

# L'uso dell'acqua in ambito urbano: un approccio ecosistemico per valutarne la sostenibilità

Vera Maria Agnese Casella\*, Cristina Bondavalli, Antonio Bodini

Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Parma, Viale delle Scienze 11/A - 43100 Parma

\* Referente per la corrispondenza: Via Lodolino 19 - 15067 Novi Ligure (AL); ve\_vera@yahoo.it

*Pervenuto l'8.2.2005; Accettato il 27.9.2005*

## RIASSUNTO

Al fine di garantire una gestione integrata dell'acqua improntata ad un uso sostenibile, si propone di applicare a livello locale una tecnica di analisi ecosistemica: la network analysis. Descrivendo l'uso dell'acqua in una realtà urbana (il Comune di Albareto, in Provincia di Parma) mediante un grafo, i cui nodi sono esemplificativi delle attività umane presenti e delle principali fonti idriche, e i cui legami orientati rappresentano i flussi di scambio della risorsa idrica tra i nodi e con l'ambiente esterno, la network analysis permette di investigare la propensione all'uso sostenibile della risorsa idrica. Tale indicazione si ottiene da alcune misure ricavate dalla matrice dei flussi di acqua nell'ecosistema urbano: coefficienti di dipendenza e di contributo, indice di riciclo, indici di organizzazione dei flussi. L'ecosistema oggetto di studio si caratterizza per un basso riciclo della risorsa e per la sostanziale dipendenza dal prelievo dalle sorgenti. Questi attributi, abbinati a un livello medio di organizzazione dei flussi, indicano, nel complesso, una moderata propensione alla sostenibilità. Questa caratteristica si accentua nei mesi estivi, in cui la scarsa disponibilità d'acqua si somma all'aumento dei consumi, pro capite e totali. L'approccio usato in questo studio sembra promettente per le indagini sulla sostenibilità degli ecosistemi urbani, in quanto affronta i problemi in termini complessivi, superando la logica settoriale che solitamente ispira le politiche di gestione.

PAROLE CHIAVE: acqua / Albareto / ecosistemi urbani / network analysis / sostenibilità

## Water use in urban systems: an ecosystem approach for sustainability assessment

In this paper we propose to address the problem of the sustainable use of water resources in urban systems using network analysis, a tool that is comprised in the apparatus of ecosystem ecology. The water system of Albareto, a small municipality located in the Apennine district of the Province of Parma, is discussed as a case study. By calculating the reciprocal dependence of the various sectors of human activity as for water requirements, the amount of resource that is recycled, and the organisation of flows, network analysis shows that the system uses water in a moderately sustainable way and provides general criteria to improve sustainability. In this respect options to improve sustainability are also discussed. The results of this study support the idea that the ecosystem approach can provide an interesting conceptual perspective in which sustainability issues can be framed, and that network analysis is a promising tool to handle these issues in practice.

KEY WORDS: Albareto / network analysis / sustainability / urban ecosystems / water

## INTRODUZIONE

Il comportamento umano ha un profondo impatto sulla quantità e qualità di acqua dolce disponibile: la continua crescita della popolazione e lo sviluppo socio-economico hanno portato ad un rapido aumento della domanda idrica, soprattutto nel settore industriale e agricolo, incrementando i consumi che, a livello

mondiale, superano del 20% le forniture disponibili (l'agricoltura da sola è responsabile per circa il 70% del prelievo totale: AA.VV., 2003); ai problemi di scarsità si aggiungono quelli dell'inquinamento (eutrofizzazione, acidificazione, inquinanti organici, metalli pesanti), e della bassa efficienza del sistema di infrastrut-

ture idriche esistenti: infatti sebbene il 96% della popolazione sia servita dagli acquedotti, l'incidenza delle perdite è pari, come media nazionale, al 42% dell'acqua immessa in rete; la copertura del servizio fognario riguarda invece solo l'84% della popolazione e quella del servizio di depurazione solamente il 73% (AA.VV., 2003).

In quanto risorsa scarsa, l'acqua richiede un'efficiente gestione, che ne permetta la conservazione per i posteri, in accordo con i principi dello sviluppo sostenibile, secondo cui lo sviluppo economico deve avvenire nel pieno rispetto dell'ambiente e delle esigenze delle generazioni future (REDCLIFT, 1987). In accordo con questa filosofia, l'acqua non può essere regolata e gestita come qualsiasi altra risorsa economica, ma è necessario attuare politiche di concerto con gli Enti locali che abbiano per obiettivo la definizione del valore intrinseco della risorsa, la sua protezione quale bene comune, la priorità del consumo umano nel suo utilizzo, la sostenibilità ambientale nel suo prelievo e nella sua restituzione.

Un'efficace tutela e un uso razionale delle risorse idriche si possono realizzare solo a partire dalla comprensione dettagliata delle modalità di uso dell'acqua, che nei sistemi urbani sono piuttosto complesse in quanto essa viene prelevata, distribuita, utilizzata e scaricata in modi diversi in relazione alle molteplici attività presenti negli insediamenti umani. Mentre, in generale, criteri di efficienza e di ottimizzazione dell'uso dell'acqua sono pensati in modo specifico per i singoli settori di attività (agricoltura, industria, ecc.), poca attenzione è dedicata alla performance del sistema urbano nel suo complesso. Il risultato di questo approccio è che politiche che sono funzionali ai singoli ambiti per i quali sono state pensate determinano problemi a scala di sistema (MEINZEN-DICK e ROSEGRANT, 2001).

Per superare questi problemi è necessario costruire un contesto di indagine in cui i processi tipici dei vari settori sono esaminati e valutati in funzione della performance complessiva; in questo senso l'analisi dei sistemi può fornire un contributo importante (SHAW e OBERG, 1993). Dato che questo approccio mette a disposizione vari strumenti di indagine, è indispensabile selezionare quelli più appropriati per i diversi obiettivi. In questa ricerca si è utilizzata una strategia che vede il sistema urbano assimilato a un ecosistema. Quest'ultimo è una collezione di specie vegetali, animali e di micro-organismi strutturati in una fitta rete di scambi regolati da principi trofo-dinamici. Analogamente, anche il sistema urbano può essere visto come una rete di scambi, in cui gli attori sono i settori di attività umana che trasformano e trasferiscono energia, materia, beni e servizi (BAKER *et al.*, 2001).

Studiare le modalità attraverso cui gli esseri viventi si scambiano materia ed energia consente di evidenziare il grado di efficienza degli ecosistemi nella gestione dell'energia e stabilire i vincoli che ne limitano la massimizzazione (ULANOWICZ, 1997). Per analogia, lo studio di come i sistemi urbani organizzano e gestiscono gli scambi di materie e di risorse può dare indicazioni sull'efficienza con cui queste vengono utilizzate.

In particolare, questa ricerca si è focalizzata sulla gestione dell'acqua ad Albareto, un comune situato nel distretto Appenninico della Provincia di Parma. Il suo territorio, a spiccata vocazione naturalistica e paesaggistica, è assai ricco di sorgenti (CAVAZZINI, 2001), che costituiscono la riserva di acqua più importante, sia qualitativamente sia quantitativamente, di tutta la Provincia di Parma. Applicando una metodologia ormai consolidata in ambito ecologico per lo studio degli ecosistemi, la network analysis, è stata investigata la struttura dei flussi idrici nell'ambito territoriale di riferimento, con i seguenti obiettivi: 1) evidenziare la modalità con cui il sistema, nel suo complesso, gestisce le risorse; 2) valutare la sostenibilità di questa gestione attraverso un confronto con gli ecosistemi naturali, mutuando da questi ultimi alcuni criteri per definire la sostenibilità e indicatori di performance a scala sistemica; 3) indicare misure di carattere gestionale per migliorare tale performance e rendere l'uso dell'acqua maggiormente sostenibile.

## MATERIALI E METODI

### La network analysis

La network analysis (BAIRD e ULANOWICZ, 1989; BONDAVALLI *et al.*, 2001; HEYMANS *et al.*, 2002), rappresenta gli ecosistemi naturali come un insieme di comparti collegati da legami orientati (freccie). I comparti identificano le componenti viventi (specie o trofo-specie) e non viventi (pool di nutrienti) del sistema mentre i legami orientati descrivono i flussi di materia/energia che si stabiliscono tra le componenti in virtù delle interazioni alimentari tra produttori e consumatori, comprendendo anche i processi di decomposizione a carico della catena del detrito. In un ecosistema urbano i comparti sono i vari settori dell'attività umana che scambiano una determinata "currency" tra loro e con l'ambiente esterno, e i cui flussi sono rappresentabili tramite freccie.

Gli algoritmi di calcolo alla base dei procedimenti analitici sono unificati in un software (WAND: *Windows Application for Network analysis Digraphs*, ALLESINA e BONDAVALLI, 2004), la versione per Windows del software NETWRK (ULANOWICZ e KAY, 1991), più semplificato e di più facile accesso rispetto a quest'ultimo, in quanto utilizza fogli Excel come interfaccia sia

per l'inserimento dei dati in input sia per la restituzione dei dati in output. Il software permette una serie di elaborazioni tra cui: l'analisi input-output, l'analisi dei cicli, l'analisi dei livelli trofici e il calcolo degli indici ecosistemici. Nei paragrafi a seguire sono delineati solo i principi su cui si basano le diverse procedure di calcolo; per i dettagli si rimanda alla letteratura specializzata (ULANOWICZ, 1986, 2003).

L'analisi input-output identifica qual è la dipendenza reciproca dei comparti che compongono il sistema; tale dipendenza per la sussistenza di un singolo nodo può essere di tipo diretto, se la materia fluisce lungo un solo canale di scambio, o indiretto se è mediata dal passaggio attraverso più comparti. Il software, che accetta in input la matrice degli scambi diretti, rende in output due matrici, dette di Dipendenza totale e di Contributo totale, i cui coefficienti evidenziano quale percentuale di tutta la materia in entrata al comparto di colonna è fornita dal comparto di riga (dipendenza), e la frazione del totale in uscita dal comparto di riga che alimenta il comparto di colonna (contributo). Queste percentuali sono calcolate considerando tutti i percorsi, diretti e indiretti, che permettono di connettere i comparti gli uni agli altri e, in ragione di ciò, è possibile che le percentuali di dipendenza o di contributo superino il 100%.

L'analisi degli input permette di stabilire come si ripartisce un input unitario in entrata al sistema tra tutti i comparti, in relazione alla struttura e all'intensità degli scambi. Questa procedura consente di individuare quali siano i percorsi preferenziali seguiti dalla materia all'interno del network e definire se il network si comporta come un sistema gerarchico dipendente principalmente da un solo flusso di entrata o se i diversi prelievi di risorsa contribuiscono in ugual modo al sostentamento del sistema.

L'analisi dei cicli valuta qual è l'ammontare di risorsa riciclata dal sistema (frazione, sul totale della materia gestita dal sistema, che torna in circolo) attraverso il calcolo di un apposito indice. Inoltre, mediante questa analisi, è possibile identificare i vari percorsi che formano dei cicli e associare ad essi la relativa intensità. In tal modo è possibile stabilire quali siano le connessioni più importanti per il mantenimento di questa funzione.

Gli indici di sistema sono rappresentativi dello stadio di crescita e sviluppo del sistema in esame. Il concetto di crescita è infatti distinto da quello di sviluppo, che, al contrario del primo, implica un grado di organizzazione del sistema e di efficienza nel gestire la risorsa utilizzata.

Il *Total System Throughput* (TST) indica qual è la dimensione estensiva, ovvero la taglia del network, calcolando la quantità totale di materia che entra ed

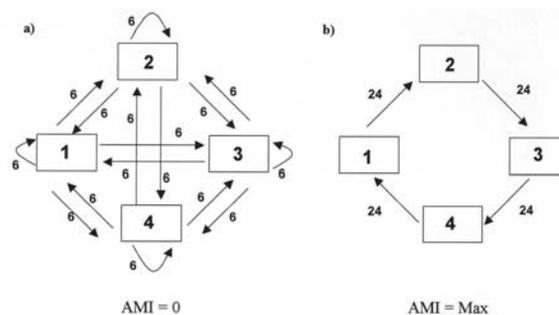
esce da esso, in un certo lasso di tempo. È ottenuto come somma di tutti i flussi.

L'*Average Mutual Information* (AMI) misura l'aspetto intensivo, qualitativo, pertinente la struttura dei flussi di scambio. Esso è un indice di organizzazione, dove con questo termine si intende il grado di specializzazione dei comparti nel governare gli scambi. In un ecosistema, infatti, la stessa taglia è compatibile con diverse articolazioni dei flussi e l'informazione, espressa dall'AMI, sul destino che un'unità di materia segue all'interno del network, è tanto maggiore quanto più obbligati sono i cammini da essa percorribili; al contrario, più forte è la ridondanza delle connessioni, maggiore sarà l'incertezza associata e minimo l'AMI.

In un network quindi la crescita è legata al numero di comparti e al TST, mentre lo sviluppo è inteso come l'ammontare di vincoli negli scambi tra comparti, che determina il grado di ottimizzazione del trasferimento di materia; un sistema molto sviluppato, quindi, ottimizza gli ingressi e le uscite incanalandoli lungo pochi percorsi, dato che ciò comporta minore dispendio di risorse.

Gli indici di crescita e di sviluppo sono unificati nell'*Ascendency* ( $A = TST \times AMI$ ). Moltiplicare il livello di organizzazione degli scambi per la quantità totale di materia che circola nel sistema significa quantificare la frazione di materia che è gestita in modo efficiente.

Il significato degli indici di sistema fin qui descritti può essere reso a partire dall'esempio di figura 1. In essa sono rappresentati due network in cui la stessa quantità di materia ( $TST=96$ ) è gestita mediante due diverse topologie di flusso. In 1-a ciascun comparto si connette, in entrata e in uscita, con tutti gli altri. In questo caso l'AMI è pari a zero in quanto la materia in uscita da uno qualsiasi dei nodi ha la stessa probabilità di fluire verso qualsiasi altro comparto e, di conseguenza, l'informazione a priori sul destino della materia è uguale a zero. In 1-b, la materia segue un percorso univoco, che deriva dalla specializzazione dei com-



**Fig. 1.** Diverso grado di organizzazione dei flussi in un network a 4 comparti. Massima ridondanza e minima organizzazione (a); minima ridondanza e massimo sviluppo (c).

parti nel gestire gli scambi. In questo caso l'informazione, a priori, sul destino di un'unità elementare di materia è massima.

Gli ecosistemi naturali tendono nel corso della successione, ad evolvere da una situazione di tipo (a) (fase giovanile) a una di tipo (b) (fase di maturità) poiché, sotto la spinta dei processi a feedback, vengono selezionate quelle connessioni che sono più efficienti nel trasferire energia e/o materia. Da ciò si evince che la configurazione 1-b è anche la più sviluppata, in quanto costituisce lo stadio finale del processo di sviluppo di un ecosistema, che porta all'aumento della specializzazione degli scambi e tende a eliminare la ridondanza dei canali. Tuttavia è difficile che un ecosistema raggiunga la condizione estrema di ridondanza nulla. Una certa quota di disordine residuo è infatti garanzia di plasticità e resilienza nei confronti delle perturbazioni esterne che, se in grado di provocare la perdita di una o più connessioni, potrebbero determinare il collasso dell'intero sistema, come è facilmente intuibile dalla Fig. 1-b, in cui il venir meno di un legame sarebbe fatale per l'intero network.

L'indice che misura la disorganizzazione residua, ovvero la frazione di currency utilizzata in modo non ottimale, è l'*Overhead* (O), che si compone di una quota legata alla ridondanza degli scambi interni, una associata alla molteplicità (ridondanza) delle entrate, una a quella delle uscite e un'altra dovuta alle dissipazioni.

Se tutta la materia in un network fosse gestita in modo efficiente (cioè se l'AMI fosse massimo) il sistema avrebbe realizzato per intero il suo potenziale di sviluppo (*Development Capacity*, C). Poiché, al contrario, in tutti i sistemi reali permane una frazione residua di disorganizzazione (ridondanza dei canali e dissipazione) parte del potenziale di sviluppo rimane inespressa, confinata nella frazione di disordine. Pertanto se ne deduce che il potenziale di sviluppo di un

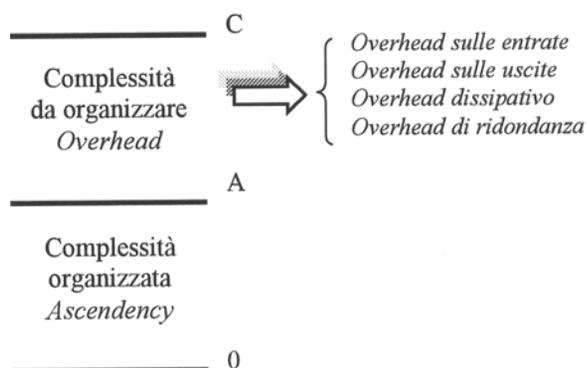


Fig. 2. Relazione esistente tra indici di sistema. La capacità di sviluppo (C) impone un limite superiore all'Ascendency (A), l'indice che combina crescita e sviluppo.

sistema può essere calcolato come somma di A e O e costituisce il limite superiore dell'organizzazione (infatti  $0 \leq A \leq C$ ). Il grado di sviluppo raggiunto e la quota di disordine residuo dipendono strettamente dalle condizioni imposte al sistema dall'ambiente esterno. In ambienti più perturbati è maggiore la quota di disordine che il sistema tollera per garantirsi una maggiore plasticità. Le relazioni tra questi indici sono illustrate in figura 2. Per una trattazione più dettagliata dei concetti associati a queste misure e alle loro implicazioni si rimanda alla letteratura specializzata (ULANOWICZ 1997, 2003).

## RISULTATI

### Costruzione del network

Il punto di partenza dello studio è stato l'identificazione del sistema, tramite la definizione dei suoi confini, che si è scelto di far coincidere con quelli amministrativi del Comune di Albareto. Quindi si è proceduto alla costruzione del network dei flussi, considerando in totale 10 comparti:

- 1) Sorgenti: fonte di approvvigionamento di acqua potabile;
- 2) Acquedotti: comparto che presiede alla distribuzione di acqua;
- 3) Pozzi: fonte di acqua sotterranea per le attività agricole e industriali;
- 4) Corpi idrici: comparto dei corsi d'acqua superficiali, che collega il sistema con l'ambiente esterno sia in termini di prelievo sia di scarico delle acque;
- 5) Utente domestica: insieme della popolazione residente e non residente consumatrice d'acqua;
- 6) Enti pubblici: settori e attività in gestione alla pubblica amministrazione (ufficio postale, sedi comunali, banche, scuole, palestre...);
- 7) Agrozootecnia: insieme delle aziende agricole senza e con allevamenti;
- 8) Commercio-industria: insieme delle attività commerciali, artigianali e industriali;
- 9) Fognatura: fosse Imhoff comunali in cui confluiscono le acque scaricate per la depurazione;
- 10) Peschiera: allevamento ittico, considerato separatamente dalle altre attività, in ragione dei rilevanti quantitativi di acqua utilizzati.

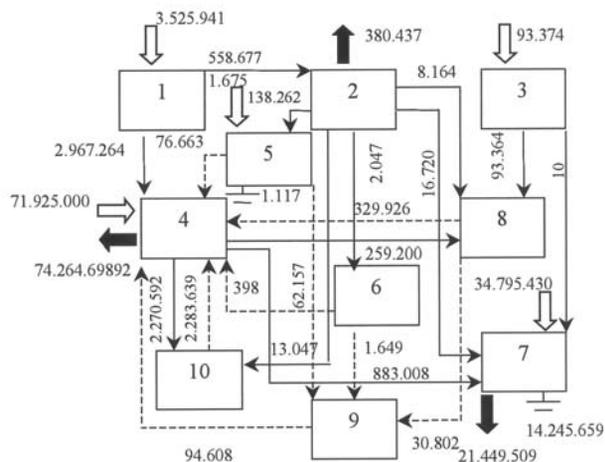
La figura 3 mostra la struttura del network dei flussi. I 10 comparti sono collegati, tra loro o con l'ambiente esterno, da frecce che rappresentano gli scambi interni al sistema, gli input dall'esterno del sistema, le uscite all'esterno del sistema. La frazione di acqua dissipata è rappresentata col simbolo di "terra" usato nei circuiti elettrici, per questione di uniformità metodologica (ULANOWICZ 1986). A ciascun flusso è associato il relativo valore in  $\text{m}^3 \text{anno}^{-1}$ . Le entrate

dall'esterno rappresentano i contributi al sistema dati dalle precipitazioni atmosferiche o dagli apporti di falda, oppure dall'ingestione di acqua in bottiglia a fini alimentari; le uscite sono tutte le perdite di acqua dal network (in forma ancora utilizzabile), dovute all'infiltrazione nel sottosuolo o al deflusso superficiale dei corpi idrici (che trasportano acqua al di fuori dei

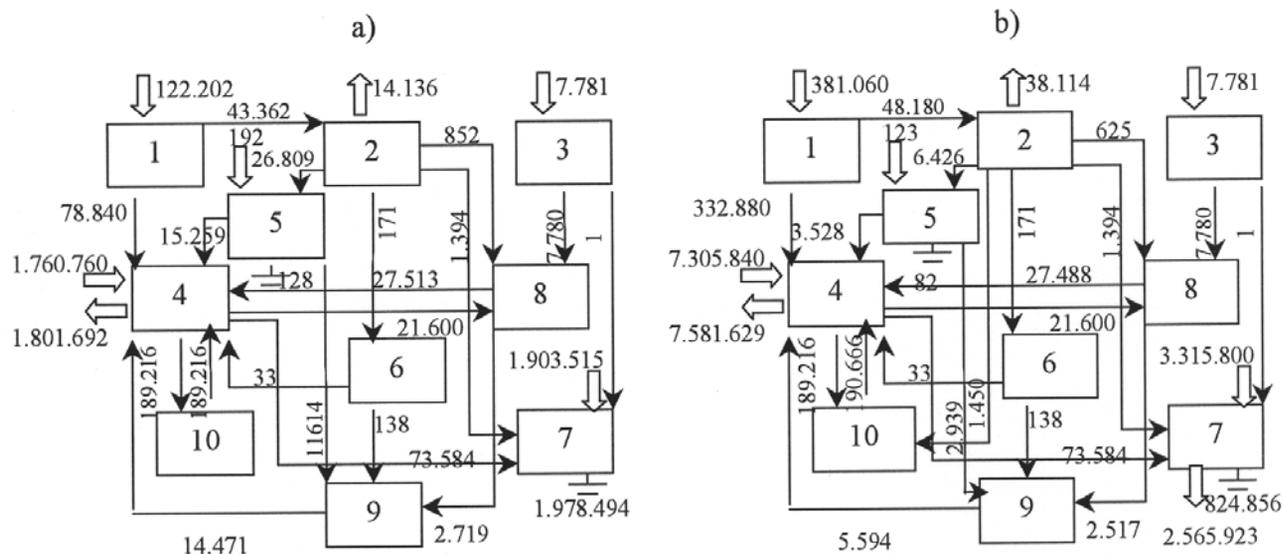
confini del sistema); le dissipazioni invece costituiscono un ammontare di acqua non più utilizzabile, in quanto evaporata dal suolo o traspirata dagli organismi viventi.

I flussi sono stati quantificati per via diretta, a partire da dati forniti dal Comune, da censimenti ISTAT, e da fonti bibliografiche (AA. VV., 2000), ma anche indirettamente, attraverso delle stime. Alcuni flussi, infine, sono stati calcolati per differenza, una volta noti tutti gli altri flussi relativi a un dato comparto. Ciò è stato possibile perché si assume che il network e, quindi, ciascun singolo comparto sia allo stato stazionario, con i flussi in entrata che compensano quelli in uscita. Il network si riferisce inoltre alla finestra temporale Luglio 2002-Giugno 2003, poiché i dati per la stima dei flussi fanno riferimento ai consumi di acqua registrati in quel periodo.

Per una esposizione dettagliata dei calcoli eseguiti si rimanda a CASELLA (2004). Nel seguito vengono esposti solo alcuni casi esemplificativi che riguardano stime e calcoli diretti particolarmente importanti. Per ricavare il flusso dal comparto acquedottistico a quello domestico, rappresentativo dei consumi civili di acqua (flusso da 2 a 5), si sono sommati i metri cubi consumati, da luglio 2002 a giugno 2003, dagli utenti civili provvisti di contatore, come ricavato dalla consultazione dei registri comunali delle bollette. A questo dato doveva essere aggiunto il consumo da parte degli utenti sprovvisti di contatore, vale a dire gli abitanti delle Comunalie, che sono zone di territorio comunale gestite privatamente dalla collettività (BERNARDI, 2002). Tale valore è stato stimato moltiplicando il numero di questi abitanti per il consumo medio pro capite degli



**Fig. 3.** Rappresentazione del network di Albareto. I 10 comparti sono rappresentativi dei settori che forniscono, utilizzano e scaricano l'acqua. Essi sono: (1) Sorgenti; (2) Acquedotti; (3) Pozzi; (4) Corpi idrici superficiali; (5) Utenza domestica; (6) Enti pubblici; (7) Settore Agrozootecnico; (8) Commercio-industria; (9) Fognatura; (10) Peschiera. I flussi sono pesati e i valori sono espressi in m<sup>3</sup> anno<sup>-1</sup>. Le frecce piene indicano le uscite dal sistema, quelle senza riempimento le entrate; le frecce sottili rappresentano i prelievi interni, quelle tratteggiate gli scarichi; il simbolo di "terra" indica le dissipazioni.



**Fig. 4.** Network a scala mensile per il periodo estivo, compreso tra giugno e settembre (a), e per il periodo "invernale", inteso come la parte dell'anno in cui sono presenti nel Comune solo gli abitanti residenti (b). I valori dei flussi sono espressi in metri cubi al mese.

abitanti provvisti di contatore: quest'ultimo è stato a sua volta ricavato mediando tra loro i consumi pro capite di ciascuna frazione appartenente al territorio comunale, e procedendo per tentativi finché questa media non coincideva con il valore medio totale, calcolabile dividendo i metri cubi totali consumati per il numero totale di abitanti del Comune (CASELLA, 2004).

Il flusso di ricarica degli Acquedotti è stato ricavato misurando la portata delle sorgenti captate (opportuna-mente localizzate e caratterizzate attraverso l'uso di sistemi informativi geografici: CASELLA, 2004), tenendo poi conto nel calcolo delle diversità di valori nell'arco dell'anno, dato che le portate massime (primaverili) sono all'incirca triple rispetto alle minime (estive). Poiché non tutta la risorsa in uscita dalle sorgenti viene utilizzata, si genera un flusso che viene smaltito come acqua superficiale e che va a confluire nei corpi idrici. Il flusso verso i Corpi idrici, in particolare, tiene conto dell'acqua proveniente dalle sorgenti non captate e di quella derivante dagli scarichi invernali di troppo pieno alle opere di presa delle sorgenti captate.

Come sottolineato in precedenza, il network di figura 3 fotografa la situazione relativa ai consumi idrici nell'arco di tempo di un anno. Tuttavia, nel comune di Albareto l'uso della risorsa presenta notevoli variazioni tra il periodo estivo (giugno÷settembre) e la restante parte dell'anno, a causa della spiccata vocazione turistica dell'area, che attrae turisti e proprietari di seconde case. Per esaminare le differenze tra i due periodi si è deciso di costruire un network medio mensile per la stagione estiva (Fig. 4-a) e uno medio mensile per la stagione invernale (Fig. 4-b).

I consumi civili sono stati separati in due componenti: quelli dei residenti, presenti tutto l'anno sul territorio, e quelli dei non residenti, presenti solo nei tre mesi estivi. Per stimare i prelievi da acquedotto in un mese estivo si è assunto che il consumo pro capite dei residenti fosse equivalente, per il dato periodo, a quello dei non residenti (essendo quest'ultimo facilmente ricavabile dividendo per 3 la quantità di acqua totale da essi consumata, ipotizzando trascurabili i loro consumi di acqua in altri periodi festivi dell'anno).

Il flusso di prelievo degli Acquedotti dalle Sorgenti è all'incirca costante nel periodo estivo rispetto alla restante parte dell'anno (43.362 m<sup>3</sup> contro 48.180 m<sup>3</sup>), in quanto dipendente dalla capacità di carico delle vasche di raccolta piuttosto che dall'entità dei consumi; variano molto invece il flusso di ricarica dei corpi acquiferi superficiali (78.840 m<sup>3</sup> contro i 332.880 m<sup>3</sup>) e il flusso di prelievo d'acqua ad uso domestico (26.809 m<sup>3</sup> contro i 6.426 m<sup>3</sup>), rispettivamente minore e maggiore rispetto all'inverno, fatto che evidenzia molto bene l'impatto antropico sulla risorsa.

## Analisi del network

Le matrici di dipendenza e di contributo totali ottenute sono state tradotte, per facilitarne la comprensione, in istogrammi aventi in ascissa il numero identificativo del comparto e in ordinata la dipendenza, o contributo, percentuale. I comparti rappresentativi delle utenze che consumano e scaricano l'acqua sono interessanti dal punto di vista della dipendenza dal sistema in quanto evidenziano l'impatto esercitato sulla risorsa idrica, sotterranea e superficiale, e l'eventuale capacità del sistema di autosostenersi, grazie a un ridotto prelievo dall'esterno o a un adeguato riciclo interno della risorsa. Per l'analisi dei contributi è invece interessante soffermarsi su quelli forniti dai comparti rappresentativi delle fonti idriche del sistema, ovvero n. 1, 2, 3 e 4, poiché più significativi da un punto di vista di sostenibilità degli usi dell'acqua.

I relativi grafici, ricavati per i network mensili, sono riportati nelle figure 5 e 6.

Le Sorgenti (Fig. 5-a) e i Pozzi (Fig. 5-c), essendo essi stessi le fonti di approvvigionamento d'acqua al sistema, hanno una dipendenza pari a zero dagli altri comparti. La figura 5 mostra che in alcuni casi la dipendenza complessiva di un comparto dal resto del sistema è maggiore del 100%. Si consideri, a titolo esemplificativo, il caso del comparto n. 6 (Enti pubblici). Come si può notare esso dipende per il 100% del suo fabbisogno idrico dal n. 2 (Acquedotti) e per il 100% dal comparto n. 1 (Sorgenti); questo significa che tutta l'acqua necessaria a questo comparto proviene dalle sorgenti e transita completamente attraverso l'acquedotto prima di giungere a destinazione.

L'analisi degli input integra le informazioni ricavabili da quella delle dipendenze/contributi, permettendo di tracciare il destino seguito da 100 unità di acqua in ingresso a quei comparti che importano la risorsa dall'esterno del sistema. Data l'importanza del prelievo da sorgente, che soddisfa quasi per intero il fabbisogno di acqua del Comune, e che dovrebbe essere l'oggetto principale delle politiche di efficienza e razionalizzazione, la figura 7 riporta, in forma di grafici, i risultati relativi alla distribuzione dell'input al comparto Sorgenti. La figura 7-a descrive la situazione estiva, da confrontare con quella "invernale" (Fig. 7-b).

In figura 8 sono riportati i risultati dell'analisi dell'input al comparto agro-zootecnico (8-a) e ai Corpi idrici (8-b), condotta sul network complessivo.

L'analisi dei cicli ha rivelato la presenza di soli tre cicli ciascuno circoscritto a tre comparti e che coinvolgono, nel complesso, i Corpi idrici, la Peschiera, il comparto del commercio-industria, e la Fognatura. Ciò sta a indicare una bassa percentuale di riutilizzo della risorsa, come si evince anche dal basso valore dell'Indice di ciclizzazione, mostrato nella tabella I.

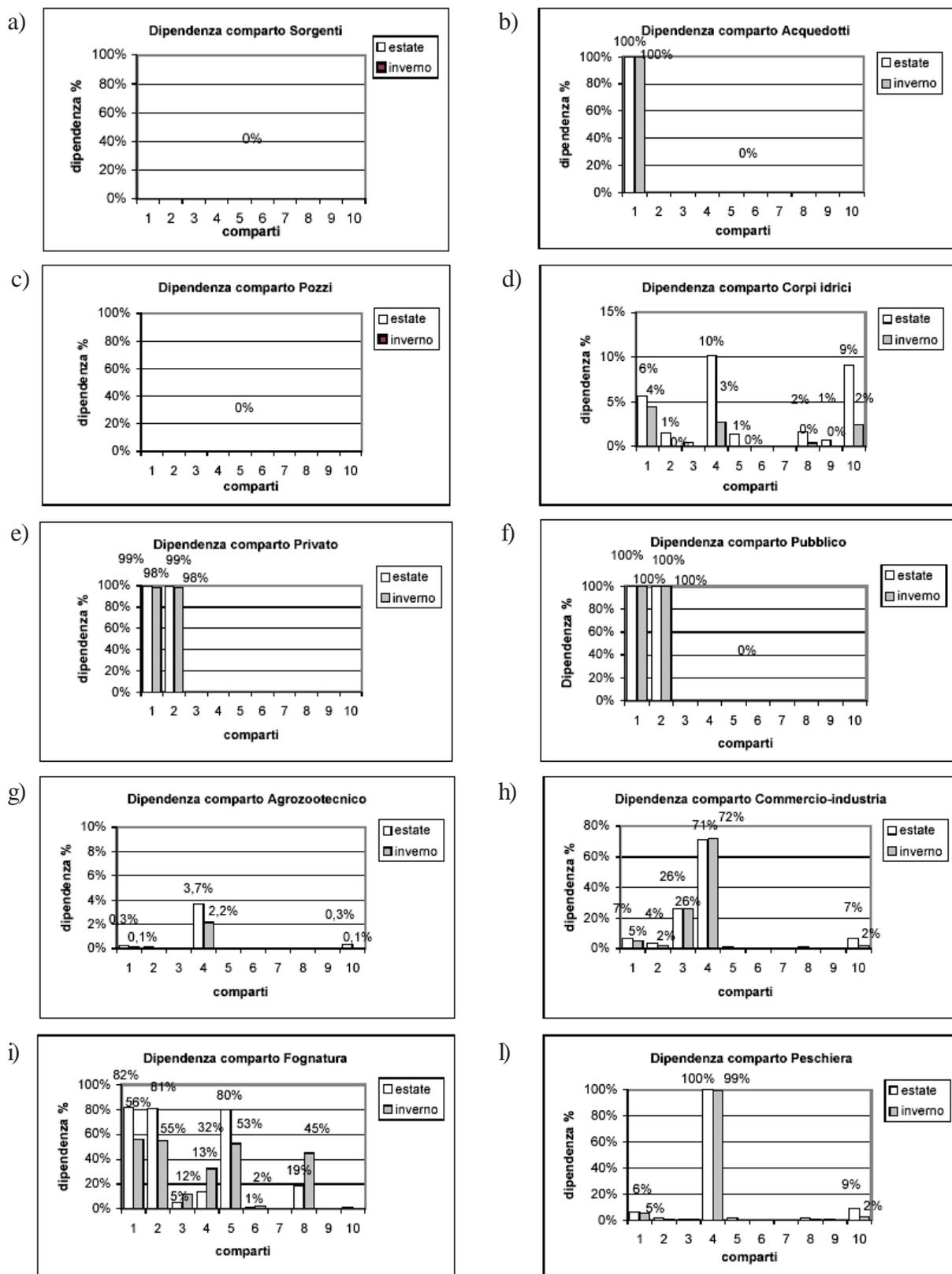


Fig. 5. Dipendenza di ciascun comparto dal resto del sistema per il proprio fabbisogno di risorsa idrica.

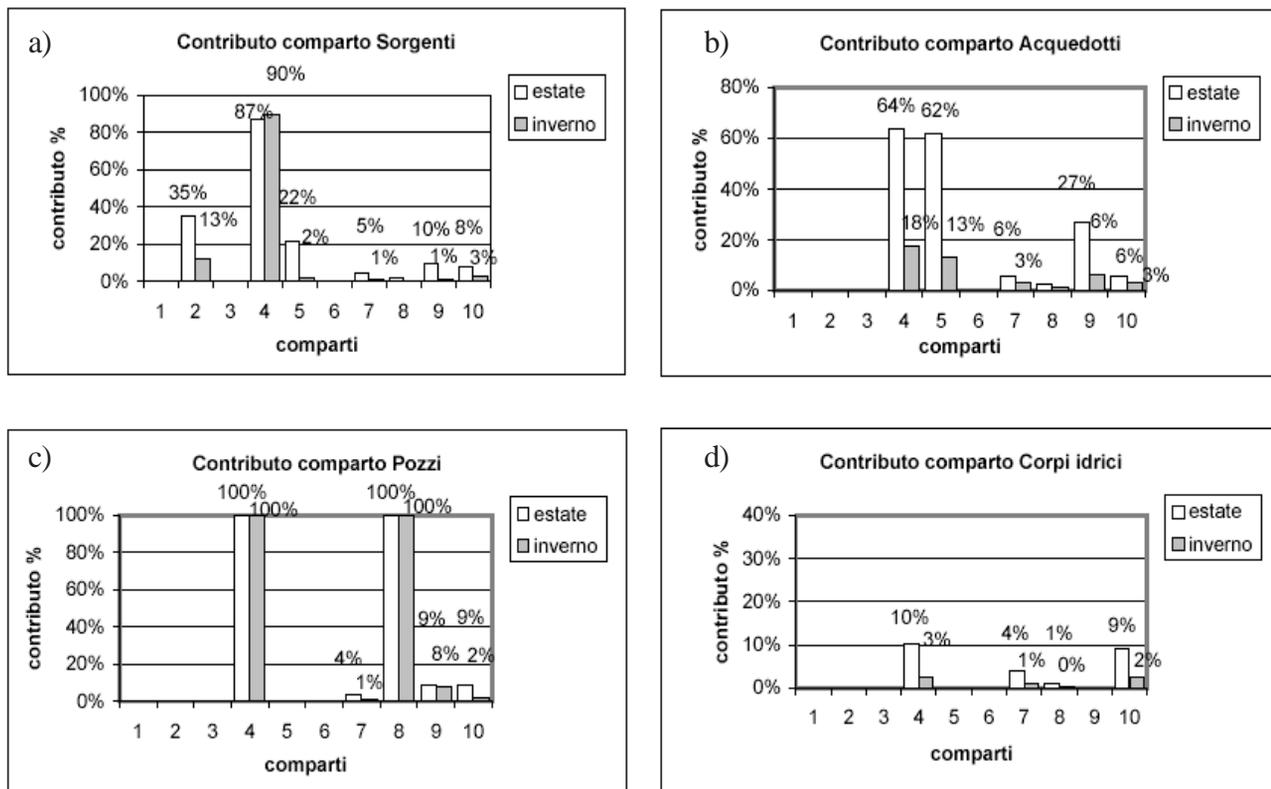


Fig. 6. Contributo (%) dei comparti fornitori di acqua al resto del sistema. In ascissa sono riportati i numeri identificativi di tutti i comparti.

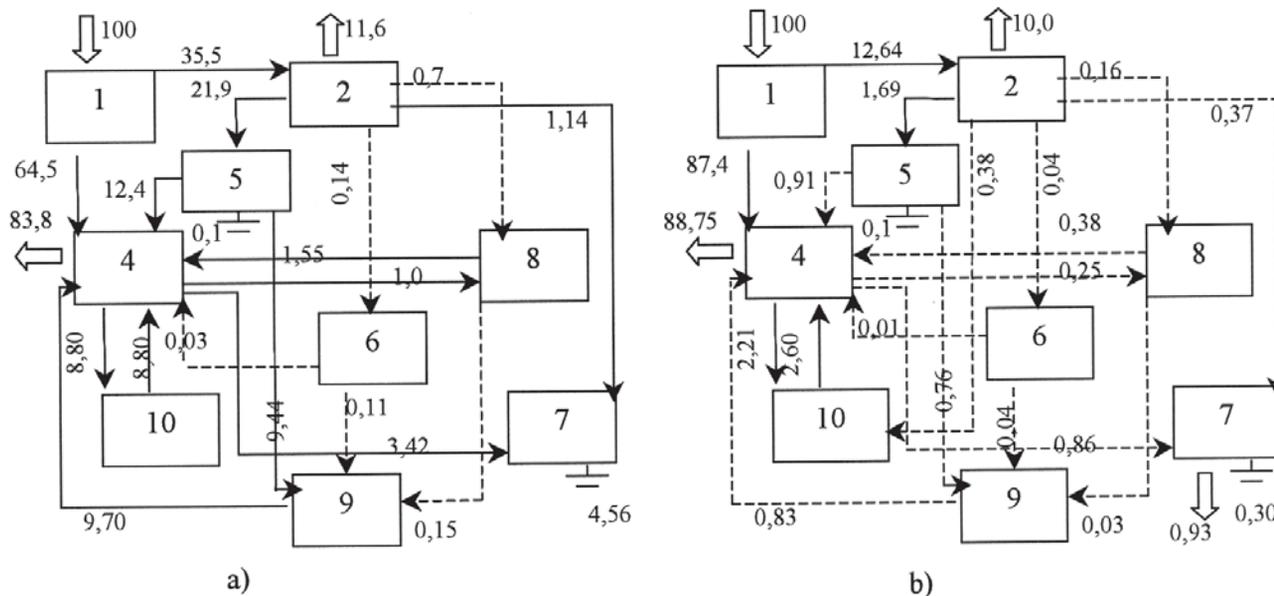
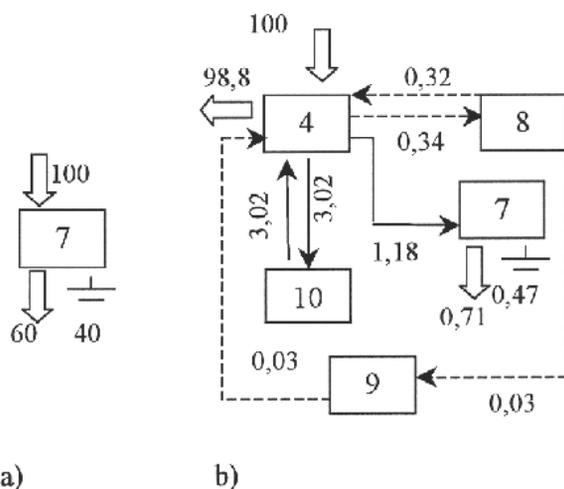


Fig. 7. Analisi di come un input unitario al comparto Sorgenti si distribuisce nel sistema, in estate (a) e nel resto dell'anno (b). Le frecce tratteggiate rappresentano valori minori dell'1%; i valori minori di 0,1% non sono indicati.

La tabella I riporta i valori degli indici ecosistemici, calcolati nell'arco dell'anno e per i soli periodi estivo e invernale. Inoltre, per facilitare l'interpretazione dei risultati, nella stessa tabella sono riportati i medesimi indici ricavati dall'analisi di un ecosistema naturale (sistema lacustre del Lago Santo, in provincia di Parma), nel quale tuttavia la moneta di scambio non era l'acqua ma l'energia (carbonio). Gli indici sono espressi sia in valore assoluto sia in percentuale rispetto alla Capacità di sviluppo, che rappresenta il limite massimo di organizzazione raggiungibile.

## DISCUSSIONE

L'analisi dei flussi idrici sottolinea l'importanza delle sorgenti nel sostenere l'ecosistema urbano in esame.



**Fig. 8.** Ripartizione di 100 unità di risorsa in entrata al comparto agro-zootecnico (a) e ai Corpi idrici (b) nel network complessivo. Le frecce tratteggiate rappresentano valori minori dell'1%; i valori minori di 0,1% non sono indicati.

L'analisi della dipendenza, i cui risultati sono riportati come istogrammi in figura 5, evidenzia che la collettività dipende per la quasi totalità del suo fabbisogno dall'acqua di sorgente. L'acquedotto, infatti, che distribuisce la risorsa al comparto civile privato e a quello degli enti pubblici dipende totalmente dall'acqua sorgiva, sia in estate che in inverno. A sua volta il comparto dei servizi pubblici dipende totalmente (100%) dall'acquedotto e, quindi, dalle sorgenti. Il comparto dell'utenza domestica mostra una dipendenza leggermente inferiore (99% in estate e 98% in inverno) da Sorgenti e Acquedotti, dato che parte del fabbisogno di acqua è soddisfatto da acqua in bottiglia, il cui ammontare è stato calcolato e costituisce un input esterno al comparto n. 5. Al contrario, le attività produttive (comparti n. 7, 8, 10) presentano una dipendenza minima dall'acqua di sorgente (max 7%, comparto Commercio-industria) e provvedono ai fabbisogni della produzione attraverso la derivazione dai corpi idrici superficiali, che soddisfa quasi interamente le necessità dell'impianto di itticoltura e gran parte di quelle delle attività artigianali, le quali utilizzano comunque anche una quota di acqua di falda prelevata dai Pozzi (26%).

Per i settori civile (privato e pubblico) e produttivo (artigianale e itticoltura) le dipendenze non variano fortemente tra estate e inverno. Ciò che cambia è la magnitudo dei flussi. È possibile rendersi conto di ciò considerando i risultati dell'analisi dei contributi, riassunti in figura 6. Considerando il comparto delle sorgenti (Fig. 6-a) si può notare che il suo contributo all'Utenza domestica passa dal 2% della stagione invernale al 22% della stagione estiva. Questo dato sottintende che durante l'estate una frazione più alta di tutta la risorsa resa disponibile dalle sorgenti viene utilizzata dal comparto dell'utenza civile. Questa diffe-

**Tab. I.** Indici ecosistemici che caratterizzano il sistema idrico di Albareto in termini di taglia e organizzazione. I valori fanno riferimento ai periodi estivo e invernale e sono confrontati con i valori annuali e con quelli calcolati per un ecosistema naturale usato come riferimento (il Lago Santo Parmense). I valori percentuali sono espressi in relazione alla Capacità di sviluppo tranne che per l'indice di ciclizzazione che è una frazione della Taglia del sistema. L'unità ( $m^3/mese \times bit$ ) deriva dal particolare algoritmo che calcola gli indici e che deriva dalla teoria dell'informazione (ULANOWICZ, 2003).

Indice	Valore estate ( $m^3/mese \times bit$ )	Valore inverno ( $m^3/mese \times bit$ )	% annuale	% periodo estivo	% periodo invernale	Lago Santo Parmense
Taglia del sistema	8.293.500	22.937.400				
AMI	1.547	1.082				
Capacità di sviluppo	21.577.200	54.769.000				
Ascendency	12.833.400	24.815.500	46%	59,5%	45,3%	50%
Overhead sulle entrate	5.061.000	12.883.600	23%	23,5%	23,5%	9%
Overhead sulle uscite	523.200	10.088.000	17,3%	2,5%	18,5%	0,13%
Overhead dissipativo	3.000	1.684.000	3,3%	0,02%	3,1%	7%
Ridondanza	3.157.000	5.298.000	10,2%	14,6%	9,7%	33%
Indice di ciclizzazione			0,02%	0,05%	0,02%	13%

renza dipende dai maggiori consumi pro-capite ma anche dal fatto che le utenze crescono di numero a causa dell'arrivo di non residenti.

In estate il 35% di tutta la risorsa resa disponibile dalle sorgenti contribuisce ad alimentare l'acquedotto, mentre in inverno questa quota si riduce al 13%. La ragione di ciò va ricercata nel fatto che, in inverno, una frazione significativa della risorsa defluisce, senza essere utilizzata, dagli scarichi di troppo pieno delle infrastrutture adibite alla captazione. Tale frazione va a confluire nei corpi idrici superficiali che la trasportano all'esterno del sistema. Il forte contributo delle Sorgenti ai Corpi idrici superficiali (87% in estate e 90% in inverno) dipende dal fatto che questi ultimi sono i recettori finali di quasi tutta la risorsa messa in circolo dalle sorgenti. In pratica, di tutta l'acqua prodotta dalle sorgenti il 90% va a confluire nei corpi idrici, come flusso diretto, secondo il meccanismo testé descritto, oppure indirettamente, come flussi in uscita dagli altri comparti, che sono approvvigionati dalle sorgenti medesime.

Il destino della risorsa, una volta prelevata dalle sorgenti, è evidenziato dall'analisi degli input, presentata nei grafici di figura 7. Questa analisi ancora una volta evidenzia l'importanza della risorsa prelevata da sorgente per il mantenimento dell'ecosistema urbano. Tutti i comparti del network, tranne il n. 3 (Pozzi), sono raggiunti da flussi che originano dal comparto delle sorgenti. In particolare, tutti i comparti dell'attività umana (escludendo quindi i Corpi idrici e il sistema fognario che svolgono naturalmente la funzione di recettori di tutta la risorsa in circolo) beneficiano dell'acqua di sorgente, anche se il maggior utilizzo è, come si è già visto, a carico dell'utenza civile, pubblica e privata.

Il confronto tra i network mensili permette di evidenziare le differenze nella distribuzione di un ingresso di 100 unità di acqua durante l'estate (Fig. 7-a) e nel resto dell'anno (Fig. 7-b). Dalle figure 4-a e 4-b si può osservare che il quantitativo di acqua che va a rifornire gli Acquedotti è all'incirca lo stesso in tutto l'arco dell'anno (> 40.000 m<sup>3</sup>), ma in percentuale, come mostra la figura 7, è molto maggiore in estate (35,5%) che in inverno (12,6%). Questa quota rappresenta un valore basso rispetto al totale della risorsa disponibile. Una percentuale oscillante tra il 60 e l'85% fluisce direttamente ai Corpi idrici superficiali, mentre della parte captata la frazione più consistente passa dall'Acquedotto all'Utenza domestica, con una frazione pari al 10% che viene persa dalla rete di asservimento. Questa frazione è indicata come output dal comparto n. 2 e non come frazione dissipata, dato che rappresenta risorsa ancora utilizzabile, mentre i flussi dissipativi quantificano la frazione della risorsa che non è più

utilizzabile (es. evaporazione, traspirazione).

La situazione descritta attraverso l'analisi delle dipendenze, dei contributi e dell'input al comparto delle sorgenti può essere interpretata in chiave di sostenibilità alla luce delle indicazioni proposte dai valori assunti dagli indici ecosistemici, presentati in tabella I. Il sistema gestisce un quantitativo di risorsa maggiore in inverno che in estate (Taglia del sistema), e ciò si deve alla maggiore disponibilità di acqua e ai consumi più contenuti. Parallelamente alla diminuzione della quantità di acqua disponibile, nel periodo estivo l'AMI è più alto rispetto al periodo invernale (1,547 contro 1,082). Il dato sembra quindi indicare nell'estate la stagione in cui la risorsa è gestita in modo più efficiente. Tuttavia ciò non si deve a una migliore organizzazione topologica dei flussi ma, in maniera principale, al fatto che si riduce sensibilmente la quota di overhead sulle uscite, a causa della scomparsa del flusso di infiltrazione nel terreno dal comparto agro-zootecnico (Fig. 4-a). In termini percentuali rispetto alla Capacità di sviluppo il disordine sulle uscite passa dal 18,5% del periodo invernale al 2,5% in estate. Tali cambiamenti non sono imputabili alla gestione umana ma solo a variazioni delle condizioni ambientali nei due periodi considerati.

Dal punto di vista topologico è da registrare la presenza di un flusso dall'Acquedotto al comparto della peschiera nella stagione invernale, flusso che non esiste nel periodo estivo. Nonostante ciò la quota di ridondanza nei flussi è maggiore in estate (14,6% contro il 9,7% invernale). Il flusso da Acquedotti a Peschiera, infatti, non permette di compensare la maggiore ridondanza dovuta a una ripartizione dei flussi più equilibrata che si ha nella fase estiva. Per esemplificare questo concetto si faccia riferimento al flusso in entrata alle Sorgenti (Fig. 4). Esso si ripartisce tra la parte captata dall'acquedotto e quella che confluisce nel sistema idrico di superficie. In inverno il flusso ai Corpi idrici è circa sette volte più grande dell'altro, mentre in estate la risorsa è maggiormente equiripartita (flusso ai Corpi idrici solo 2 volte più grande di quello all'acquedotto). La ridondanza dei flussi, infatti, non è solo associata a conformazioni topologiche diverse, ma dipende fortemente anche dal grado di utilizzo dei canali di scambio, in altre parole da come la risorsa si ripartisce tra le diverse connessioni (ULANOWICZ, 2003). Dato che il flusso in ingresso ai Pozzi rimane costante nei due periodi considerati, e gli input al comparto agro-zootecnico (precipitazioni) e ai Corpi idrici (portate) non generano, se non in minima parte nel secondo caso, flussi entro il sistema (Fig. 8), la variazione di ridondanza tra la stagione estiva e il restante periodo dell'anno si deve soprattutto alla diversa ripartizione dei flussi che coinvolgono i comparti che beneficiano dell'acqua di sorgente.

Dalla tabella I l'overhead dissipativo, espresso come percentuale del potenziale di sviluppo, è nettamente più basso in estate che in inverno. Questo non significa che i fenomeni di evapotraspirazione siano più accentuati nella stagione fredda. Al contrario, come si può notare dai network di figura 4-a e 4-b, l'intensità del flusso di evapotraspirazione dal comparto agricolo (l'unico di tutto il sistema che presenta un valore di flusso dissipativo rilevante) è molto maggiore in estate. Tuttavia il risultato ottenuto si deve al fatto che l'indice di overhead pondera la frazione dissipata rispetto a tutta la risorsa che viene esportata, sia a scala complessiva sia per ciascun singolo comparto (ULANOWICZ, 2003). Dato che nel sistema investigato la dissipazione è a carico di soli due comparti, quello agro-zootecnico (n. 7) e quello dell'utenza privata (n. 5), e che, di fatto, il flusso generato dal comparto civile è molto più basso rispetto a quello del primo, è possibile spiegare il risultato per tutto il network ragionando su come il comparto n. 7 gestisce le proprie uscite. Nella fase invernale queste ultime si distribuiscono lungo due canali, l'export per infiltrazione nel terreno e la dissipazione, mentre in estate tutto l'output verso l'esterno del sistema è dovuto alla dissipazione. Dato che un sistema più sviluppato (o efficiente) riduce al minimo i canali lungo cui espletare le funzioni di scambio della risorsa, ne deriva che il network estivo, con un solo flusso in uscita verso l'esterno, deve essere maggiormente organizzato e l'overhead deve risultare inferiore rispetto a quello invernale. In pratica, il sistema in inverno fa ricorso a due canali per gestire i flussi in uscita dal comparto agricolo, mentre in estate la frazione in uscita è solo quella dissipata.

Il confronto con l'ecosistema lacustre, i cui indici sono riportati nell'ultima colonna di tabella I, permette di approfondire l'analisi in chiave gestionale. L'ecosistema si caratterizza per un livello di ottimizzazione dell'uso della risorsa intermedio tra quello dei network estivo e invernale di Albareto (Ascendency = 50%). Nell'ecosistema naturale la quota più consistente di overhead è concentrata nella ridondanza dei canali (33%), mentre nell'ecosistema urbano è la gestione delle entrate e delle uscite a caratterizzarsi per un livello di ottimizzazione relativamente basso. L'overhead sulle uscite, in particolare, presenta nell'ecosistema urbano valori molto superiori rispetto all'ecosistema naturale, con una forte differenza tra estate e inverno dovuta al flusso di infiltrazione nel terreno dal comparto agro-zootecnico. Dato che questo flusso contribuisce alla ricarica delle falde non si pone il problema di una sua diversa gestione (ammesso che fosse tecnicamente possibile). Tuttavia l'ecosistema urbano si avvicinerrebbe alla performance di quello naturale nel periodo estivo se fossero eliminate le perdite dalla rete di

distribuzione: esse costituiscono il flusso in uscita dal comparto n. 2 (Acquedotti) e rendono conto di una frazione pari al 10% dell'acqua in entrata alle Sorgenti, corrispondente a circa il 50% dell'acqua immessa negli Acquedotti (Fig. 7).

Il bassissimo valore di overhead sulle entrate tipico degli ecosistemi naturali (mai superiore all'1,5%, HEYMANS *et al.*, 2002) suggerisce che la risorsa dovrebbe essere conservata il più a lungo possibile nel sistema: in tal modo si avrebbe un soddisfacimento delle necessità dei vari comparti senza forzare il prelievo dall'esterno. In effetti anche l'overhead sulle entrate presenta un valore assai elevato nell'ecosistema urbano: 23,5% in entrambi i periodi, contro il 9% dell'ecosistema lacustre. Questo valore elevato si deve al fatto che il sistema ottiene acqua da molti canali di entrata (le precipitazioni, i corpi d'acqua superficiali, le sorgenti e i pozzi). Un overhead così elevato potrebbe essere ridotto senza compromettere la plasticità del sistema nei confronti di eventuali limitazioni nell'approvvigionamento. Considerato che le utenze civili private utilizzano acqua di ottima qualità anche per scopi non alimentari (irrigazione orti e giardini: CASELLA, 2004) è possibile immaginare una riduzione del prelievo per questi scopi, specialmente nel periodo estivo, quando la risorsa è disponibile in minore quantità. Tuttavia, come si nota dai due network, estivo e invernale, ridurre il flusso dal comparto n. 2 (Acquedotti) al comparto delle utenze civili private (n. 5) non significa necessariamente ridurre il prelievo, ma solo aumentare la quota che dalle sorgenti defluisce verso i corpi idrici superficiali. Questa frazione è comunque importante per mantenere l'integrità del sistema idrico di superficie (Deflusso Minimo Vitale), e politiche di riduzione dei consumi (campagne di informazione, adeguamento delle tariffe in relazione ai consumi, controllo di tutte le utenze mediante contatore) potrebbero incidere significativamente sul mantenimento della salute dei corpi idrici. Questa riduzione dei consumi andrebbe a configurarsi, quindi, non come una riduzione dell'overhead sulle entrate ma come un incremento dell'organizzazione (AMI, Ascendency) attraverso una diminuzione della ridondanza, dovuta a una diversa ripartizione dei flussi in uscita dal comparto n. 1. Una vera riduzione dell'overhead sulle entrate potrebbe ottenersi dal riutilizzo, a scopi non civili, dell'acqua che viene scaricata dalla peschiera. Compatibilmente con le indicazioni di una analisi costi-benefici e con gli standard qualitativi legati agli usi dell'acqua per le attività artigianali, parte di questa frazione, in uscita dal comparto n. 10, potrebbe venire riutilizzata nel comparto industriale (n. 8), che eviterebbe, di conseguenza, di prelevare acqua dai pozzi. Teoricamente l'acqua in uscita dalla Peschiera potrebbe sostituire la risorsa che attualmente

l'acquedotto fornisce al settore agricolo (flusso da n. 2 a n. 7), ma la fattibilità di questa operazione, ancora una volta, dipende dagli usi specifici che il comparto fa di questa acqua di ottima qualità e dai vincoli di natura tecnica e logistica che limitano la possibilità di distribuire la risorsa in uscita dalla Peschiera al comparto agro-zootecnico.

Le ipotesi di utilizzo testé descritte determinerebbero altresì un incremento della quota di overhead legato alla ridondanza dei canali, inteso come variazione della topologia dei flussi, e un aumento dell'indice di riciclo, che è decisamente inferiore a quello degli ecosistemi naturali. L'ecosistema preso a riferimento, il Lago Santo Parmense, ricicla il 13% della materia che lo compone e, in generale, gli ecosistemi arrivano a percentuali di riutilizzo delle risorse superiori al 40% (BAIRD e ULANOWICZ, 1993). Nel caso in esame l'indice di ciclizzazione è praticamente nullo, il che si deve alla presenza di soli tre cicli:

1. Corpi idrici → Commercio e industria → Corpi idrici
2. Corpi idrici → Commercio e industria → Fognatura → Corpi idrici
3. Corpi idrici → Peschiera → Corpi idrici

i quali trasportano una frazione di acqua che è piccola rispetto al totale. Il numero massimo di passaggi che la risorsa fa per arrivare al comparto da cui era partita (= lunghezza del ciclo) è pari a tre: il riciclo è quindi circoscritto a pochi comparti. L'efficacia del riciclo è associata, invece, a cicli lunghi (molti comparti traggono beneficio dalla medesima risorsa), e a una elevata magnitudo dei flussi ad essi associati. L'ipotetico riutilizzo dell'acqua scaricata dalla Peschiera potrebbe migliorare la performance di riciclo, attraverso la creazione di un percorso chiuso cui parteciperebbe il settore industriale-artigianale.

In sostanza, l'analisi del network dei flussi idrici del Comune di Albareto ha messo in evidenza una discreta propensione alla sostenibilità nella gestione della risorsa idrica, che potrebbe essere ulteriormente incrementata riducendo l'overhead sulle uscite (eliminazione delle perdite dalla rete acquedottistica), abbassando

l'overhead sulle entrate (es. eliminando il prelievo da pozzi), incrementando la frazione di acqua riutilizzata (uso dell'acqua della peschiera) e aumentando il livello di organizzazione del sistema con l'eliminazione di una quota di ridondanza associata alla ripartizione dei flussi in uscita dal comparto delle sorgenti, dovuta ai consumi spesso eccessivi dell'utenza civile, soprattutto nel periodo estivo.

## CONCLUSIONI

Lo studio qui illustrato ha messo in evidenza come l'approccio ecosistemico consenta di affrontare il problema della sostenibilità dell'uso dell'acqua in termini complessivi, attraverso la mappatura completa dell'uso della risorsa sotto forma di flussi tra i vari settori che la utilizzano all'interno del sistema urbano.

Il confronto tra gli ecosistemi umani e quelli naturali, possibile attraverso l'analisi dei network, sembra indirizzare verso una definizione più precisa del termine sostenibilità, poiché permette di associare a caratteristiche qualitative ben definite anche degli indici in grado di misurare la performance del sistema. Il valore numerico e il significato di questi indici possono essere utilizzati per definire misure a carattere gestionale, contribuendo, quindi, a caratterizzare il percorso verso la sostenibilità in termini più operativi.

Tuttavia, affinché questo percorso diventi realizzabile, sarà necessario approfondire in termini di fattibilità le eventuali proposte che scaturiscono dall'analisi del network, valutando le implicazioni del versante economico e della valutazione di impatto, soprattutto in relazione ai criteri di qualità della risorsa.

## RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare il Comune di Albareto nelle persone di Carlo Berni, Roberto Restani, Enrica Scarpenti e l'idraulico Fausto, i presidenti delle Comunalie Benito Sabini e Luciano Gallinari, il Dott. Marco Bartoli e il Dott. Daniele Longhi per le attività di campo e di laboratorio, la Dott.ssa M.T. De Nardo della Regione Emilia-Romagna, il Dott. T. Catellani dell'Ex Genio Civile di Parma, l'Ing. Braga dell'Ufficio Idrografico del Po, l'Ing. A. Viglioli, la Dott.ssa A. Cavazzini.

## BIBLIOGRAFIA

ALLESINA S., BONDAVALLI C., 2004. WAND: an ecological network analysis user-friendly tool. *Environmental Modelling & Software*, **19**: 337-340.

AA. VV., 2000. *Piano integrato di risanamento delle acque delle Valli del Taro e del Ceno. Sez. A - Idrologia, idraulica e qualità delle acque*. Studio inedito della Associazione Parma Po 2000 con la collaborazione di ARPA Sez. di Parma.

AA. VV., 2003. *Acqua. Fra incidenza sociale ed efficienza gestionale*. A cura di Angelo Riccaboni. Quaderni del Ponte. Il Ponte Editore. Firenze.

BAIRD D., ULANOWICZ R. E., 1989. The seasonal dynamics of the Chesapeake Bay ecosystem. *Ecological Monographs*, **59** (4): 329-364.

BAIRD D., ULANOWICZ R. E., 1993. Comparative studies on the

- trophic structure, cycling and ecosystem properties of four tidal estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, **99**: 221-237.
- BAKER L. A., HOPE D., XU Y., EDMONDS L., LAUVER L., 2001. Nitrogen balance for the Central Arizona - Phoenix ecosystem. *Ecosystems*, **4**: 582-602.
- BERNARDI G., 2002. *Le Comunalie di Valditaro: una storia di 20 secoli*. A cura del Consorzio delle Comunalie Parmensi. Associazione Ricerche Storiche Valtaresi "A. Emmanueli". Borgo Val di Taro.
- BONDAVALLI C., BODINI A., ULANOWICZ R. E., 2001. Insights into the processing of carbon in the South Florida Cypress Wetlands: a whole ecosystem approach using network analysis. *Journal of Biogeography*, **27**: 697-710.
- CASELLA V., 2004. *L'uso della risorsa idrica nel Comune di Albareto. Propensione alla sostenibilità valutata mediante network analysis*. Tesi di laurea inedita in Scienze Ambientali. Università degli Studi di Parma.
- CAVAZZINI A., 2001. *La risorsa idrica nel Comune di Albareto (Provincia di Parma)*. Tesi di laurea inedita in Scienze Ambientali. Università degli Studi di Parma.
- HEYMANS J. J., ULANOWICZ R. E., BONDAVALLI C., 2002. Network analysis of the South Florida Everglades graminoid marshes and comparison with nearby Cypress ecosystems. *Ecological Modelling*, **149** (1-2): 5-23.
- MEINZEN-DICK R.S., ROSEGRANT M.W.(eds), 2001. Overcoming Water Scarcity and Quality Constraints. *2020 Focus* 9: 1-29. Washington, DC, USA: International Food Policy Research Institute.
- REDCLIFT M., 1987. *Sustainable Development*. Rutledge, London, 217 pp.
- SHAW R.W., OBERG S., 1993. Sustainable development: application of system analysis. *The Science of the Total Environment*, **149**: 193-214.
- ULANOWICZ R. E., 1986. *Growth and Development: Ecosystems Phenomenology*. Springer-Verlag, NY, 203 pp.
- ULANOWICZ R. E., 1997. *Ecology, the Ascendent Perspective*. Columbia University Press, NY, 201 pp.
- ULANOWICZ R.E., 2003. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, **28**: 321-339.
- ULANOWICZ, R. E., KAY J. J., 1991. A package for the analysis of ecosystems flow networks. *Environmental Software* **6** (3): 131-142.