

# ANALISI SPAZIALE DELLA TEMPERATURA DELL'ACQUA IN RETI DI DISTRIBUZIONE IDRICA E PROPOSTA DI INTERVENTI PER L'ADATTAMENTO AL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Chiara Cincotta <sup>1</sup>, Mirjam Blokker <sup>2,3</sup>, Cristiana Bragalli <sup>1</sup> & Zoran Kapelan <sup>3</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali – DICAM, Università di Bologna, 40136 Bologna, Italia; (2) KWR – Water Research Institute, 3430 PE Nieuwegein, The Netherlands; (3) Department of Water Management, Delft University of Technology, 2628 CN Delft, The Netherlands.

## ASPETTI CHIAVE

- La temperatura dell'acqua ne condiziona sia la potabilità che la gradevolezza
- La temperatura del suolo attorno alle condotte di distribuzione idrica è ciò che influenza maggiormente la temperatura dell'acqua erogata all'utenza
- Ondate di calore persistenti in futuro renderanno necessaria la combinazione di più interventi per contenere il riscaldamento indesiderato dell'acqua nella rete

## 1 INTRODUZIONE

La temperatura dell'acqua all'interno della rete di distribuzione idrica è un importante parametro di qualità in quanto condiziona sia la potabilità che la gradevolezza dell'acqua erogata all'utente finale. Le alte temperature favoriscono la crescita di microrganismi e possono alterare il sapore, l'odore e il colore dell'acqua (OMS, 2022). L'OMS suggerisce un limite massimo di temperatura dell'acqua al rubinetto pari a 25°C e indica la stessa soglia di temperatura anche per la distribuzione e lo stoccaggio dell'acqua potabile nella rete, in modo da prevenire la proliferazione del batterio *Legionella*. In Italia col *D.lgs. 18/23* è stata recentemente introdotta la *Legionella* tra i parametri da monitorare nei sistemi di distribuzione interni nell'ottica della valutazione e gestione del rischio. Tale decreto disciplina la qualità delle acque destinate al consumo umano e non prevede un limite massimo di temperatura dell'acqua del rubinetto. In Italia è diffusa la disinfezione dell'acqua con prodotti a base di cloro, la cui concentrazione diminuisce dal punto di dosaggio al punto di utenza a causa dei processi di decadimento che sono risultati favoriti dall'incremento della temperatura dell'acqua (Monteiro et al., 2017). La memoria affronta il tema della temperatura dell'acqua nelle reti di acquedotto, ovvero del suo modificarsi durante il percorso dal punto di immissione in rete all'utenza finale e delle possibilità di intervento per mantenerla al di sotto di una soglia d'interesse. Il caso di studio presentato è la città di Almere nei Paesi Bassi, che trainano la ricerca in virtù del loro approccio alla distribuzione di acqua potabile che non prevede la disinfezione chimica dell'acqua trattata. In linea con le indicazioni dell'OMS, la normativa olandese sull'acqua potabile (*Drinkwaterbesluit*) impone il limite massimo di 25°C alla temperatura dell'acqua al rubinetto. Tale limite può essere raggiunto e temporaneamente superato nelle aree urbane olandesi durante un'estate più calda della media (Agudelo-Vera et al., 2017). Una volta immessa in rete, la temperatura dell'acqua potabile può aumentare o diminuire in modo significativo prima dell'arrivo al rubinetto. Ciò che influisce maggiormente è la temperatura del suolo attorno alle condotte di distribuzione (Blokker et al., 2013a), che si trovano tipicamente ad una profondità di posa di 1 – 1.5 m. La temperatura del suolo è influenzata dalle condizioni meteorologiche, dal tipo di terreno, dai livelli di falda e dall'ambiente urbano, caratterizzato dalla presenza di fonti di calore di origine antropica come le tubazioni del teleriscaldamento e le linee elettriche e da una molteplicità di coperture del suolo, quali prato o alberi che contribuiscono a rinfrescare i primi strati del terreno e pavimentazioni stradali che tendono ad assorbire più calore irradiandolo nel sottosuolo (Blokker et al., 2013a; Agudelo-vera et al., 2017). Blokker et al. (2013a) hanno mostrato che la temperatura in corrispondenza degli allacciamenti alla rete di distribuzione è prossima alla temperatura del suolo indisturbato, poiché il volume d'acqua all'interno delle condotte di distribuzione si riscalda velocemente in virtù dei piccoli diametri e spesso più rapidamente del tempo in cui l'acqua vi risiede. Date la forte dipendenza della temperatura dell'acqua da quella dei primi metri di profondità del suolo e le previsioni di ondate di calore sempre più prolungate (IPCC, 2022), è ragionevole temere che l'acqua presente nella rete di acquedotto ne risentirà in termini di temperatura. Queste considerazioni motivano l'interesse verso l'analisi spaziale della temperatura nei sistemi di distribuzione idrica e la progettazione di interventi che contrastino il riscaldamento indesiderato dell'acqua in rete (van Vossen et al., 2019). Lo studio è rivolto dapprima alla valutazione della

temperatura dell'acqua della rete di acquedotto di Almere nella situazione attuale. Per il contesto olandese analizzato è probabile che il superamento della soglia di 25°C fissata dalla normativa avverrà con maggiore frequenza. Vengono simulati due scenari futuri di aumento delle temperature ambiente, rispettivamente di intermedia ed estrema entità e nello scenario estremo di incremento di 4°C della temperatura dell'aria viene testata l'efficacia di possibili misure di mitigazione, mostrando come un intervento ibrido che le combina possa contenere l'aumento della temperatura dell'acqua in modo da rispettare ovunque il limite dei 25°C dell'acqua consegnata agli utenti.

## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 Modello della temperatura

La temperatura dell'acqua viene trattata alla stregua di un parametro di qualità e calcolata in serie alla modellazione idraulica, grazie all'implementazione in EPANET-MSX (Shang et al., 2023) del modello di trasferimento di calore dal suolo circostante la condotta alla massa d'acqua fluente all'interno elaborato da Blokker et al. (2013a), in cui la velocità di variazione della temperatura dell'acqua potabile  $T_{water}$  nel sistema di distribuzione è data da:

$$\frac{dT_{water}}{dt} = \frac{\alpha_{water}}{r^2(\lambda_* + \frac{1}{Nu})} (T_{outer\ wall} - T_{water}) \quad (1)$$

dove  $T_{outer\ wall}$  è la temperatura alla parete esterna della condotta,  $r$  il raggio interno della condotta,  $Nu$  il numero di Nusselt (include la dipendenza dalla velocità dell'acqua nelle tubazioni),  $\alpha_{water}$  la diffusività termica dell'acqua (assunta costante e uniforme nella rete) e  $\lambda_*$  include la dipendenza dal materiale e dallo spessore della condotta. L'equazione (1) racchiude le due fasi di trasferimento del calore dall'esterno della parete della condotta ad uno strato di acqua aderente alla parete interna (conduzione) e da quest'ultimo all'intera massa d'acqua fluente (convezione). Nei materiali isolanti, quali il PVC di cui è principalmente composta la rete di Almere, la velocità con cui l'acqua si riscalda dipende essenzialmente dal diametro di essa. La temperatura del suolo circostante la condotta è ipotizzata coincidente con  $T_{outer\ wall}$  e diviene condizione al contorno del modello (1). Dal momento che le variazioni della temperatura del suolo alle normali profondità di posa sono molto più lente delle dinamiche idrauliche della rete, si assume una  $T_{outer\ wall}$  costante durante le 24 ore (Blokker et al., 2013a). L'altra condizione al contorno è la  $T_{water}$  nei serbatoi, valore che viene generalmente monitorato.

### 2.2 Interventi di mitigazione

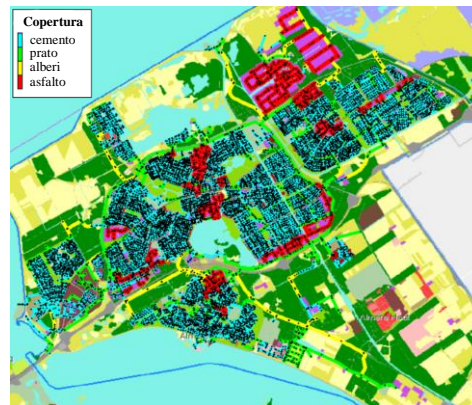
Sono stati considerati i seguenti interventi contro il riscaldamento indesiderato dell'acqua nella rete idrica:

1. Sostituzione delle pavimentazioni tradizionali in asfalto e cemento con **pavimentazioni permeabili** in asfalto poroso (PA) e autobloccanti in cemento (PICP). Le relative  $T_{outer\ wall}$  (26°C per PA e 24°C per PICP) sono state selezionate grazie ad alcune misurazioni in città olandesi (Wang, 2021) e precedenti analisi sui benefici termici e di drenaggio urbano delle pavimentazioni porose (Cheng et al., 2019);
2. **Estrazione di calore dai serbatoi** per abbassare la  $T_{water}$  all'origine (si ripristina l'attuale  $T_{water}$  applicando un decremento di temperatura di 4°C a ciascun serbatoio), recuperando così energia termica che può essere inviata alla rete del teleriscaldamento (Blokker et al., 2013b) o stoccata in appositi acquiferi (ATES) per il riscaldamento invernale (Moerman et al., 2022);
3. **Isolamento termico delle condotte**: sostituzione delle condotte con nuove tubazioni ispirate a quelle del teleriscaldamento, ovvero con una struttura multistrato composta da un tubo interno in acciaio, uno strato isolante in poliuretano e un rivestimento esterno in polietilene ad alta densità;
4. Cambiamento di copertura del suolo: creazione di **nuove aree verdi** alberate. La valorizzazione del verde urbano contrasta le isole di calore superficiali e sotterranee e può anche migliorare la qualità ambientale (van Vossen et al., 2019).

Ogni intervento è stato applicato dapprima singolarmente e a pieno potenziale per valutarne l'impatto sulla rete. In questo modo si sono messi in luce i benefici e i limiti di ciascuno di essi ed è stato possibile combinarli al meglio in base alla loro efficacia nel contesto di applicazione e fattibilità tecnica.

### 2.3 Caso di studio

In Figura 1, sovrapposto ad una mappa di copertura del suolo è mostrato il modello idraulico della rete di Almere, costituito da 780 km di condotte prevalentemente in PVC. Le utenze finali sono circa 76 mila e perlopiù di tipo residenziale. I punti di immissione vengono modellati come due serbatoi di cui si conosce l'andamento del carico durante la giornata. La Tabella 1 riporta i valori di temperatura del suolo a 1 m di profondità assunti per ogni copertura del suolo come rappresentativi di una calda giornata estiva nei Paesi Bassi oggi e in uno scenario di incremento estremo di temperatura dell'aria di 4°C. Per le simulazioni in EPANET-MSX, le ipotesi riguardanti la profondità di posa delle condotte, le ipotesi sulla copertura del suolo della città di Almere (e relative  $T_{outer\ wall}$ ) e sugli scenari climatici simulati si rimanda a Cincotta et al. (2024).



**Figura 1.** Rete di distribuzione idrica di Almere e principali coperture del suolo di CORINE Land Cover (Copernicus ESA).

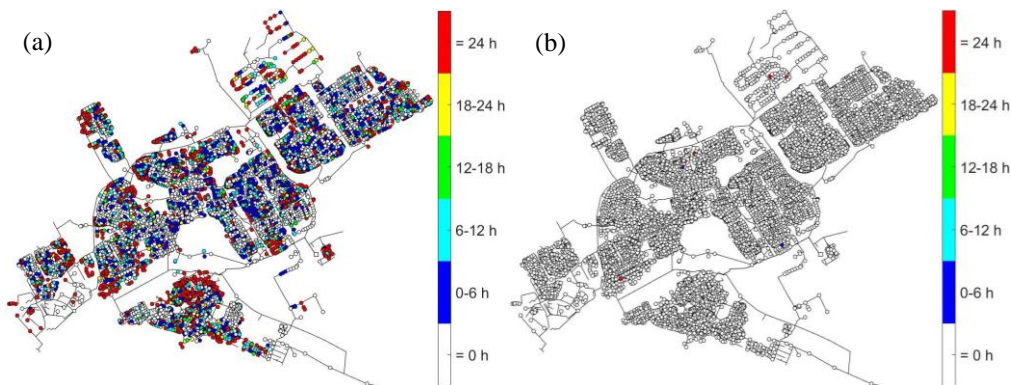
Copertura del suolo	$T_{outer\ wall}$ (°C) attuale	$T_{outer\ wall}$ (°C) +4°C
Piastrelle/blocchi in cemento	22	26
Asfalto tradizionale	25	29
Prato	19.5	23.5
Alberi	18.5	22.5

**Tabella 1.** Condizioni al contorno sulla temperatura della parete delle condotte nella situazione attuale e nello scenario estremo.

## 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Le temperature dell'acqua più elevate si osservano nelle aree industriali e commerciali dove la presenza di asfalto e calore antropico svolgono un ruolo decisivo. Fortunatamente, questi hotspot raramente influenzano le aree residenziali circostanti grazie alla buona progettazione della rete che evita che si realizzino flussi d'acqua dalle aree industriali a quelle residenziali. Tuttavia, quando viene simulato uno scenario climatico estremo di aumento di 4°C della temperatura dell'aria (Figura 2a), circa il 60% della domanda totale di acqua è caratterizzata da una temperatura superiore a 25°C e circa il 19% viene erogata sopra questa soglia durante tutta la giornata. Considerando sia l'efficacia che la fattibilità tecnica, l'intervento I1 risulta la migliore soluzione su larga scala per migliorare un problema diffuso. Se applicato da solo, non è però sufficiente poiché circa il 4% del fabbisogno totale di acqua viene ancora soddisfatto con l'erogazione d'acqua con temperatura superiore a 25°C. Applicando in aggiunta l'intervento I2, si ha un beneficio nelle condotte principali collegate ai punti di immissione e caratterizzate da diametri più elevati (che solitamente hanno una funzione di trasporto). Tale beneficio diminuisce rapidamente quando l'acqua più fredda entra nella rete di distribuzione, che è caratterizzata da diametri minori e tempi di residenza più lunghi (Blokker et al., 2013a,b) per cui l'acqua può nuovamente riscaldarsi per l'interazione con il suolo circostante. L'introduzione dell'intervento I2 consente di ridurre a poco più del 3% la percentuale di acqua erogata al di sopra della soglia di 25°C. Per raffreddare ulteriormente l'acqua in corrispondenza degli hotspot della rete, si simula l'intervento I3 ipotizzando di applicarlo a circa l'8% della lunghezza totale delle condotte. L'isolamento termico delle tubazioni riduce a valori prossimi allo zero (0,5%) il fabbisogno idrico interessato da una temperatura superiore a 25°C. Per affrontare le quattro zone ancora problematiche, in combinazione con gli interventi I1-I3 vengono

introdotti interventi localizzati della tipologia I4, realizzando nuove aree verdi con estensione di ombra sufficiente a prevenire il surriscaldamento del suolo e raggiungere l'obiettivo finale di una rete di distribuzione idrica con temperatura dell'acqua costantemente non superiore a 25°C (Figura 2b).



**Figura 2.** Persistenza della temperatura dell'acqua al di sopra dei 25°C in corrispondenza dei nodi della rete nello scenario futuro estremo prima (a) e dopo (b) l'applicazione del mix di interventi.

## 4 CONCLUSIONI

La ricerca evidenzia la complessità della gestione del riscaldamento indesiderato dell'acqua potabile nella rete di distribuzione idrica e sottolinea la necessità di misure efficaci in vista del cambiamento climatico. Per quanto concerne l'Italia, l'efficacia della disinfezione chimica così come avviene oggi potrebbe essere compromessa in quanto le alte temperature favoriscono il decadimento del cloro. Si teme inoltre che un'acqua del rubinetto più calda e quindi meno gradevole ne disincentivi il consumo, spostandolo ancora di più verso l'uso intensivo di acque minerali naturali (ISTAT, 2024). Inquadrare il problema della temperatura dell'acqua nel sistema di distribuzione idrica in un contesto normativo potrebbe guidare la progettazione verso reti di distribuzione "a prova di clima": interventi quali profondità più elevate, l'uso di materiali isolanti e l'attenzione alla copertura del suolo sottostante le condotte potrebbero, con investimenti adeguatamente pianificati, aumentare complessivamente la resilienza delle reti di distribuzione idrica al cambiamento climatico.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Agudelo-Vera, C., Blokker, M., de Kater, H. & Lafort, R. Identifying (subsurface) anthropogenic heat sources that influence temperature in the drinking water distribution system, *Drink. Water Eng. Sci.*, 2017, 10, 83–91.
- Blokker, E.J.M. & Pieterse-Quirijns, E.J. Modeling temperature in the drinking water distribution system, *Journal AWWA*, 2013a, 105, E19–E28.
- Blokker, E.J.M., Hogeveen, R., Mudde, C. & van Osch, A.M. Thermal energy from drinking water and cost benefit analysis for an entire city, *Journal AWWA*, 2013b, 4, 11-16.
- Cheng, Y.Y., Lo, S.L., Ho, C.C., Lin, J.Y. & Yu, S.L. Field Testing of Porous Pavement Performance on Runoff and Temperature Control in Taipei City, *Water*, 2019, 11(12), 2635.
- Cincotta, C., Blokker, M., Bragalli C. & Kapelan, Z. Spatial Analysis of Water Temperature in a Drinking Water Distribution System for Climate Change Adaptation, *Proceedings of the 3rd International Joint Conference on WDSA/CCWI*, Ferrara, IT, 2024.
- D.lgs. 18/23. Disponibile online: <https://www.gazzettaufficiale.it> (accesso effettuato il 01/10/2024).
- Drinkwaterbesluit. Disponibile online: <https://wetten.overheid.nl> (accesso effettuato il 18/09/2023).
- IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022.
- ISTAT, *LE STATISTICHE DELL'ISTAT SULL'ACQUA | ANNI 2020-2023*, <https://www.istat.it> (accesso effettuato il 27/03/2024).
- Moerman, A., van Bel, N., Oosterholt, F., de Laat, V. & Blokker, M. Thermal Energy Recovery from Drinking Water Systems: Assessing Water Quality and Downstream Temperature Effects, *Water-Energy-Nexus in the Ecological Transition*. *Advances in Science, Technology & Innovation*, ed. V. Naddeo, K.H. Choo & M. Ksibi M., Springer, Cham, CH, 2022.
- Monteiro, L., Figueiredo, D., Covas, D. & Menaia, J. Integrating water temperature in chlorine decay modelling: A case study, *Urban Water Journal*, 2017, 14, 1097-1101.
- OMS, *Guidelines for drinking-water quality*, 4th ed. incorporating the first and second addenda, OMS, Ginevra, CH, 2022.
- Shang, F., Rossman, L. & Uber, J. *EPANET-MSX 2.0 User Manual*, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 2023.
- van Vossen, J., Stoffberg, S.F. & Agudelo-Vera, C. Effectiviteit maatregelen tegen opwarmend drinkwater in leidingen, *KWR* 2019.080.
- Wang, S. *Impact of Pipe Cover on Drinking Water Temperature*, Master Thesis, Delft University of Technology, NL, 2021.