c,*}



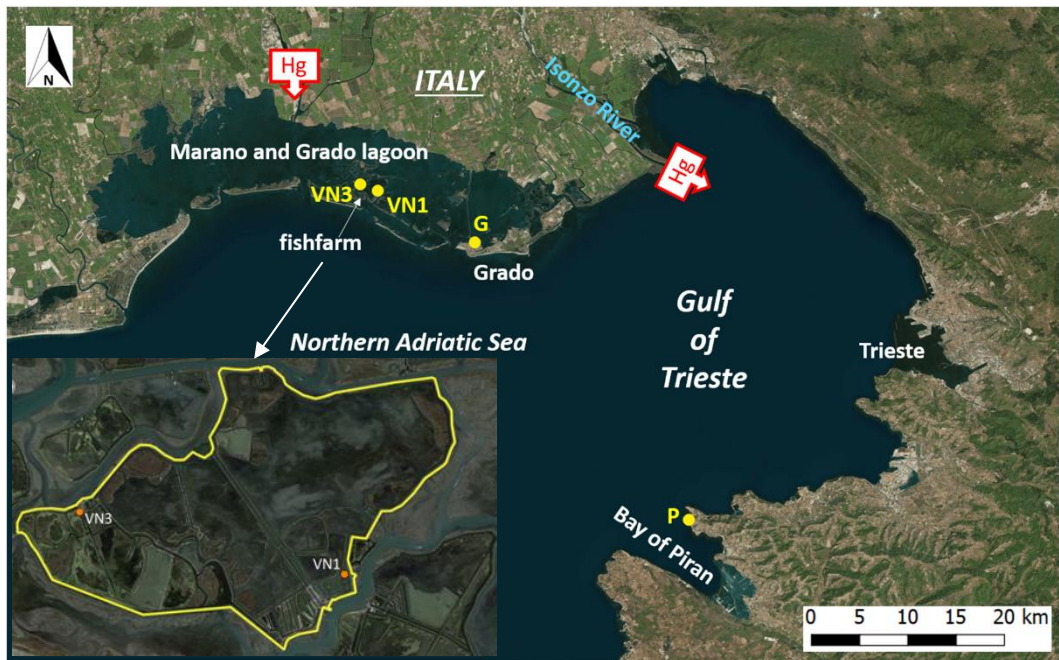
OBIETTIVI DELLO STUDIO

Determinazione dei flussi effusivi di GEM all'interfaccia acqua-aria in diversi siti di un'area costiera altamente contaminata (laguna di Grado):

- Individuazione dei principali fattori influenti
- Valutazione di un'eventuale variabilità stagionale
- Valutazione del possibile legame tra flussi e contaminazione di sedimenti e colonna d'acqua

1. Aree di studio

- **VN1 e VN3**: valle da pesca (Val Noghera)
- **G**: ambiente lagunare aperto
- **P**: zona meno contaminata del Golfo di Trieste



Floreani et al., 2019

- Val Noghera già caratterizzata:
 - Contaminazione da Hg del sedimento e mobilità verso colonna d'acqua (Petranich et al., 2018a)
 - Stato trofico (Petranich et al. 2018b)
- 3 campagne stagionali (estate-autunno-inverno)
- 5/6 misurazioni lungo il periodo diurno

Pirano



Grado



VN1



VN3



2. Materiali e metodi

Flussi effusivi Hg

- Camera di flusso flottante trasparente in Plexiglas® (Bagnato et al., 2013)
- Misura in continuo GEM all'interno della camera (AAS: Lumex RA915-M)
- Tempo di misura: 10-15 min

$$F = \frac{Q (C_f - C_i)}{A}$$

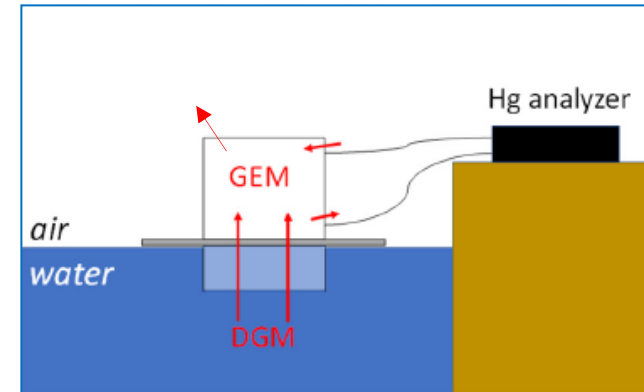
F=flusso Hg [$\text{ng m}^{-2} \text{h}^{-1}$]

Q=flusso di aspirazione dello strumento [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]

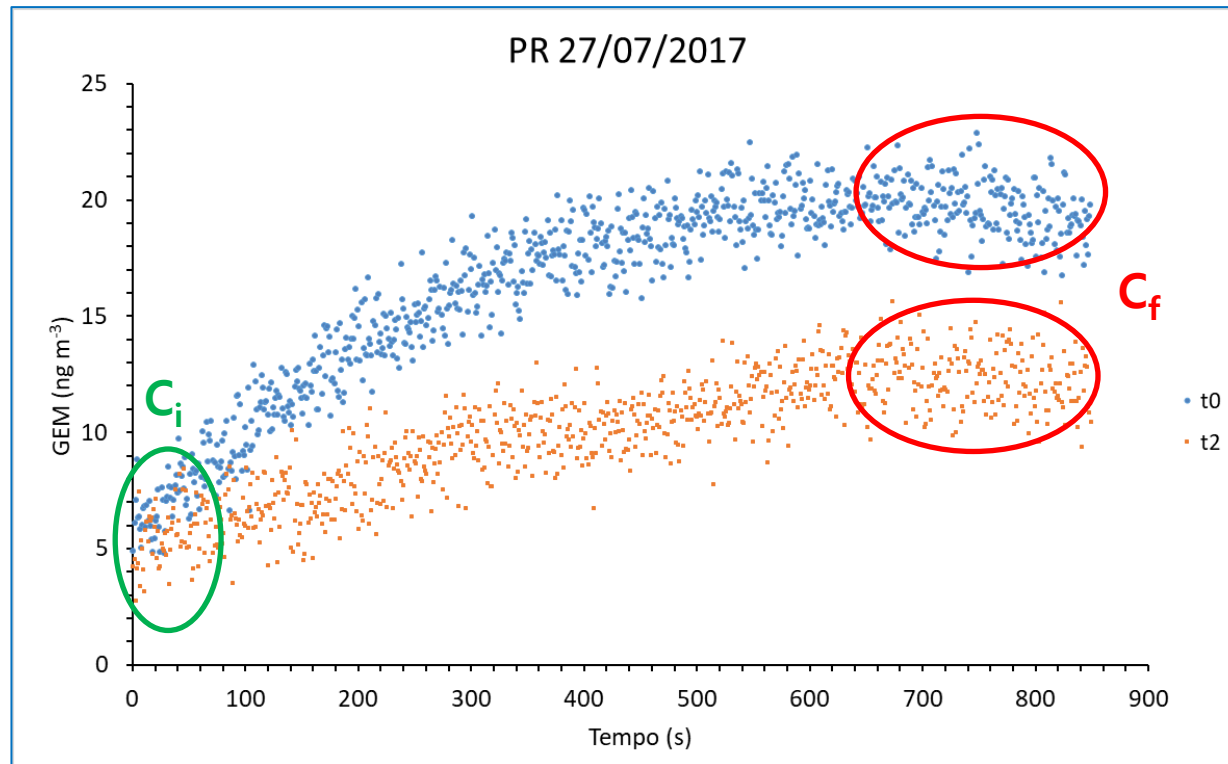
A=area di base della camera [m^2]

C_f =concentrazione GEM alla fine dell'esperimento (outlet)

C_i =concentrazione GEM all'inizio dell'esperimento (inlet)

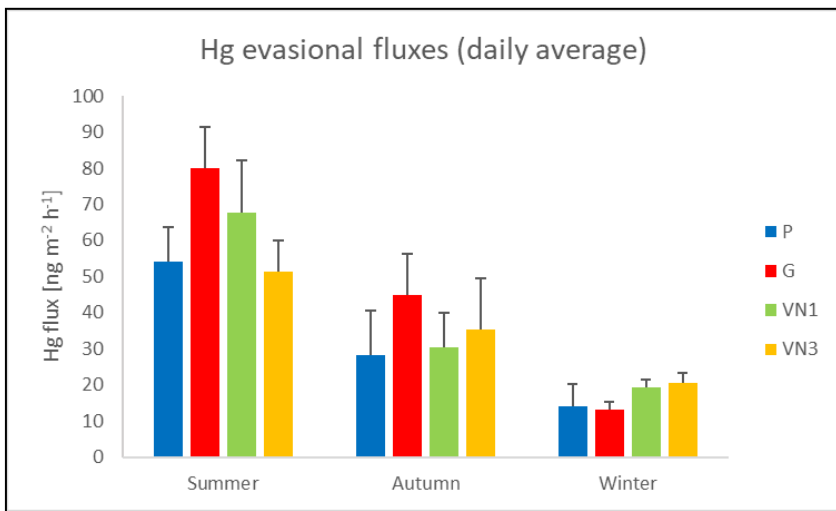


Concentrazioni di GEM all'interno della camera



3. Risultati

3.1 Flussi effusivi medi di GEM

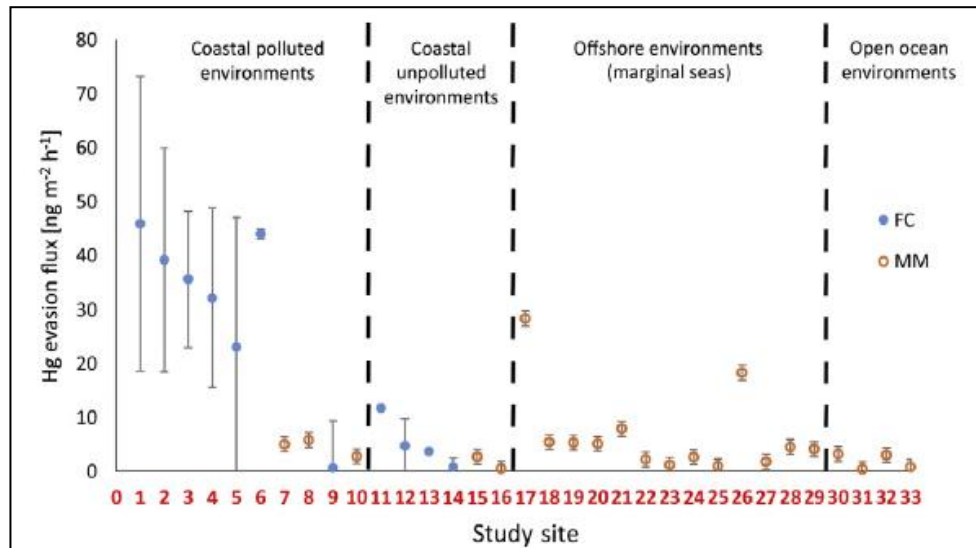
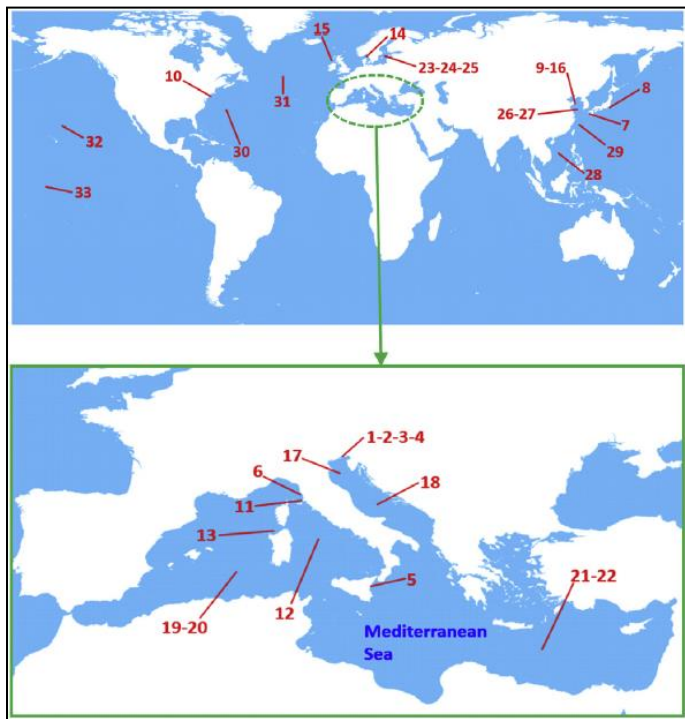


Sito	Range min-max DHg (ng L ⁻¹)	Range min-max flussi (ng m ⁻² h ⁻¹)
Pirano (P)	< 0.63 – 5.47	6.03 – 68.0
Grado (G)	1.06 – 26.5	11.4 – 97.4
VN1	3.45 – 71.5	15.9 – 86.8
VN3	0.85 – 44.5	16.4 – 64.0

- Evidente variabilità stagionale:
 - Effetti della radiazione
 - Solubilità del DGM
 - Attività microbica
- Flussi paragonabili tra i vari siti nonostante le diverse concentrazioni di Hg totale disciolto
- Valori relativamente elevati
 - Ambiente costiero
 - Contaminazione

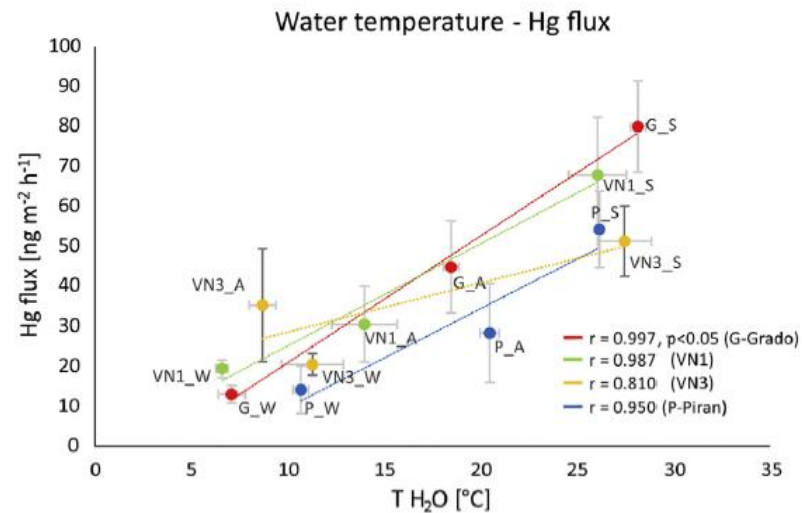
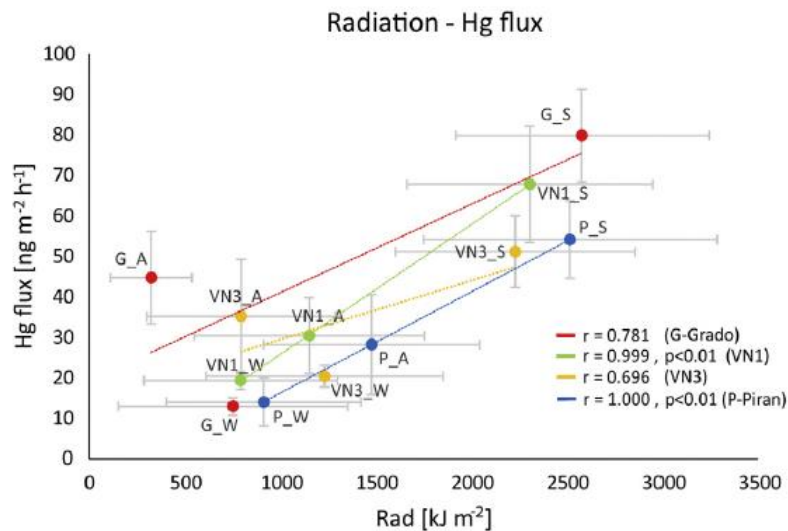
3. Risultati

3.1 Flussi effusivi medi di GEM



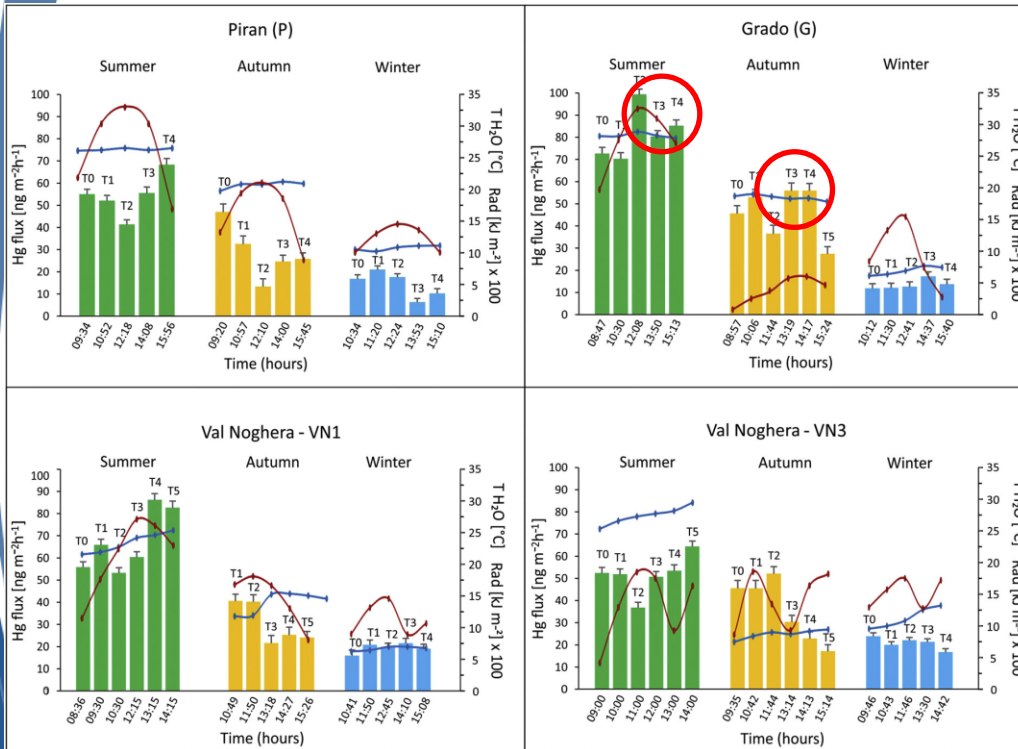
3. Risultati

3.2 Correlazione flussi GEM – radiazione e temperatura



3. Risultati

3.3 Variazione giornaliera flussi GEM



- Assenza di un trend diurno comune
- Scarsa corrispondenza con gli andamenti di radiazione e temperatura dell'acqua
- Elevata sito-specificità:
 - Esaurimento pool DGM disponibile ad evasione (P, VN1, VN3)
 - Possibile influenza condizioni idrodinamiche colonna d'acqua (P: vento; G: flusso tidale)
 - Evasione limitata da torbidità (VN1 e VN3)

Estensione: Flussi di Hg gassoso durante le 24 ore

Environmental Pollution 332 (2023) 121926

Contents lists available at [ScienceDirect](#)


ELSEVIER


Environmental Pollution

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envpol



Dissolved gaseous mercury production and sea-air gaseous exchange in impacted coastal environments of the northern Adriatic Sea[☆]

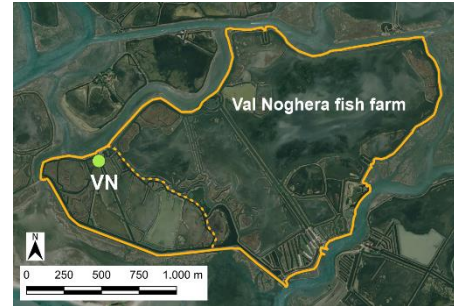
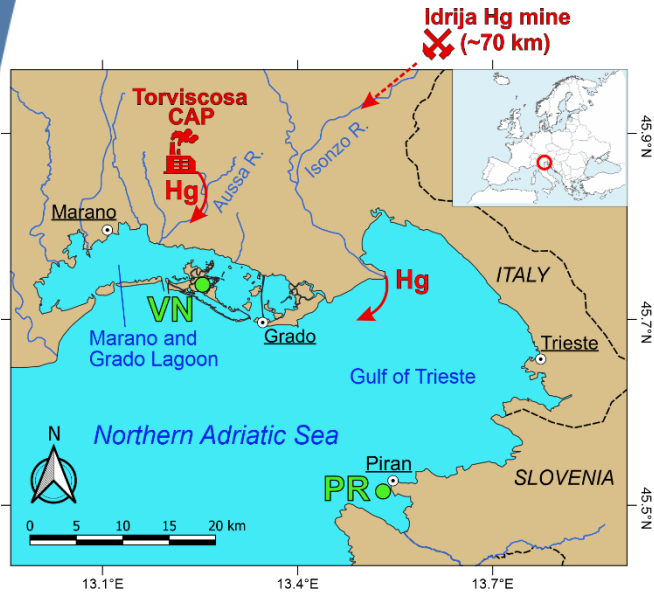
Federico Floreani^{a,b,*}, Nicolò Barago^a, Katja Klun^c, Jadran Faganeli^c, Stefano Covelli^a



OBIETTIVI DELLO STUDIO

- Indagare le dinamiche alla base dei flussi di GEM all'interfaccia acqua-aria durante l'intero arco delle 24h in due ambienti (VN3 e P) caratterizzati da condizioni estremamente diverse in termini di:
 - Grado di contaminazione
 - Idrodinamicità
- Valutare l'eventuale contributo complessivo dell'evasione di GEM nel ridurre la disponibilità di Hg in colonna d'acqua

Aree di studio



- Monitoraggio nelle stagioni più favorevoli per il rilascio di GEM (estate, autunno e primavera)

Materiali e metodi

Determinazione del DGM

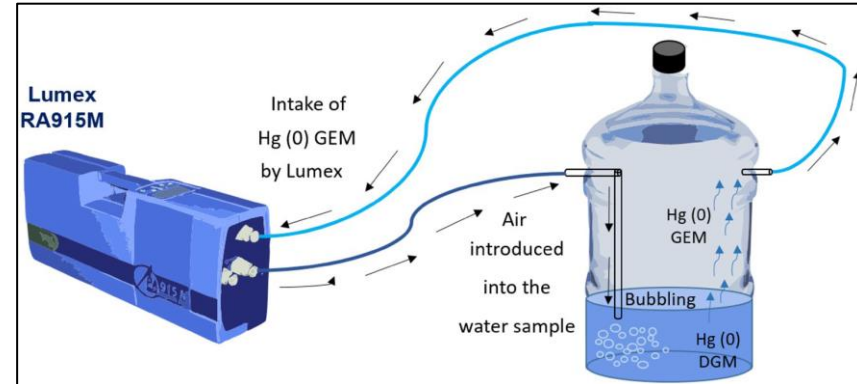
- Campione d'acqua sottoposto a *bubbling* con un flusso costante di gas in un sistema chiuso
- GEM «estratto» convogliato all'analizzatore Lumex

$$[DGM] = \frac{[GEM]_{eq}}{H}$$

[DGM]=conc. Hg gassoso in acqua

[GEM]_{eq}=conc. Hg gassoso nello spazio di testa all'equilibrio

H=costante di Henry del Hg alla temperatura dell'esperimento

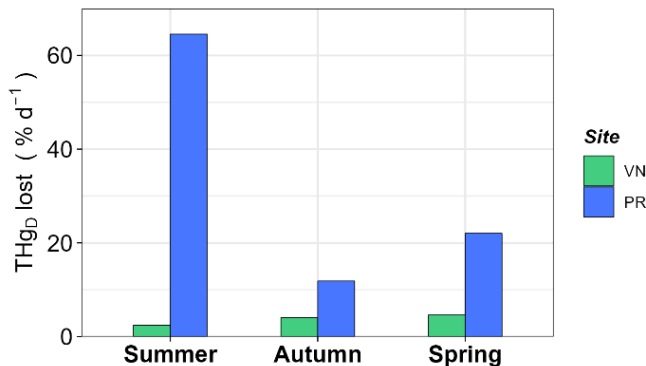


Principali risultati

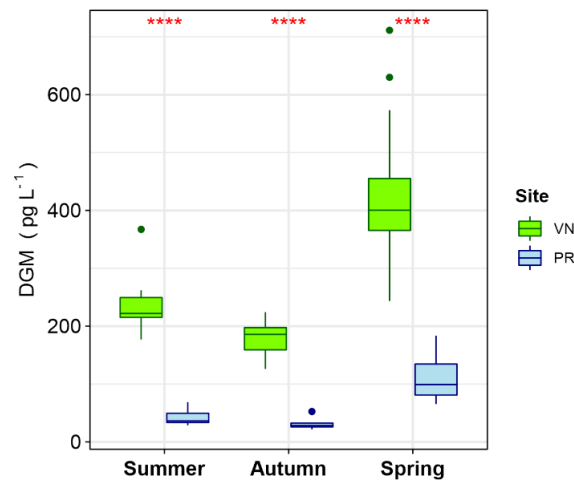
DGM e flussi

- Flussi paragonabili nonostante il diverso livello di contaminazione
- In valle da pesca:
 - Rilevante produzione di DGM (anche di notte, biotica?) ma esigua percentuale totale disciolto (< 5%)
 - Hg perso per volatilizzazione è un'esigua percentuale del totale presente in acqua

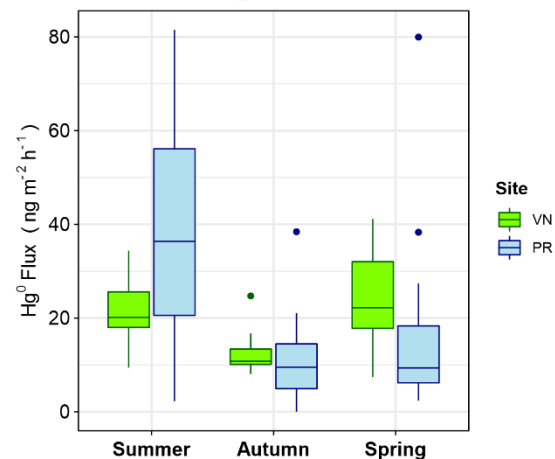
Dissolved Hg lost through volatilisation



DGM concentrations



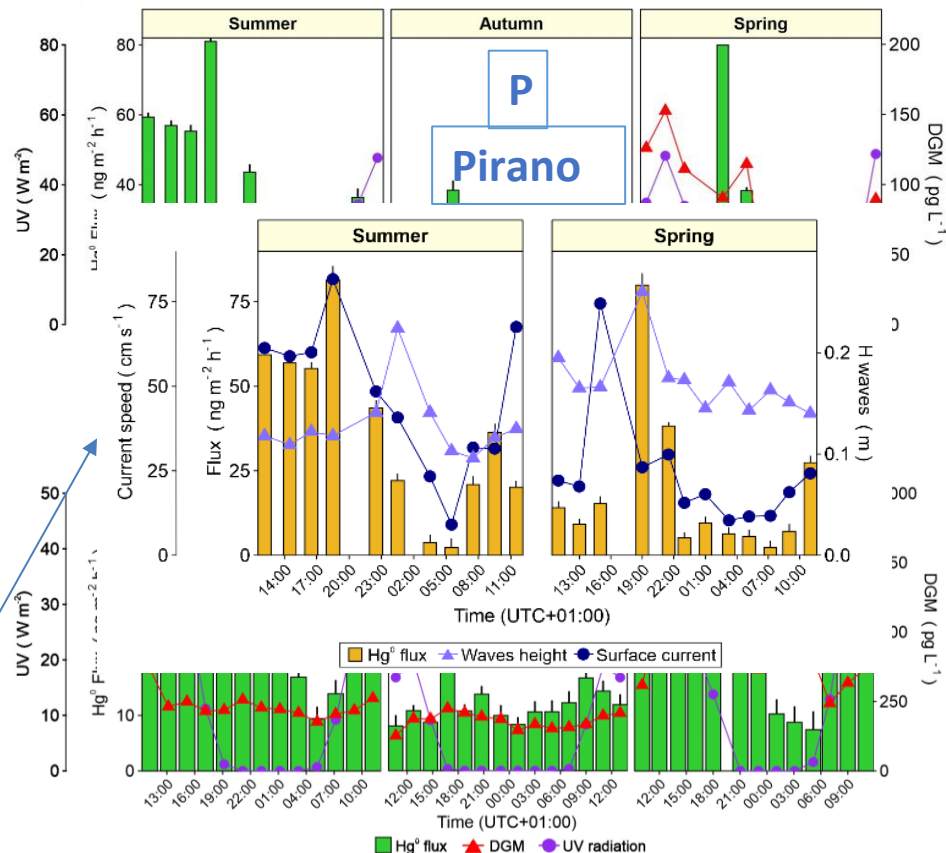
Hg⁰ Fluxes



Principali risultati

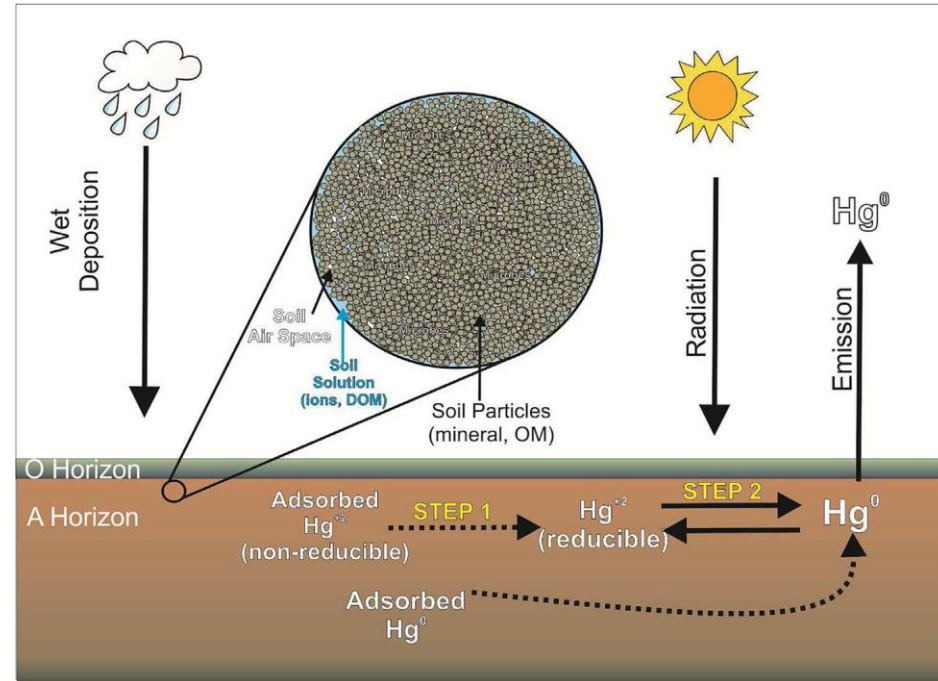
DGM e flussi

- Presenza di un *lag* tra radiazione e DGM
- DGM e flussi relativamente costanti di notte in Val Noghera
- Forte influenza condizioni idrodinamiche
 - VN: scarsa dinamicità limita scambi gassosi
 - P: picchi di emissione corrispondenti a maggior turbolenza



Il mercurio in ambiente terrestre

- Presente in diverse forme (Hg-OM , HgS , Hg^0 , ...) che influenzano la mobilità
- In zone incontaminate il Hg deriva principalmente da deposizioni atmosferiche
- Rapida immobilizzazione (complessazione, adsorbimento sulle superfici)
- Emissione secondaria in forma gassosa (Hg^0) dopo desorbimento in funzione di vari fattori
 - Radiazione incidente
 - Temperatura aria e suolo
 - Concentrazioni Hg atmosferico
 - Grado di copertura e disturbo del suolo
 - Abbondanza e struttura materia organica



Caso studio:

Flussi di Hg gassoso da suoli contaminati

Environmental Pollution 318 (2023) 120921

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

 **ELSEVIER**

Environmental Pollution

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envpol





Gaseous mercury evasion from bare and grass-covered soils contaminated by mining and ore roasting (Isonzo River alluvial plain, Northeastern Italy)[☆]

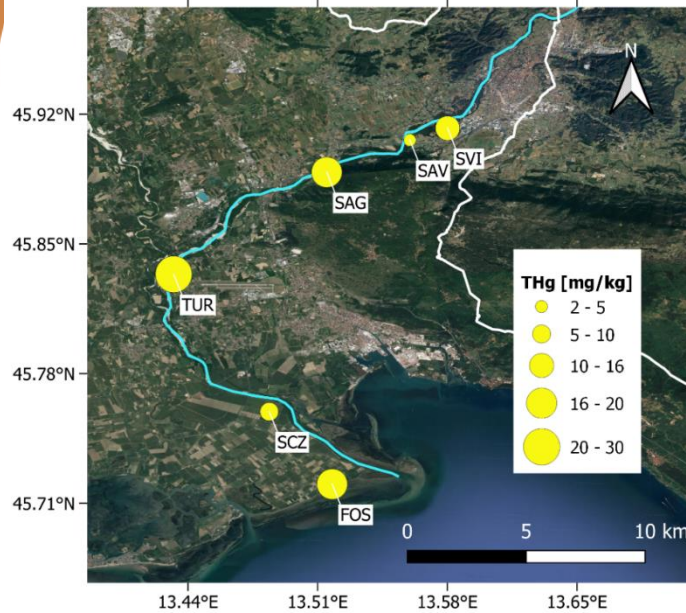
Federico Floreani ^{a,b,*}, Valeria Zappella ^a, Jadran Faganeli ^c, Stefano Covelli ^a

OBIETTIVI DELLO STUDIO

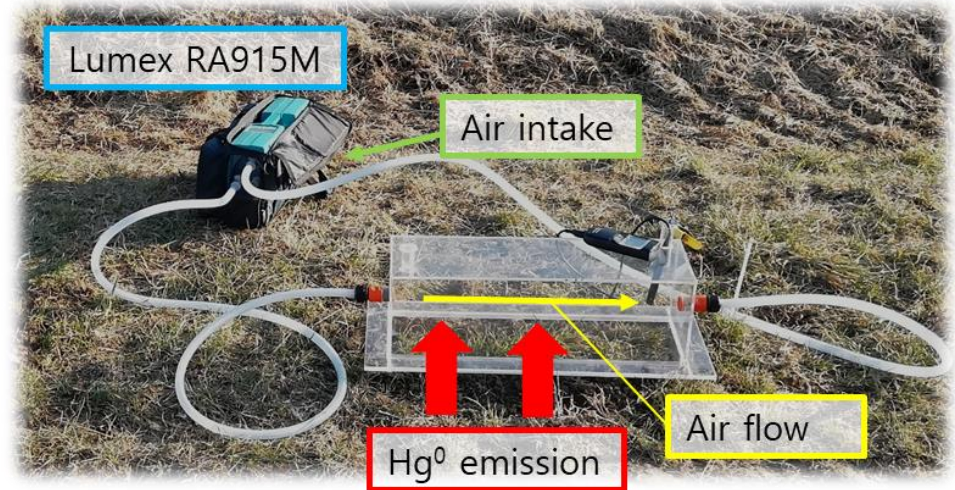
- Indagare la possibile ri-emissione di Hg gassoso da suoli contaminati da Hg nella pianura isontina valutando:
 - Variabilità stagionale (estate, autunno, inverno)
 - Variabilità diurna (in funzione soprattutto di radiazione incidente e temperatura)
 - Influenza della presenza o assenza di copertura erbacea

Introduzione

Flussi Hg suolo-aria pianura isontina

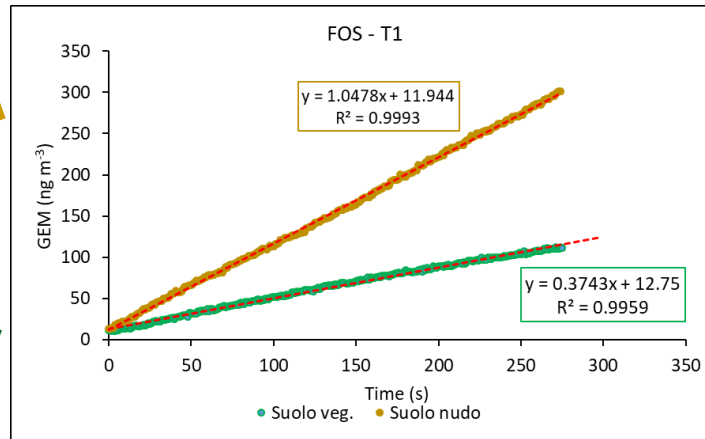


- Misure ad intervalli di tempo regolari lungo il periodo diurno (circa 1h) sia su suolo nudo che coperto da vegetazione erbacea
- THg nei suolo = 2-25 mg/kg (> 70% α -HgS: contaminazione di origine mineraria)



Metodi

Stima flussi di Hg gassoso interfaccia suolo-aria



$$F = \frac{V}{A} * \frac{\delta C}{\delta t}$$

F = flusso (ng m⁻² h⁻¹)

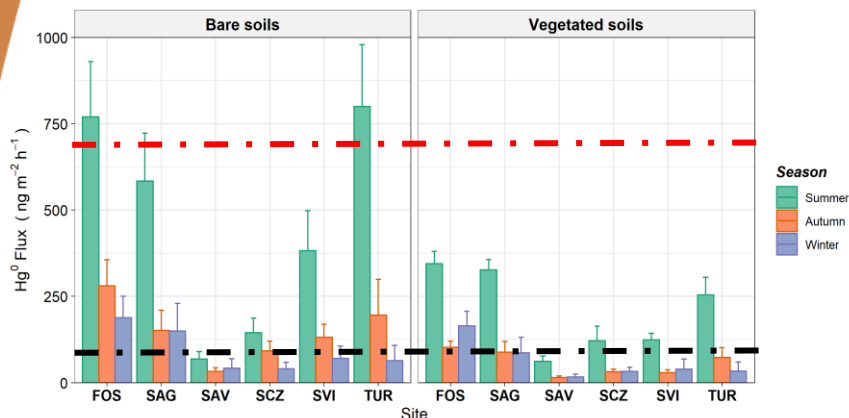
V = volume (m³)

A = area di base (m²)

$\delta C / \delta t$ = variazione
concentrazione GEM
nella camera (ng m⁻³ s⁻¹)

Risultati

Flussi medi Hg gassoso all'interfaccia suolo-aria

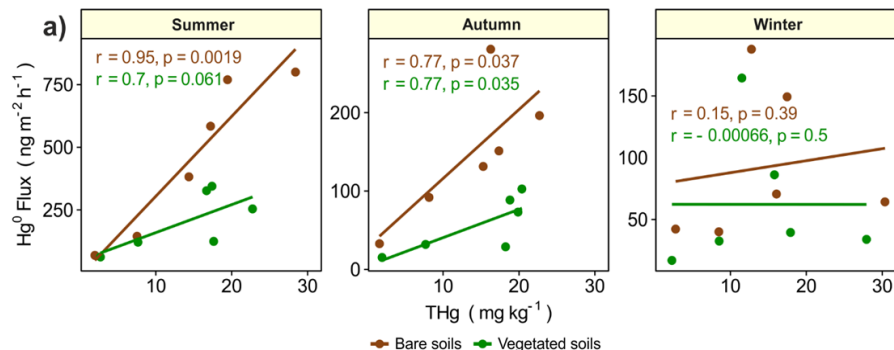


--- Media globale siti minerari¹

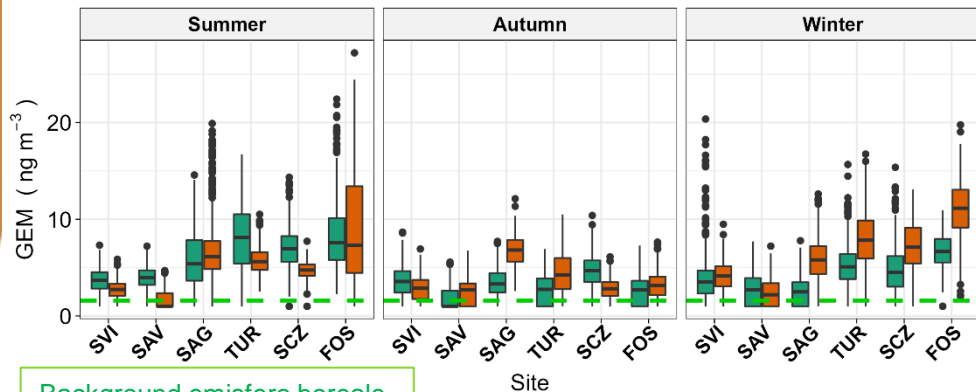
- - - Media globale siti naturalmente arricchiti¹

	Flux min (ng m ⁻² h ⁻¹)	Flux max (ng m ⁻² h ⁻¹)
Suoli nudi	32.8±10.1	800.2±178.8
Suoli vegetati	15.2±4.5	344.6±36.2

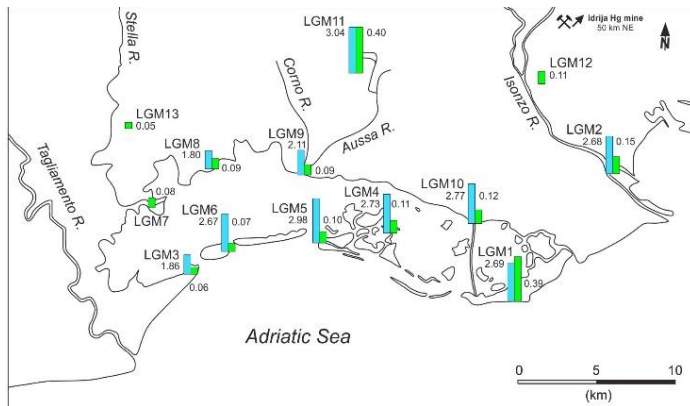
- Flussi da suolo nudo significativamente più elevati che da suolo vegetato
- Emissione massima in estate (irraggiamento, alte temperature)
- Buona correlazione Hg totale – flussi in estate e autunno, soprattutto per i suoli privi di vegetazione



MERCURIO GASSOSO IN ATMOSFERA



Background emisfero boreale
1.5 ÷ 1.8 ng m⁻³

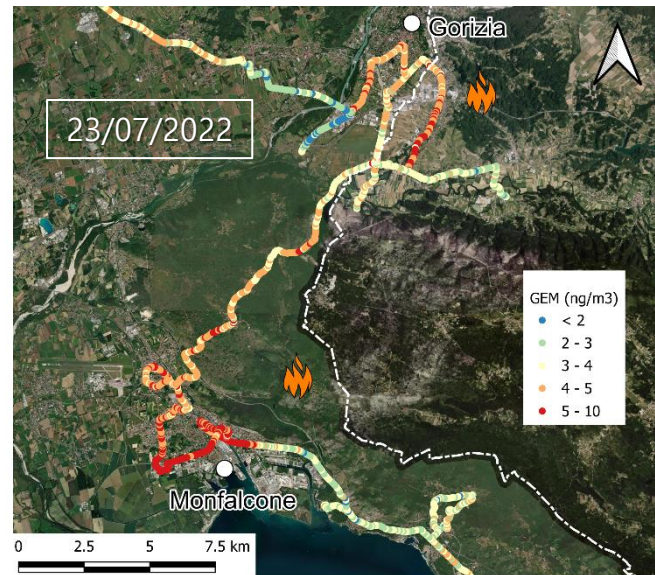


Gaseous elemental mercury (GEM ng m⁻³)
Hg in lichens (mg Kg⁻¹)

Floreani et al., 2020, Atmosphere

Hg (µg g⁻¹)

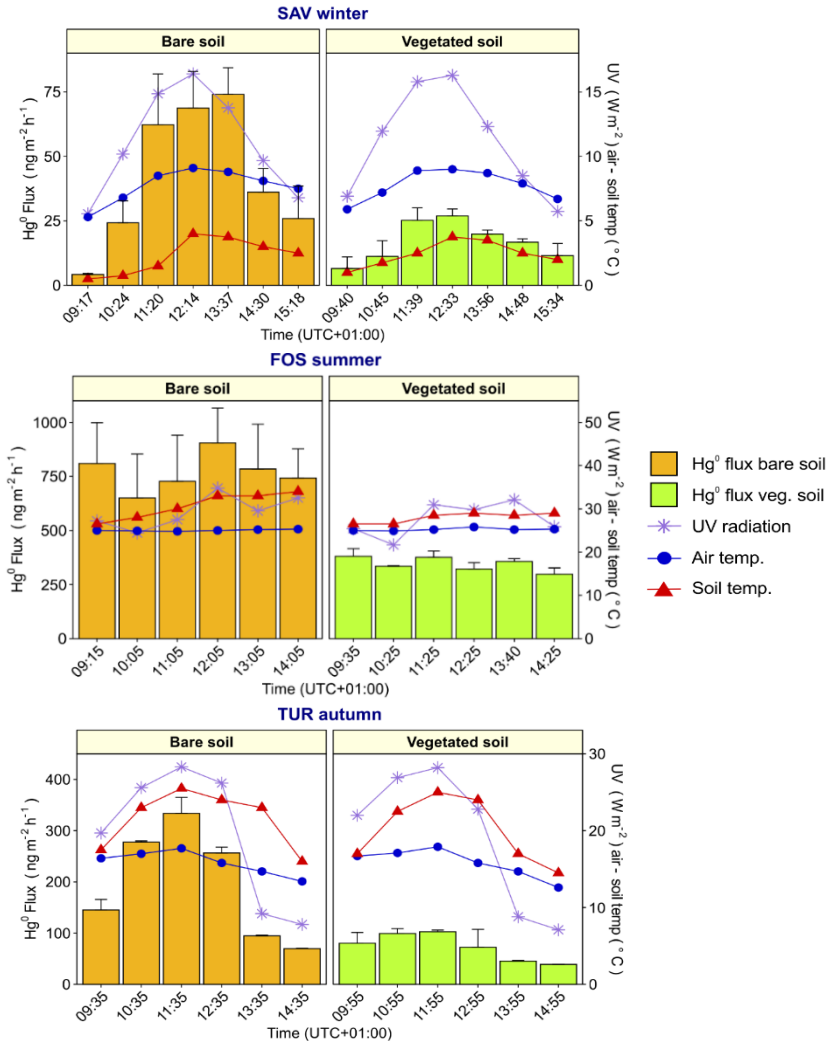
- Soglia di attenzione per la salute umana = 1000 ng m⁻³ (WHO, 2000)
- Scarsa differenza tra i valori osservati nelle diverse stagioni
- Rapida diluizione in atmosfera



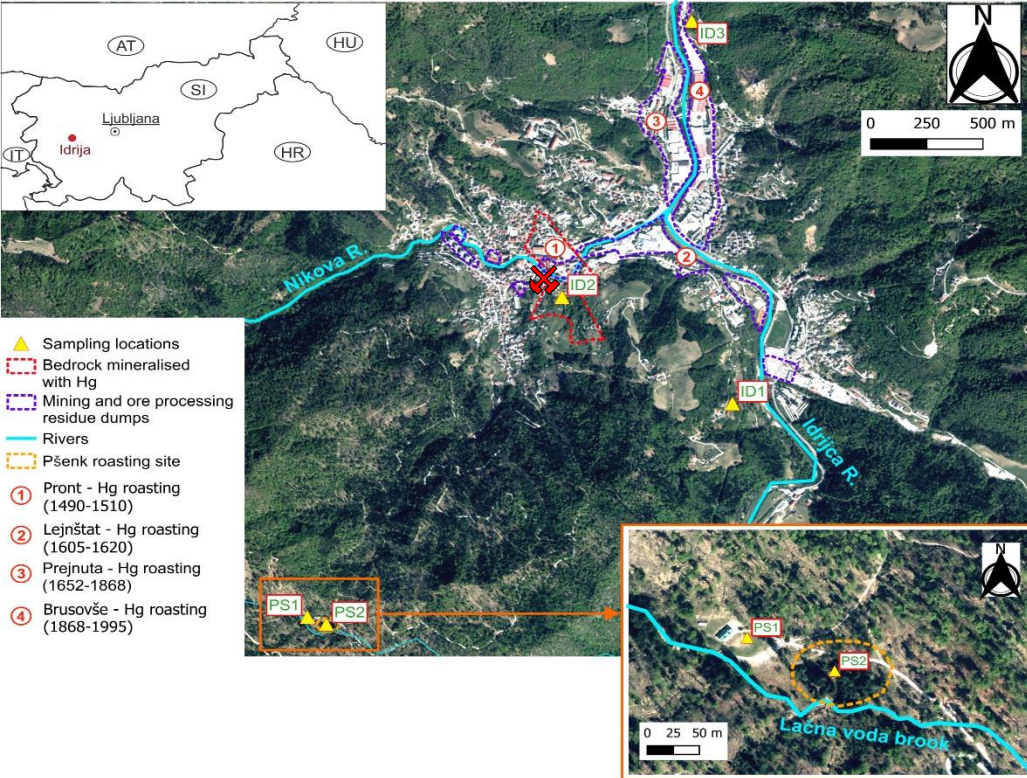
Risultati

Variazione diurna flussi

- Buona corrispondenza tra l'andamento della radiazione UV ed i flussi di Hg gassoso
- Rapida risposta dei flussi all'ombreggiamento (es. nuvole, presenza di alberi, ...)
- Minor corrispondenza con l'andamento della temperatura del suolo, meno variabile



FLUSSI Hg GASSOSO: Pianura Isonzo vs. Idria



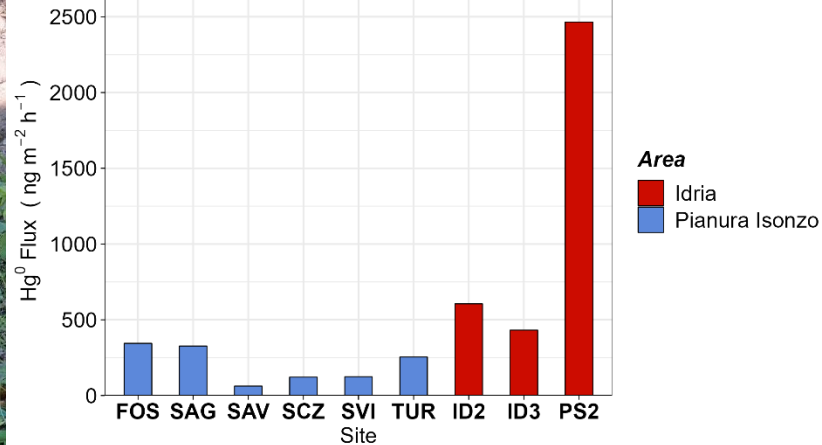
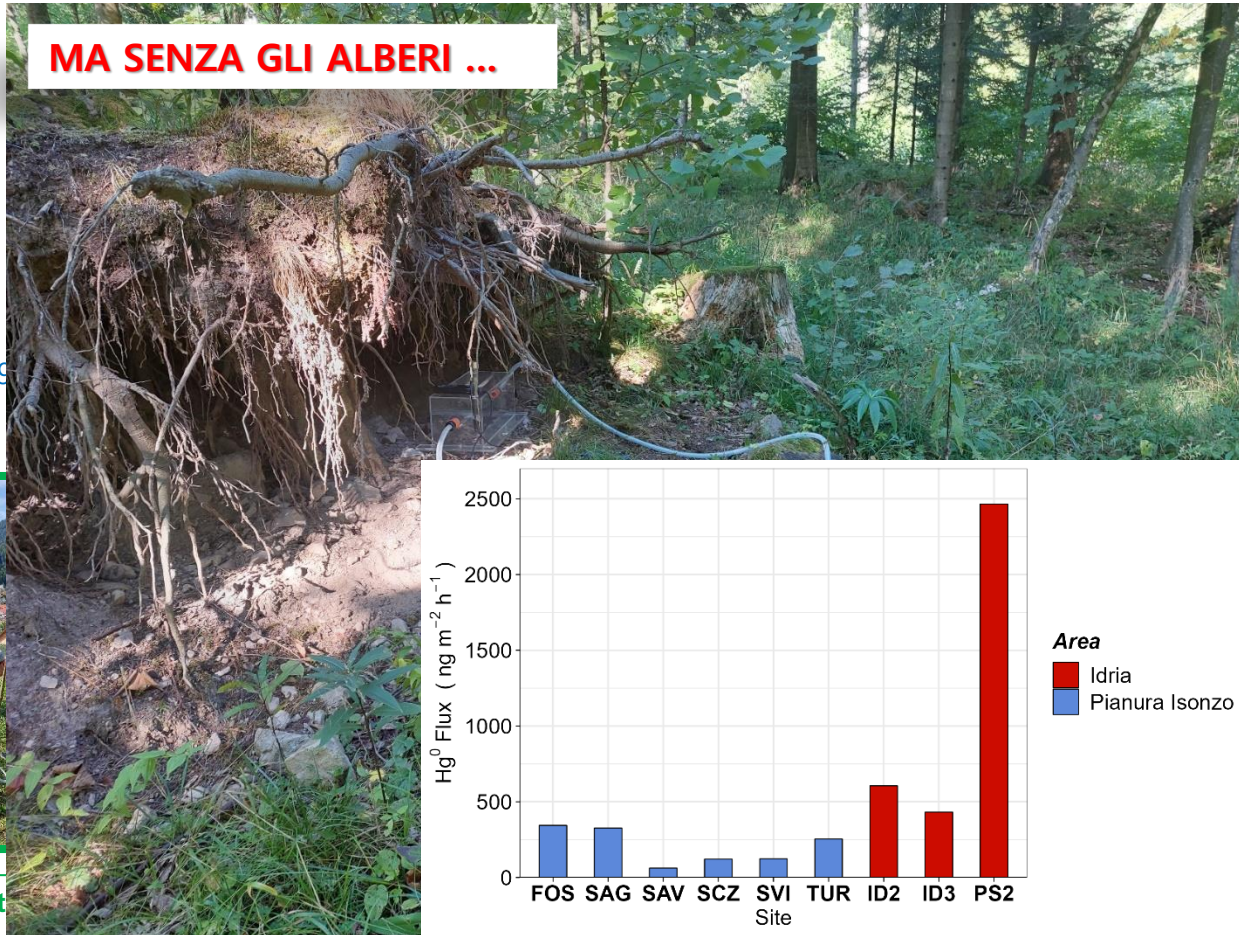
FLUSSI Hg GASSOSO: Pianura Isonzo vs. Idria

MA SENZA GLI ALBERI ...

THg Isonzo = 1.9



ID2: affiorament
Hg = 128 - 219 mg kg⁻¹



Hg 121 - 225 mg kg⁻¹

Hg = 2184 - 10400 mg kg⁻¹



1600 ca.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Bibliografia (1)

- Agnan, Y., Le Dantec, T., Moore, C.W., Edwards, G.C., Obrist, D., 2016. New Constraints on Terrestrial Surface-Atmosphere Fluxes of Gaseous Elemental Mercury Using a Global Database. *Environ. Sci. Technol.* 50, 507–524. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04013>
- Ariya, P.A., Amyot, M., Dastoor, A., Deeds, D., Feinberg, A., Kos, G., Poulain, A., Ryjkov, A., Semeniuk, K., Subir, M., Toyota, K., 2015. Mercury Physicochemical and Biogeochemical Transformation in the Atmosphere and at Atmospheric Interfaces: A Review and Future Directions. *Chem. Rev.* 115, 3760–3802. <https://doi.org/10.1021/cr500667e>
- Bagnato, E., Barra, M., Cardellini, C., Chiodini, G., Parello, F., Sprovieri, M., 2014. First combined flux chamber survey of mercury and CO₂ emissions from soil diffuse degassing at Solfatara of Pozzuoli crater, Campi Flegrei (Italy): Mapping and quantification of gas release. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 289, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.017>
- Bagnato, E., Sproveri, M., Barra, M., Bitetto, M., Bonsignore, M., Calabrese, S., Di Stefano, V., Oliveri, E., Parello, F., Mazzola, S., 2013. The sea-air exchange of mercury (Hg) in the marine boundary layer of the Augusta basin (southern Italy): Concentrations and evasion flux. *Chemosphere* 93, 2024–2032. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.025>
- Cabassi, J., Lazzaroni, M., Giannini, L., Mariottini, D., Nisi, B., Rappuoli, D., Vaselli, O., 2022. Continuous and near real-time measurements of gaseous elemental mercury (GEM) from an Unmanned Aerial Vehicle: A new approach to investigate the 3D distribution of GEM in the lower atmosphere. *Chemosphere* 288, 132547. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132547>
- Canário, J., Poissant, L., Pilote, M., Caetano, M., Hintelmann, H., O'Driscoll, N.J., 2017. Salt-marsh plants as potential sources of Hg⁰ into the atmosphere. *Atmos. Environ.* 152, 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.011>
- Cizdziel, J. V., Zhang, Y., Nallamothu, D., Brewer, J.S., Gao, Z., 2019. Air/surface exchange of gaseous elemental mercury at different lands capes in Mississippi, USA. *Atmosphere (Basel)*. 10, 538. <https://doi.org/10.3390/atmos10090538>
- Dill, C., Kuiken, T., Zhang, H., Ensor, M., 2006. Diurnal variation of dissolved gaseous mercury (DGM) levels in a southern reservoir lake (Tennessee, USA) in relation to solar radiation. *Sci. Total Environ.* 357, 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.04.011>
- Fitzgerald, W.F., Lamborg, C.H., Hammerschmidt, C.R., 2007. Marine biogeochemical cycling of mercury. *Chem. Rev.* 107, 641–662. <https://doi.org/10.1021/cr050353m>

Bibliografia (2)

- Floreani, F., Acquavita, A., Petranich, E., Covelli, S., 2019. Diurnal fluxes of gaseous elemental mercury from the water-air interface in coastal environments of the northern Adriatic Sea. *Sci. Total Environ.* 668, 925–935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.012>
- Floreani, F., Barago, N., Acquavita, A., Covelli, S., Skert, N., Higuera, P., 2020. Spatial distribution and biomonitoring of atmospheric mercury concentrations over a contaminated coastal lagoon (Northern Adriatic, Italy). *Atmosphere (Basel)*. 11, 1280. <https://doi.org/10.3390/atmos11121280>
- Floreani, F., Barago, N., Klun, K., Faganeli, J., Covelli, S., 2023a. Dissolved gaseous mercury production and sea-air gaseous exchange in impacted coastal environments of the northern Adriatic Sea ☆. *Environ. Pollut.* 332, 121926. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121926>
- Floreani, F., Zappella, V., Faganeli, J., Covelli, S., 2023b. Gaseous mercury evasion from bare and grass-covered soils contaminated by mining and ore roasting (Isonzo River alluvial plain, Northeastern Italy). *Environ. Pollut.* 318, 120921. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120921>
- Gonzalez-Raymat, H., Liu, G., Liriano, C., Li, Y., Yin, Y., Shi, J., Jiang, G., Cai, Y., 2017. Elemental mercury: Its unique properties affect its behavior and fate in the environment. *Environ. Pollut.* 229, 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.101>
- Graydon, J.A., St. Louis, V.L., Lindberg, S.E., Hintelmann, H., Krabbenhoft, D.P., 2006. Investigation of mercury exchange between forest canopy vegetation and the atmosphere using a new dynamic chamber. *Environ. Sci. Technol.* 40, 4680–4688. <https://doi.org/10.1021/es0604616>
- Kotnik, J., Horvat, M., Begu, E., Shlyapnikov, Y., Sprovieri, F., Pirrone, N., 2017. Dissolved gaseous mercury (DGM) in the Mediterranean Sea: Spatial and temporal trends. *Mar. Chem.* 193, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2017.03.002>
- Livingston, G.P., Hutchinson, G.L., 1995. Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error, in: Matson, P.A., Harriss, R.C. (Eds.), *Methods in Ecology. Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. Blackwell Science Oxford, Malden, MA, pp. 14–51.
- McLagan, D.S., Mitchell, C.P.J., Huang, H., Lei, Y.D., Cole, A.S., Steffen, A., Hung, H., Wania, F., 2016. A High-Precision Passive Air Sampler for Gaseous Mercury. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 3, 24–29. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00319>

Bibliografia (3)

- O'Driscoll, N.J., Covelli, S., Petranich, E., Floreani, F., Klapstein, S., Acquavita, A., 2019. Dissolved Gaseous Mercury Production at a Marine Aquaculture Site in the Mercury-Contaminated Marano and Grado Lagoon, Italy. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 103. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02621-1>
- Pannu, R., Siciliano, S.D., O'Driscoll, N.J., 2014. Quantifying the effects of soil temperature, moisture and sterilization on elemental mercury formation in boreal soils. *Environ. Pollut.* 193, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.023>
- Petranich, E., Covelli, S., Acquavita, A., De Vittor, C., Faganeli, J., Contin, M., 2018a. Benthic nutrient cycling at the sediment-water interface in a lagoon fish farming system (northern Adriatic Sea, Italy). *Sci. Total Environ.* 644, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.310>
- Petranich, E., Covelli, S., Acquavita, A., Faganeli, J., Horvat, M., Contin, M., 2018b. Evaluation of mercury biogeochemical cycling at the sediment–water interface in anthropogenically modified lagoon environments. *J. Environ. Sci. (China)* 68, 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.11.014>
- Ren, X., Luke, W.T., Kelley, P., Cohen, M.D., Olson, M.L., Walker, J., Cole, R., Archer, M., Artz, R., Stein, A.A., 2020. Long-term observations of atmospheric speciated mercury at a coastal site in the northern gulf of Mexico during 2007-2018. *Atmosphere (Basel)*. 11. <https://doi.org/10.3390/atmos11030268>
- Rinklebe, J., During, A., Overesch, M., Wennrich, R., Stärk, H.J., Mothes, S., Neue, H.U., 2009. Optimization of a simple field method to determine mercury volatilization from soils-Examples of 13 sites in floodplain ecosystems at the Elbe River (Germany). *Ecol. Eng.* 35, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.04.019>
- Shi, T., Gong, Y., Ma, J., Wu, H., Yang, S., Ju, T., Qu, Y., Liu, L., 2020. Soil-air exchange of mercury from agricultural fields in Zhejiang, East China: Seasonal variations, influence factors, and models of fluxes. *Chemosphere* 249, 126063. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126063>
- Sizmur, T., McArthur, G., Risk, D., Tordon, R., O'Driscoll, N.J., 2017. Gaseous mercury flux from salt marshes is mediated by solar radiation and temperature. *Atmos. Environ.* 153, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.024>
- UN Environment, 2019. Global Mercury Assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland.