

PhD dissertation by **Nicole Arnaud de Aguiar**



Planning circular urban water systems: a hydrosocial resource nexus framework to support systemic decision-making

Supervisors: Dr Manel Poch Espallargas

Jury members: Dr David Saurí Pujol (Universitat Autònoma de Barcelona), Dr Teresa Graziano (Università di Catania)
and Dr Cristina Gómez Román (Universidade de Santiago de Compostela)

Friday 10th July 2026, 11:00h, UdG Faculty of Sciences (“Aula Magna”)
Carrer M^a Aurèlia Capmany 69, Campus Montilivi, 17003 Girona

Abstract

Cities are hotspots of climate change, facing growing pressure from droughts, intense rainfall, rising temperatures and resource depletion, particularly in Mediterranean cities such as Girona. Within this context, urban water systems are key to urban environmental management: they move water, energy and nutrients, while being shaped by social, economic and governance conditions. Yet, current planning models still struggle to integrate circular resource flows, multifunctionality and socio-environmental justice, or to translate circular options into concrete structural design decisions.

To address these gaps, Nicole Arnaud de Aguiar's doctoral thesis proposes a new **Hydrosocial Resource Urban Nexus (HRUN) framework**, which conceptualises urban water management as a multilayer resource nexus linking water, energy, food, ecosystems and society. Within the model, system infrastructure is defined by four design strategies: circularity, scale, greening and digitalisation. The framework sets out a planning cycle for circular interventions and assesses system performance through environmental and socioeconomic functionalities.

The research translates hydrosocial and socio-ecological theory into practical planning steps across four studies. First, it establishes the theoretical HRUN planning cycle. Second, it creates an assessment scheme to examine how combinations of the four design strategies affect socio-environmental resilience, including key synergies and trade-offs. Third, it analyses how decentralisation shapes the resilience of drainage, sewage and water-supply subsystems, identifying context-sensitive scales for different circularity purposes and spatial settings. Finally, it tests a spatial decision-support method in Girona, Spain, combining GIS-MCDA, graph-based clustering, risk indicators, socio-environmental criteria and stakeholder preferences. The method prioritises areas for circular water management units based on local vulnerability and appropriate de-centralisation scales.

In Girona, the methodology proposes a phased transition towards circularity. In the initial 15% uptake stage, it identifies nine neighbourhood sectors where interventions could be prioritised, mainly through water-cycle restoration measures (66%) and irrigation reuse schemes (25%). A governance-oriented filter further distinguishes parcels with greater potential for direct public action from those requiring incentives, partnerships, or negotiated uptake. In parallel, the reuse-clustering results indicate that a citywide distributed multipurpose reuse scenario could supply approximately 39% of current irrigation and toilet-flushing demand. When benchmarked against the estimated energy intensity of Girona's current urban water cycle (0.68 kWh/m³), these de-centralised facilities perform very differently depending on the treatment configuration: wetland-based systems would reduce the total energy footprint, including treatment and transport, to 0.31 kWh/m³, whereas membrane bioreactor-based systems would increase it to 1.31 kWh/m³.

Altogether, the thesis provides a replicable spatial methodology for evaluating infrastructural synergies and trade-offs, linking hydrosocial theory, systems analysis and spatial planning in support of the transition to more just and resilient urban water systems. This will contribute to improve urban water management at various levels and increase Mediterranean cities' resilience to extreme events. Nicole Arnaud's doctoral thesis has been directed by Dr Manel Poch and carried out at the Laboratory of Chemical and Environmental Engineering, a multidisciplinary research group of the University of Girona renowned for its activity within the water field.

Main publication: Arnaud, N.; Poch, M.; Popartan, L.A.; Verdaguer, M.; Carrasco, F.; Pucher, B. A Systemic Approach for Assessing the Design of Circular Urban Water Systems: Merging Hydrosocial Concepts with the Water–Energy–Food–Ecosystem Nexus. *Water* 2026, 18, 233. <https://doi.org/10.3390/w18020233>

Resum

Les ciutats (especialment, les mediterrànies) són punts crítics del canvi climàtic, sotmeses a pressions creixents derivades de les sequeres, les pluges intenses, l'augment de les temperatures i l'esgotament dels recursos. En aquest context, els sistemes d'aigua urbans són claus per a la gestió ambiental: vehiculen aigua, energia i nutrients, alhora que estan condicionats per factors socials, econòmics i de governança. Tanmateix, els models de planificació actuals encara tenen dificultats per integrar els fluxos circulars de recursos, la multifuncionalitat i la justícia socioambiental, o per traduir les opcions circulars en decisions concretes de disseny estructural.

Per respondre a aquestes mancances, aquesta tesi proposa un nou marc anomenat “**Nexe urbà de recursos hidrosocials**” (en anglès, **Hydrosocial Resource Urban Nexus, HRUN**), que conceptualitza la gestió urbana de l'aigua com un nexe de recursos organitzat en diverses capes que vincula aigua, energia, aliments, ecosistemes i societat. Dins del model, la infraestructura del sistema es defineix a partir de quatre estratègies de disseny: circularitat, escala, renaturalització i digitalització. El marc estableix un cicle de planificació per a intervencions circulars i avalua el rendiment del sistema mitjançant funcionalitats ambientals i socioeconòmiques.

La recerca tradueix la teoria hidrosocial i socioecològica en etapes pràctiques de planificació al llarg de quatre estudis. En primer lloc, estableix el cicle teòric de planificació de l'HRUN. En segon lloc, crea un esquema d'avaluació per examinar com les combinacions de les quatre estratègies de disseny afecten la resiliència socioambiental, incloent-hi sinèrgies i compensacions clau. En tercer lloc, analitza com la descentralització configura la resiliència dels subsistemes de drenatge, sanejament i abastament d'aigua, identificant escales sensibles al context per a diferents finalitats de circularitat i configuracions espacials. Finalment, la recerca valida a Girona, Espanya, un mètode de suport espacial a la decisió que combina GIS-MCDA, *clustering* basat en teoria de grafs, indicadors de risc, criteris socioambientals i preferències dels actors implicats. El mètode prioritza àrees per a unitats circulars de gestió de l'aigua segons la vulnerabilitat local i escales de descentralització adequades.

A Girona, la metodologia proposa una transició gradual cap a la circularitat. En l'etapa inicial d'adopció del 15%, identifica nou sectors de barris on es podrien prioritzar les intervencions, sobretot mitjançant mesures de restauració del cicle de l'aigua (66%) i esquemes de reutilització per a reg (25%). Un filtre orientat vers la governança distingeix, a més, les parcel·les amb més potencial per a una acció pública directa d'aquelles que necessiten incentius, consorcis o una adopció negociada. En paral·lel, els resultats del *clustering* per reutilització indiquen que un escenari de reutilització multi-propòsit distribuït a tota la ciutat podria cobrir aproximadament el 39% de la demanda d'aigua per a regadiu i descàrregues de vàters. En comparar-ho amb la intensitat energètica estimada del cicle urbà de l'aigua actual de Girona (0,68 kWh/m³), aquestes instal·lacions descentralitzades funcionen de manera molt diferent segons la configuració del tractament: els sistemes basats en aigumolls reduirien l'empremta energètica total, inclòs el tractament i el transport, fins a 0,31 kWh/m³, mentre que els sistemes basats en bioreactors de membrana l'augmentarien fins a 1,31 kWh/m³.

En conjunt, la tesi aporta una metodologia espacial replicable per avaluar sinèrgies i compensacions infraestructurals, tot vinculant la teoria hidrosocial, l'anàlisi de sistemes i la planificació espacial com a suport de la transició cap a sistemes urbans de l'aigua més justos i resilents. Això contribuirà a millorar la gestió urbana de l'aigua a diferents nivells i a augmentar la resiliència de les ciutats mediterrànies a episodis extrems. La tesi doctoral de Nicole Arnaud ha estat dirigida pel Dr. Manel Poch i realitzada al Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental, un grup de recerca multidisciplinari de la Universitat de Girona conegut per la seva activitat en l'àmbit de l'aigua.

Publicació principal: Arnaud, N.; Poch, M.; Popartan, L.A.; Verdaguer, M.; Carrasco, F.; Pucher, B. A Systemic Approach for Assessing the Design of Circular Urban Water Systems: Merging Hydrosocial Concepts with the Water–Energy–Food–Ecosystem Nexus. *Water* 2026, 18, 233. <https://doi.org/10.3390/w18020233>

Resumen

Las ciudades (especialmente, las mediterráneas) son puntos críticos del cambio climático sometidas a presiones derivadas de sequías, lluvias intensas, el aumento de la temperatura y el agotamiento de los recursos. En este contexto, los sistemas de agua urbanos son claves para la gestión ambiental: vehiculan agua, energía y nutrientes, y están condicionados por factores sociales, económicos y de gobernanza. Sin embargo, los actuales modelos de planificación presentan dificultades para integrar los flujos circulares de recursos, la multifuncionalidad y la justicia socioambiental, o para traducir las opciones circulares en decisiones concretas de diseño estructural.

Para responder a estas carencias, esta tesis propone un nuevo marco llamado “**Nexo urbano de recursos hidrosociales**” (en inglés, *Hydrosocial Resource Urban, HRUN*), que conceptualiza la gestión urbana del agua como un nexo de recursos organizado en diversas capas que vincula agua, energía, alimentos, ecosistemas y sociedad. Dentro del modelo, la infraestructura del sistema se define a partir de cuatro estrategias de diseño: circularidad, escala, renaturalización y digitalización. El marco establece un ciclo de planificación para intervenciones circulares y evalúa el rendimiento del sistema mediante funcionalidades ambientales y socioeconómicas.

La investigación traduce la teoría hidrosocial y socioecológica en etapas prácticas de planificación a lo largo de cuatro estudios. En primer lugar, establece el ciclo teórico de planificación del HRUN. En segundo lugar, crea un esquema de evaluación para examinar cómo las combinaciones de las cuatro estrategias de diseño afectan a la resiliencia socioambiental, incluyendo sinergias y compensaciones clave. En tercer lugar, analiza cómo la descentralización configura la resiliencia de los subsistemas de drenaje, saneamiento y abastecimiento de agua, identificando escalas sensibles al contexto para distintos fines de circularidad y configuraciones espaciales. Por último, la investigación valida en Girona, España, un método de apoyo espacial a la decisión que combina GIS-MCDA, *clustering* basado en teoría de grafos, indicadores de riesgo, criterios socioambientales y preferencias de los actores implicados. El método prioriza áreas para unidades circulares de gestión del agua según la vulnerabilidad local y escalas de descentralización adecuadas.

En Girona, la metodología propone una transición gradual hacia la circularidad. En la etapa inicial de adopción del 15%, identifica nueve sectores vecinales donde se podrían priorizar las intervenciones, principalmente a través de medidas de restauración del ciclo del agua (66%) y esquemas de reutilización de riego (25%). Un filtro orientado a la gobernanza distingue además las parcelas con mayor potencial para la acción pública directa de aquellas que requieren incentivos, asociaciones o adopción negociada. Paralelamente, los resultados del *clustering* reutilización indican que un escenario de reutilización distribuida multipropósito en toda la ciudad podría abastecer aproximadamente el 39% de la demanda actual de riego y descarga de inodoros. Al compararlas con la intensidad energética estimada del ciclo del agua urbana actual de Girona (0,68 kWh/m³), estas instalaciones descentralizadas funcionan de manera muy diferente distinta según la configuración del tratamiento: los sistemas basados en humedales reducirían la huella energética total, incluyendo el tratamiento y el transporte, a 0,31 kWh/m³, mientras que los sistemas basados en biorreactores de membrana la aumentarían a 1,31 kWh/m³.

En conjunto, la tesis aporta una metodología espacial replicable para evaluar sinergias y compensaciones infraestructurales, vinculando la teoría hidrosocial, el análisis de sistemas y la planificación espacial como soporte de la transición hacia sistemas urbanos del agua más justos y resilientes. Ello contribuirá a mejorar la gestión urbana del agua a distintos niveles y a aumentar la resiliencia de las ciudades a episodios extremos. La tesis doctoral de Nicole Arnaud de Aguiar ha sido dirigida por el Dr. Manel Poch y realizada en el Laboratorio de Ingeniería Química y Ambiental, un grupo de investigación multidisciplinar de la UdG conocido por su actividad en el campo del agua.

Publicación principal: Arnaud, N.; Poch, M.; Popartan, L.A.; Verdaguer, M.; Carrasco, F.; Pucher, B. A Systemic Approach for Assessing the Design of Circular Urban Water Systems: Merging Hydrosocial Concepts with the Water–Energy–Food–Ecosystem Nexus. *Water* 2026, 18, 233. <https://doi.org/10.3390/w18020233>