



ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

XXV GIORNATA MONDIALE DELL'ACQUA

IDROLOGIA E SALUTE

23 MARZO 2026

A B S T R A C T

Comitato ordinatore: Enrico ALLEVA (Linceo, Istituto Superiore di Sanità), Bruno CARLI (Linceo, Presidente Commissione Ambiente), Andrea RINALDO (Linceo, École Polytechnique Fédérale Lausanne, coordinatore).

Il convegno è incentrato su recenti progressi nello studio della propagazione delle infezioni da malattie, acute o croniche, legate alle acque del ciclo idrologico (nelle quali, cioè, ospite e/o patogeno svolgono parte o tutto del loro ciclo vitale in acque dolci). Studi di campo e modelli matematici, recenti sviluppi tecnologici (come il tracciamento della mobilità umana), connessioni con modifiche climatiche e nell'uso del suolo, e implicazioni per la salute pubblica e il governo dei provvedimenti di mitigazione sono parte del programma della giornata.

PROGRAMMA

Lunedì 23 marzo

9.30 Indirizzi di saluto

Saluto della Presidenza dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Tommaso SABATO (Chief Regulated Business Officer di ACEA – Associazione Amici dell'Accademia dei Lincei)

9.50 Bruno CARLI (Linceo, Presidente Commissione Ambiente), Andrea RINALDO (Linceo, EPFL Losanna):
Introduzione

Presiede: Andrea RINALDO (Linceo, EPFL Losanna)

10.00 Marino GATTO (Politecnico di Milano): *Ecologia e dinamica delle malattie infettive legate all'acqua*

10.30 Stefano MERLER (Fondazione Kessler): *Modelli di infezioni vector-borne*

11.00 Maria Cristina RULLI (Politecnico di Milano): *Modifiche dell'uso del suolo ed emergenza di infezioni*

11.30 Intervallo

Enrico ALLEVA (Linco, Istituto Superiore di Sanità)

11.45 Giulio DE LEO (Stanford University): *Mappare, modellare e mitigare il rischio da scistosomiasi*

12.15 Enrico BERTUZZO (Università Ca' Foscari di Venezia): *Proliferative Kidney Disease (PKD), vie d'acqua e clima*

12.45 Andrea PICCIOLI (ISS): *Implicazioni per la sanità pubblica e la governance*

13.15 Intervallo

Presiede: Bruno CARLI (Linco, Presidente Commissione Ambiente)

14.30 Lorenzo MARI (Politecnico di Milano): *Metriche della stabilità dell'equilibrio disease-free per malattie water-borne e water-based*

15.00 Luca LUCENTINI (ISS): *Wastewater-Based Epidemiology: strategie complementari vincenti per la salute pubblica*

15.30 Chiara VANALLI (EPFL): *Ecologia degli elminti e impatti del cambiamento climatico*

16.00 Cristiano TREVISIN (Inserm Paris, Epidemiology & Public Health): *Infezioni di Opistorchiasi nel delta del Mekong*

16.30 Intervallo

16.45 pop-up presentations (max 10' su prenotazione durante la sessione della mattina)

17.45 Discussione

18.00 Andrea RINALDO (Linco, EPFL Losanna), Enrico ALLEVA (Linco, Istituto Superiore di Sanità): *Conclusioni*

La Giornata è stata organizzata con il contributo dell'Acqua



ROMA - PALAZZO CORSINI - VIA DELLA LUNGARA, 10
Segreteria del convegno: convegni@lincei.it – <http://www.lincei.it>

Tutte le informazioni per partecipare al convegno sono disponibili su:
<https://www.lincei.it/it/manifestazioni/giornata-dellacqua-idrologia-e-salute>

Per partecipare al convegno in presenza è necessaria l'iscrizione online
Fino alle ore 10 è possibile l'accesso anche da Lungotevere della Farnesina, 10
I lavori potranno essere seguiti dal pubblico anche in streaming

L'attestato di partecipazione al convegno viene rilasciato esclusivamente a seguito di partecipazione in presenza fisica e deve essere richiesto al personale preposto in anticamera nello stesso giorno di svolgimento del convegno

Ecologia e dinamica delle malattie infettive legate all'acqua

Marino GATTO (Politecnico di Milano)

Le malattie umane trasmesse dall'acqua (WB, Water-Borne, ad es. colera e tifo) o comunque legate all'acqua (WR, Water-Related, ad es. malaria, dengue, schistosomiasi) sono infezioni in cui l'agente causale (o il suo vettore od ospite) trascorre almeno parte del suo ciclo vitale in acqua. Una vasta gamma di micro-(virus, batteri, protozoi) e macro-parassiti (soprattutto platelminti e ascaridi) è responsabile delle infezioni, che sono generalmente dovute all'esposizione (o all'ingestione di) acqua contaminata da organismi patogeni. L'impatto di queste malattie è elevato: si stima che le fonti d'acqua non sicure siano responsabili di 1,4 milioni di morti ogni anno.

Non va dimenticato che le malattie idrotrasmesse possono colpire animali non umani (mammiferi, uccelli, pesci, anfibi...). Ad es. la qualità delle acque è legata a molte patologie delle specie ittiche come la necrosi pancreatica, la sindrome del rene policistico e la setticemia emorragica nei salmonidi. Ma il cambiamento climatico influenza anche il ciclo idrologico nel suolo variando le condizioni di sviluppo di macroparassiti, ad es. elminti, che infettano molti mammiferi terrestri. Comprendere l'ecologia degli agenti patogeni e dei vettori è fondamentale per descrivere la dinamica delle malattie anche attraverso modelli quantitativi appropriati, che tengano conto dell'idrologia dei corpi idrici superficiali o sotterranei e del cambiamento climatico.

Modelli di infezioni vector-borne

Stefano MERLER (Fondazione Kessler)

La presentazione illustra i principali approcci di modellistica matematica utilizzati per descrivere e analizzare la dinamica delle infezioni trasmesse da vettori, con particolare riferimento alle malattie trasmesse da zanzare. In particolare, vengono discussi modelli di trasmissione che incorporano esplicitamente la dinamica del ciclo vitale della zanzara e il suo ruolo nella diffusione dell'infezione, insieme a metodi statistici per la ricostruzione delle catene di trasmissione a partire da dati epidemiologici osservati.

L'applicazione di queste metodologie ha consentito di caratterizzare in modo quantitativo le epidemie di dengue e chikungunya verificatesi in Italia negli ultimi anni, permettendo di stimare parametri epidemiologici chiave quali la trasmissibilità, il tempo di generazione, le distanze tipiche di trasmissione e i pattern di diffusione spaziale dell'infezione. Vengono inoltre presentate analisi del rischio spazio-temporale di trasmissione delle arbovirosi su scala globale, con un'attenzione specifica al contesto europeo e, in particolare, italiano.

I risultati ottenuti vengono infine discussi nel quadro della valutazione dell'efficacia di diverse strategie di intervento e controllo vettoriale, con l'obiettivo di comprendere meglio i fattori che determinano il rischio di trasmissione e di supportare la pianificazione di misure volte a mitigare l'impatto di questi patogeni sulla salute pubblica.

Modifiche dell'uso del suolo ed emergenza di infezioni

Maria Cristina RULLI (Politecnico di Milano)

Le principali malattie infettive che minacciano la salute umana sono trasmesse all'uomo dagli animali o da vettori artropodi come gli insetti. Negli ultimi decenni, i focolai di malattie sono diventati più comuni, soprattutto nelle regioni tropicali, comprendendo infezioni nuove ed emergenti che in precedenza erano non rilevate o sconosciute.

Sebbene vi sia una crescente consapevolezza del fatto che alterare gli habitat naturali possa favorire la comparsa di malattie, il legame tra cambiamenti nell'uso del suolo ed emergenza di nuove infezioni è ancora spesso trascurato e poco compreso. I cambiamenti nell'uso del suolo tipicamente distruggono gli habitat naturali e modificano la composizione e la configurazione del paesaggio, alterando così la dinamica delle popolazioni selvatiche, compresi gli ospiti di patogeni, gli ospiti domestici (spesso intermedi), gli agenti infettivi e i loro vettori.

Inoltre, tali cambiamenti creano maggiori opportunità di esposizione umana attraverso il contatto diretto con fauna selvatica, bestiame e vettori portatori di malattie, aumentando così il rischio di spillover dei patogeni dagli animali all'uomo.

In questo lavoro esaminiamo la relazione tra salute umana e cambiamenti dell'uso del suolo, evidenziando i molteplici percorsi che collegano l'emergere di focolai di malattie con deforestazione, frammentazione forestale, urbanizzazione, espansione agricola, sistemi agricoli intensificati e allevamento intensivo. Colleghiamo i driver diretti e indiretti del cambiamento dell'uso del suolo agli impatti sulla salute umana associati all'emergenza di malattie infettive.

Nonostante crescenti evidenze dello spillover indotto dai cambiamenti dell'uso del suolo, le strategie per ridurre il rischio di nuove malattie sono spesso assenti dalle discussioni sui sistemi alimentari sostenibili e sulla gestione del territorio. La prospettiva "One Health"—che integra salute umana, animale e ambientale—offre una dimensione fondamentale, ancora troppo spesso trascurata, per comprendere gli impatti sanitari dei cambiamenti nell'uso del suolo.

Proliferative Kidney Disease (PKD), vie d'acqua e clima

Enrico BERTUZZO (Università Ca' Foscari di Venezia)

Gli ecosistemi fluviali sono tra gli ambienti più sensibili ai cambiamenti climatici. Lievi variazioni della temperatura dell'acqua possono alterare profondamente gli equilibri ecologici. La Proliferative Kidney Disease (PKD), una malattia parassitaria che colpisce i salmonidi, rappresenta un esempio emblematico di questa vulnerabilità. È una patologia fortemente clima-sensibile: piccoli aumenti della temperatura dei fiumi possono trasformare una presenza silenziosa del parassita in un'epidemia con elevata mortalità. La PKD può essere considerata quindi un paradigma degli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi d'acqua dolce.

La malattia è causata da un parassita con un ciclo vitale complesso, che alterna la propria fase di sviluppo tra i pesci e invertebrati acquatici chiamati briozoi. Le spore rilasciate nell'acqua vengono trasportate dalla corrente, diffondendo l'infezione lungo l'intero reticolo fluviale. Con estati sempre più calde e frequenti ondate di calore, il parassita si sviluppa più rapidamente, la mortalità dei pesci aumenta e la malattia si espande verso quote e latitudini più elevate. In diversi fiumi europei, la PKD è stata associata a marcati declini delle popolazioni selvatiche delle trote e a ingenti danni economici in quelle coltivate.

Comprendere e prevedere queste dinamiche richiede un approccio integrato. In questo intervento presenterò un percorso di ricerca che combina monitoraggi sul campo, analisi di laboratorio e modellazione matematica. Analizzando l'eDNA (DNA ambientale), ovvero tracce genetiche raccolte direttamente dall'acqua del fiume, si può rilevare la presenza del parassita e dei suoi ospiti. Integrando questi strumenti molecolari con l'idrologia, la patologia veterinaria, l'ecologia e modelli che descrivono la connettività dei sistemi fluviali, si può ricostruire e simulare la diffusione della malattia alla scala di un intero bacino fluviale.

In occasione del convegno Idrologia e salute organizzato per la XXV Giornata Mondiale dell'Acqua, analizzare la dinamica della PKD sottolinea come il cambiamento climatico non modifichi solo elementi fisici macroscopici come portate e ghiacciai, ma anche delicati equilibri tra parassiti, ospiti e biodiversità nei nostri fiumi.

Implicazioni per la sanità pubblica e la governance

Andrea PICCIOLI (ISS)

L'idrologia costituisce uno dei determinanti strutturali della salute umana, in quanto il ciclo dell'acqua rappresenta una componente essenziale dell'equilibrio degli ecosistemi e delle condizioni ambientali che influenzano la diffusione delle malattie. L'acqua non è soltanto una risorsa indispensabile alla vita e allo sviluppo delle società, ma anche un ambiente ecologico complesso nel quale si articolano interazioni dinamiche tra agenti patogeni, vettori, ospiti intermedi e popolazioni umane. Comprendere tali interazioni richiede un approccio interdisciplinare capace di integrare idrologia, ecologia delle malattie ed epidemiologia ambientale.

La letteratura scientifica internazionale ha progressivamente evidenziato come le dinamiche del ciclo idrologico influenzino in modo significativo la diffusione di numerose infezioni water-borne, water-based e water-related. Le trasformazioni ambientali associate ai cambiamenti climatici, alle modifiche dell'uso del suolo, all'urbanizzazione e all'intensificazione delle attività agricole stanno ridefinendo i contesti ecologici nei quali patogeni e vettori si sviluppano e si diffondono. Analisi globali hanno dimostrato come tali trasformazioni rappresentino uno dei principali fattori alla base dell'emergere e della riemergenza di malattie infettive su scala planetaria¹.

In questo quadro, l'idrologia assume un ruolo centrale nella comprensione dei determinanti ambientali della salute e nella definizione di strategie efficaci di prevenzione. L'analisi dei sistemi idrici naturali e antropici – bacini fluviali, laghi, zone umide e infrastrutture idriche – consente infatti di studiare i meccanismi attraverso cui patogeni e vettori si propagano nello spazio e nel tempo, sotto l'influenza di variabili climatiche, idrologiche e socioeconomiche. Il programma scientifico della giornata evidenzia come l'integrazione tra studi di campo, modellistica matematica e tecnologie avanzate di analisi dei dati stia ampliando significativamente la capacità di comprendere tali fenomeni complessi e di individuare precocemente segnali di rischio sanitario.

Le implicazioni per la sanità pubblica riguardano innanzitutto l'evoluzione dei sistemi di sorveglianza sanitaria. I sistemi sanitari sono chiamati a integrare dati epidemiologici, ambientali e climatici in piattaforme analitiche capaci di supportare modelli predittivi e strategie di prevenzione basate su evidenze scientifiche. In tale prospettiva, strumenti innovativi quali la modellistica eco-epidemiologica e l'epidemiologia basata sulle acque reflue (wastewater-based epidemiology) stanno assumendo un ruolo crescente nei sistemi di allerta precoce e nel monitoraggio della circolazione dei patogeni nelle popolazioni².

Parallelamente, assume crescente rilievo la dimensione della governance. La gestione delle risorse idriche non può più essere considerata esclusivamente una questione infrastrutturale o ambientale, ma deve essere riconosciuta come parte integrante delle strategie di prevenzione sanitaria. Ciò implica modelli di governance capaci di integrare politiche sanitarie, ambientali e territoriali, promuovendo una cooperazione strutturata tra istituzioni scientifiche, sistemi sanitari, autorità ambientali e decisori pubblici.

Questa prospettiva si colloca nel quadro dei paradigmi One Health e Planetary Health, che riconoscono l'interdipendenza tra salute umana, salute animale e integrità degli ecosistemi. Come evidenziato dalla Commissione Planetary Health del Lancet, la tutela della salute nel XXI secolo dipende in misura crescente dalla capacità delle società di

preservare i sistemi naturali che sostengono la vita³. In tale contesto, i cambiamenti climatici rappresentano un ulteriore fattore di pressione sui sistemi ecologici e idrologici, con possibili effetti sull'espansione geografica di patogeni e vettori e sul rischio di nuove zoonosi⁴.

Parallelamente, lo sviluppo di sistemi avanzati di sorveglianza ambientale, inclusa l'analisi delle acque reflue, rappresenta una delle innovazioni più promettenti per rafforzare la capacità dei sistemi sanitari di individuare precocemente segnali di rischio e orientare decisioni fondate su solide evidenze scientifiche⁵.

L'acqua emerge così non soltanto come risorsa primaria per la vita, ma come indicatore sensibile dello stato di salute degli ecosistemi e delle comunità umane. Governare le interazioni tra ciclo idrologico, trasformazioni ambientali e salute rappresenta pertanto una delle sfide centrali della sanità pubblica contemporanea e uno degli ambiti nei quali scienza, istituzioni e politiche pubbliche sono chiamate a convergere per rafforzare la prevenzione e la sicurezza sanitaria nel XXI secolo.

Note bibliografiche

¹ Jones K.E. et al. (2008). Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451: 990–993.

² Medema G. et al. (2020). Presence of SARS-CoV-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence. *Environmental Science & Technology Letters*.

³ Whitmee S. et al. (2015). Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: report of the Rockefeller Foundation–Lancet Commission on Planetary Health. *The Lancet*, 386: 1973–2028.

⁴ Carlson C.J. et al. (2022). Climate change increases cross-species viral transmission risk. *Nature*, 607: 555–562.

⁵ World Health Organization (2022). Environmental surveillance for SARS-CoV-2 and other pathogens in wastewater. WHO.

Metriche della stabilità dell'equilibrio disease-free per malattie water-borne e water-based

Lorenzo MARI (Politecnico di Milano)

L'analisi e il controllo delle malattie a trasmissione idrica (*water-borne*) e basate sull'acqua (*water-based*) richiedono un approccio integrato che superi la modellistica compartimentale classica per abbracciare la complessità spaziale delle reti di trasmissione di patogeni e parassiti. In questo contributo, vengono presentati gli strumenti necessari per la definizione di condizioni formali di invasione e persistenza di patogeni e parassiti attraverso l'analisi della stabilità locale dell'equilibrio in assenza di malattia (*disease-free equilibrium*, DFE).

Il fulcro teorico dell'analisi risiede nella derivazione di una matrice di riproduzione generalizzata (*generalized reproduction matrix*, GRM), il cui autovalore dominante (R_0 generalizzato) funge da soglia critica: nel lungo periodo, l'invasione del sistema da parte di patogeni e parassiti è possibile se e solo se tale valore eccede l'unità. A differenza di quelle derivate da modelli compartimentali spazialmente impliciti, la GRM qui presentata integra esplicitamente la connettività idrologica e la mobilità umana, che rendono possibile la disseminazione spaziale dei patogeni, dei parassiti e degli ospiti umani che li trasportano. Questa inclusione è fondamentale per comprendere l'insorgenza di epidemie in casi in cui i parametri locali suggerirebbero una condizione di stabilità del DFE (R_0 locale < 1).

Viene inoltre discussa la reattività dei sistemi epidemiologici attraverso l'introduzione di un indice di epidemicità (E_0). Questa metrica permette di caratterizzare la risposta transitoria di un sistema epidemiologico, identificando condizioni in cui perturbazioni locali (quali per esempio l'introduzione di infetti in un nodo della rete idrologica o di

mobilità umana) possono essere amplificate drasticamente prima di svanire nel lungo periodo, dando luogo a focolai epidemici pericolosi anche in regimi di stabilità asintotica. Questi strumenti teorici, calati su casi di studio reali (come il colera in Haiti e KwaZulu-Natal o la schistosomiasi in Burkina Faso), offrono una base quantitativa per un'allocazione efficace degli interventi e delle infrastrutture sanitarie nel quadro della gestione della salute pubblica.

Ecologia degli elminti e impatti del cambiamento climatico

Chiara VANALLI (EPFL)

La trasmissione e diffusione di malattie infettive sono spesso influenzate da fattori climatici, dai loro cambiamenti stagionali e a lungo termine. Gli elminti, vermi parassiti, trasmessi dal suolo spendono parte del loro ciclo di vita nell'ambiente, dove sono direttamente esposti a condizioni climatiche. Tuttavia, rimane poco compreso come le diverse variabili climatiche, comprese quelle idrologiche, influenzino le specie di elminti e quali siano le conseguenze di queste interazioni nel contesto del cambiamento climatico.

In questo studio, abbiamo utilizzato dati di laboratorio di elminti trichostrongilidi per sviluppare un modello matematico di rischio di infezione dipendente da temperatura e umidità relativa, che è stato poi applicato su scala europea in scenari di cambiamento climatico. Gli elminti dell'intestino e quelli dello stomaco mostrano risposte climatiche contrastanti: il primo gruppo è fortemente influenzato dalla temperatura, mentre il secondo è principalmente influenzato dall'umidità. In base alle specifiche risposte dei due gruppi, si prevede che il cambiamento climatico genererà differenti stagionalità e distribuzioni spaziali del rischio di infezione. In futuro, nel centro-nord d'Europa si potrebbero creare nuove opportunità di espansione di rischio di infezione con possibile co-occorrenza di entrambi i gruppi.

Questo studio evidenzia che, negli elminti trasmessi dal suolo, oltre alla temperatura anche l'umidità relativa gioca un ruolo chiave nelle dinamiche del rischio di infezione. L'inclusione di questa variabile ambientale è pertanto essenziale per rappresentare accuratamente la dipendenza climatica del ciclo di vita degli elminti e generare previsioni affidabili di rischio negli scenari climatici futuri.

Infezioni di Opisthorchiasi nel delta del Mekong

Cristiano TREVISIN (Inserm Paris, Epidemiology & Public Health)

L'opisthorchiasi è una malattia idrica provocata dall'infezione da *Opisthorchis viverrini*, un elminto comunemente presente nel corso del Mekong. Questa malattia, che può raggiungere prevalenze intorno all'80% in certe comunità del Laos meridionale, provoca diverse complicazioni epatobiliari la cui gravità si protrae sino al colangiocarcinoma, un tumore letale dei dotti biliari. L'infezione da *O. viverrini* può essere contratta previa consumazione di pesce crudo. Il ciclo vitale del parassita prevede, oltre all'ospite finale, due ospiti intermedi: delle chiocchie di acqua dolce, che mangiano le uova espulse tramite feci e offrono loro un ambiente nel quale possono moltiplicarsi, e una famiglia di carpe, nelle quali le larve parassitarie, emerse dalle chiocchie, si incistano nell'attesa di essere mangiate, insieme al loro ospite, da un ospite finale. A questo punto, le larve raggiungeranno i dotti biliari, riproducendosi e dando il via ad un nuovo ciclo.

Nel passato, sono stati proposti diversi approcci mirati alla comprensione della trasmissione di *O. viverrini*, la maggior parte dei quali hanno avuto un approccio

epidemiologico locale. Durante questo intervento, presenterò un progetto che ambisce ad utilizzare un modello spaziale integrante il ciclo biologico di *O. viverrini* con la rete idrologica del Mekong e il mercato ittico. L'aggiunta della componente spaziale nei modelli di trasmissione del parassita cambia fundamentalmente la dinamica epidemiologica—accoppiandola a quella idrologica—e permette una migliore comprensione degli scenari di propagazione. Una conoscenza più dettagliata dei meccanismi di trasmissione permette di costruire delle misure di contenimento della propagazione del parassita efficaci e durevoli.