

Ci sono parole «fortunate», che vengono usate in maniera diffusa in forza del loro grande potere evocativo: Industria 4.0 è una di queste.

Il tema è oggi sul tavolo dei principali contesti istituzionali, professionali e accademici. Il crescente interesse che si sviluppa intorno a questo ambito riguarda solo in parte la tecnologia. Secondo i più, non si tratta soltanto dell'ennesima accelerazione tecnologica, ma è in atto una potenziale rottura che impatta sull'intero sistema sociale, dalla formazione all'organizzazione aziendale, dalle nuove professioni a quelle in via d'estinzione, dai rapporti professionali a quelli interpersonali.

In questa prospettiva nasce la nuova Collana Guerini 4.0, che interpreta la nuova visione e che propone una lettura del fenomeno da prospettive diverse, a partire da tre direttrici: le forme organizzative, le nuove tecnologie, il mondo del lavoro.

Comitato editoriale

Alessandro Baroncelli (Università Cattolica di Milano, Dipartimento di Scienze dell'economia e della gestione aziendale), Michele Colasanto (Università Cattolica di Milano, Dipartimento di Sociologia), Alfredo Mariotti (UCIMU – Sistemi per produrre), Antonio Santangelo (Archidata, Innovation Technology Transfer), Edoardo Segantini (Corriere della Sera), Luigi Serio (Università Cattolica di Milano, Dipartimento di Scienze dell'economia e della gestione aziendale), Marco Taisch (Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria gestionale), Sergio Terzi (Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria gestionale).

Ultimi titoli pubblicati

Sesto Viticoli, *Verso un manifatturiero italiano 4.0. Ricerca, tecnologia e non solo*, prefazione di Renato Ugo

Annalisa Caccavale, Stefano Righi, *Banca Tech. La rivoluzione tecnologica nel credito vista dai vertici del sistema bancario*, prefazione di Salvatore Rossi

Roberto Panzarani, *Viaggio nell'innovazione. Dentro gli ecosistemi del cambiamento globale*

Franco Civelli, Daniele Manara, *Novizi senza fine. Competenza e capability 4.0*, intervista ad Andrea Pontremoli, prefazione di Fabio Storchi

Sesto Viticoli, *Una innovazione responsabile. Verso un modello di sostenibilità integrata*, prefazione di Andrea Bairati

Roberto Siagri, *La servitizzazione. Dal prodotto al servizio per un futuro sostenibile senza limiti alla crescita*, prefazione di Roberto Masiero

Annalisa Caccavale, Stefano Righi, *Meno Banca più Tech. Perché le banche saranno molto diverse da come le abbiamo conosciute*, premessa di Anna Gervasoni

Vitoantonio Bevilacqua, Nunzia Carbonara, Roberta Pellegrino, Barbara Scozzi (a cura di), *Tech for Good. Come le tecnologie cambiano i processi di diagnosi, cura e assistenza nella sanità*

Lauro Venturi (a cura di), *Digital irrigation. L'agricoltura per il prossimo millennio*, prefazione di Mariateresa Maschio



© Guerini e Associati_file per caricamento IRIS



© 2024 Edizioni Angelo Guerini e Associati srl
via Comelico, 3 – 20135 Milano
<http://www.guerini.it>
e-mail: info@guerini.it

Prima edizione: ottobre 2024

Ristampa: v iv iii ii i 2024 2025 2026 2027 2028

Publisher Miriana Cimbrotto

Copertina di Donatella D'Angelo

Printed in Italy

ISBN 978-88-6250-912-1

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le fotocopie per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali, corso di Porta Romana 108, 20122 Milano, e-mail autorizzazioni@clearedi.org e sito web www.clearedi.org.



DIGITAL IRRIGATION

L'agricoltura per il prossimo millennio

*a cura di
Lauro Venturi*

*prefazione di
Mariateresa Maschio*

© Guerini e Associati _ file per caricamento IRIS



GUERINI
E ASSOCIATI



INDICE

9 PREFAZIONE
di Mariateresa Maschio

21 CAPITOLO 1
STORIA, SVILUPPI E PROSPETTIVE
DELL'IRRIGAZIONE
di Graziano Ghinassi

- 21 1. L'irrigazione, dalle origini all'età contemporanea
48 2. Dalla rivoluzione francese ai giorni nostri
74 3. Le prospettive dell'irrigazione

91 CAPITOLO 2
LA DIGITAL IRRIGATION
*di Riccardo De Nadai, Riccardo Ravasi e Valentina
Dalla Villa*

- 91 1. La digitalizzazione
97 2. Lo stato dell'arte della digitalizzazione
dell'irrigazione
105 3. Alcuni casi studio
108 4. Setup sperimentale
109 5. Generalizzazione soglie di umidità del terreno
112 6. Definizione strategie irrigue
114 7. Use case
125 8. L'offerta di Farmfront e le prospettive di sviluppo

129 CAPITOLO 3

LA VOCE DEI CLIENTI DI OCMIS GROUP

a cura di Lauro Venturi e Alex Donzelli

129 1. Massimo Salvagnin, Azienda Agricola Porto Felloni

139 2. Davide Barbares e team, Euromacchine

146 3. Contributo di un dealer olandese

149 CAPITOLO 4

IL VALORE SOCIALE PER STAKEHOLDER

E SHAREHOLDER

di Daniel Neves

155 FARMFRONT

157 RINGRAZIAMENTI

CAPITOLO I
STORIA, SVILUPPI E PROSPETTIVE
DELL'IRRIGAZIONE

di Graziano Ghinassi

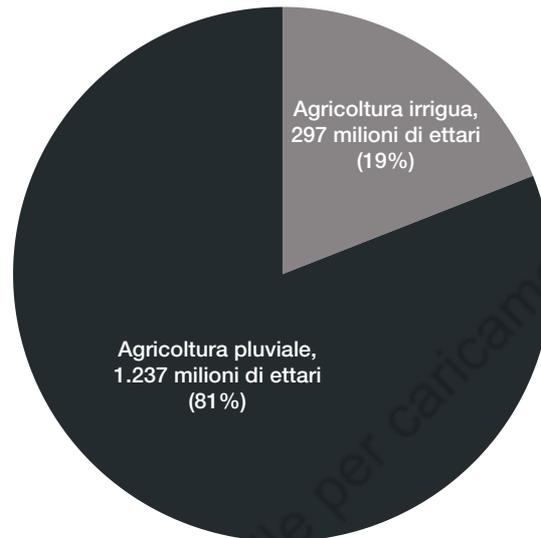
1. L'irrigazione, dalle origini all'età contemporanea

Esistono numerose definizioni di irrigazione, sintetizzabili come *pratica agronomica che consiste nell'applicare quantità controllate di acqua al terreno al fine di migliorare l'attitudine globale dell'ambiente alla produzione vegetale nel senso più ampio del termine*. L'irrigazione è un aspetto chiave dell'agricoltura da oltre cinquemila anni ed è stata sviluppata in tutto il mondo con modalità legate alle caratteristiche dei luoghi, alla disponibilità di risorsa e soprattutto determinate dal livello della conoscenza e della tecnologia disponibile, elementi tra loro profondamente interconnessi e dai quali dipendono i più importanti avanzamenti nel miglioramento delle potenzialità delle tecniche e dei sistemi di irrigazione. Attualmente il 20% circa della superficie totale coltivata è irrigato e provvede al 40% della produzione agricola (figura 1.1).

Sono pochi i testi che trattano in maniera completa la storia dell'irrigazione dalle origini ai giorni nostri¹,

¹ Tra i testi principali in lingua inglese vanno ricordati l'*Enciclopedia Britannica*, edita per la prima volta intorno al 1770 a Edimburgo come *Encyclopædia Britannica*, e *History of Hydraulics* di Hunter Rose e Simon

Figura 1.1 - Ripartizione della superficie mondiale coltivata tra asciutta (*rainfed*) e irrigata



Fonte: ICID, 2013

ma la letteratura disponibile concorda nel riconoscere che l'uso irriguo dell'acqua inizia intorno al VII millennio avanti Cristo nel Vicino Oriente, poi in Persia e successivamente in Cina. I riferimenti storici principali riguardano intere regioni, come la cosiddetta Mezzaluna Fertile collocata tra Egitto e Mesopotamia, opere di captazione e adduzione come i qanat, o specifici luoghi diventati teatro di realizzazioni mirabili che si sono evolute nel tempo e perciò ancora in uso come il sistema Dujiangyan.

Ince dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Università Statale dello Iowa (USA), edita nel 1954 come supplemento a *La Houille Blanche*.

1.1. La Mezzaluna Fertile

Si ritiene che la Mezzaluna Fertile (figura 1.2), termine coniato da James Henry Breast, sia la regione in cui si stabilirono le prime comunità agricole del Medio Oriente e del bacino del Mediterraneo intorno all'inizio del IX millennio a.C., periodo stimato attraverso la datazione al Carbonio 14.



Figura 1.2 - La mezzaluna fertile

Fonte: <https://cdn.britannica.com/53/64953-050-BE553D79/Fertile-Crescent.jpg> (modif.)

La Mezzaluna Fertile comprende un'area a forma di mezzaluna i cui suoli in passato dovevano essere relativamente fertili grazie anche a un clima diverso e probabilmente migliore rispetto a quello attuale, soprattutto in Mesopotamia lungo i fiumi Tigri ed Eufrate e nella valle del Nilo corrispondente al tratto che va dall'attuale alto Egitto al delta. Agli insediamenti del periodo Neolitico seguì rapidamente l'uso dell'irrigazione, che in tutta la regione era praticata perché necessaria a sostenere le produzioni. È anche grazie alla stabilità consentita dall'irrigazione che nelle regioni all'interno della Mezzaluna Fertile si ritiene che si siano sviluppate alcune delle prime società complesse del mondo.

Non si hanno notizie certe su tecniche di irrigazione per come le conosciamo oggi e tantomeno si può parla-

re di strategie irrigue documentate. È semmai preferibile (Liverani, 2001) distinguere un modello africano o saheliano e un modello asiatico. Nel primo la semina viene fatta dopo l'infiltrazione dell'acqua, accumulatasi per ristagno di pioggia o proveniente da esondazione di corsi d'acqua, in modo che la pianta utilizzi l'umidità che si è accumulata nel terreno lungo il futuro profilo radicale. Era un sistema ampiamente diffuso nel periodo Neolitico (circa 8000-4000 a.C.) lungo i fiumi Nilo e Niger, intorno al lago Ciad e agli altri numerosi corpi idrici allora esistenti e operativamente riconducibile alla tecnica oggi nota come Rainwater Harvesting.

Il modello asiatico o vicino-orientale è collocabile intorno al IV millennio a.C. nelle valli alluvionali della Mesopotamia, all'epoca acquitrinosa nonostante le condizioni di siccità dovute alla mancanza di precipitazioni e resa abitabile e coltivabile attraverso opere di bonifica idraulica consistenti in drenaggi, bacini di raccolta, chiuse e canalizzazioni di varia grandezza.

1.1.1. Le civiltà antiche e i giardini, tra testimonianze e leggende

Insieme allo sviluppo delle pratiche agricole sostenute dall'irrigazione, alla fine del V millennio a.C. emersero anche specifici metodi di utilizzo dell'acqua, che nel contesto più ampio delle capacità di gestione della risorsa idrica rappresentano senz'altro un supporto al progresso delle civiltà. Al riguardo vale la pena menzionare il ruolo ricoperto dai giardini come precursori di modalità specifiche di distribuzione dell'acqua di irrigazione. La prima idea di giardino è fatta risalire ai sumeri intorno al 3000 a.C. (Vercelloni *et al.*, 2009), successivamente estesa alla Persia e alle altre regioni della Mezzaluna Fertile tra cui l'Egitto.

Il ruolo dell'acqua è determinante per l'esistenza stessa dei giardini e di quello che essi rappresentavano, cosa del tutto evidente date le difficili condizioni climatiche che rendevano altrimenti sterili questi luoghi. La rilevanza dei giardini era tale che, come avveniva sotto il regno del re assiro Sennacherib intorno all'VIII secolo a.C., l'acqua prelevata veniva destinata all'irrigazione dei giardini prima che alle città. A circa cento anni dopo risalgono i giardini pensili di Babilonia, una delle Sette Meraviglie del mondo antico, che secondo la tradizione vennero edificati dal re Nabucodonosor II nella città di Babilonia, vicino all'odierna Baghdad. Nonostante secondo alcuni storici non vi sia certezza né della loro localizzazione e nemmeno della loro esistenza, le fonti antiche concordano sul fatto che i giardini fossero terrazzati (figura 1.3) e che ospitassero perlopiù le colture agrarie coltivate all'epoca.

L'irrigazione doveva essere fatta con frequenze e quantità di acqua variabili, cosa che sembra abbia richiesto la costruzione di un complesso sistema idraulico che fu interpretato basandosi esclusivamente sulla descrizione degli autori classici. Secondo una di queste ricostruzioni, l'acqua dell'Eufrate veniva convogliata fino a due grandi bacini tramite condotte sotterranee. Da qui veniva sollevata per livelli successivi fino a raggiungere quello più alto, dove si trovava una cisterna da cui l'acqua veniva ridistribuita per gravità su tutta la superficie dei giardini per scopi irrigui e ornamentali. Sulle modalità del sollevamento esistono ipotesi discordanti.

Pare evidente che il passaggio dal primo livello superiore in su abbia richiesto l'uso di energia animale applicata a non ben precisate ruote elicoidali, forse progenitrici della coclea di Archimede, mentre al primo sollevamento provvedevano verosimilmente delle norie in

Figura 1.3 - Rappresentazione dei giardini pensili di Babilonia



Fonte: <https://www.worldhistory.org/>

legno data l'energia posseduta dall'acqua derivata dal fiume. Filone di Bisanzio, descrivendo i giardini pensili di Babilonia, parla di «Corsi d'acqua che [...] scorrono [...] verso l'alto [...] spinti lungo il percorso da artifici meccanici». Oltre ai giardini pensili di Babilonia vengono menzionati quelli di Pasargadae sui monti Zagros costruiti da Ciro il Grande, anch'essi terrazzati per favorire l'irrigazione, con alti muri per l'ombreggiamento e soprattutto in vicinanza di una fonte d'acqua².

1.2. Qanat

Intorno al VI secolo a.C. nasce e si sviluppa in Persia, l'attuale Iran, il sistema idrico dei qanat o canali dre-

² World History Encyclopedia, <https://www.worldhistory.org/>.

nanti, così detti perché costituiti da gallerie capaci di captare le acque di falde freatiche. La parte di monte, quella attiva che intercetta i livelli idrogeologici, è seguita da un tratto più lungo che svolge il ruolo di adduzione e raggiunge il punto di distribuzione dell'acqua (figura 1.4).



Figura 1.4 - Rappresentazione schematica di un qanat

Fonte: <https://www.pagineinprogress.it/i-qanat-iran/> (modif.)

Si stima che a oggi nel solo Iran siano stati scavati circa 22.000 qanat per un totale di circa 300 chilometri di gallerie (Scintilena, 2023).

Per la realizzazione dei qanat era previsto che lo scavo del canale sotterraneo, con pendenza accuratamente calcolata per coniugare le modalità del deflusso dell'acqua e i dislivelli tra i punti di presa e consegna, venisse eseguito tramite la creazione di una serie di pozzi verticali di circa un metro di diametro e distanziati fino a circa 50 metri uno dall'altro per l'estrazione del materiale di scavo. Questi pozzi, che potevano raggiungere profondità di decine di metri a seconda della morfologia del territorio, garantivano una ventilazione adeguata e condizioni di lavoro sufficienti agli addetti allo scavo.

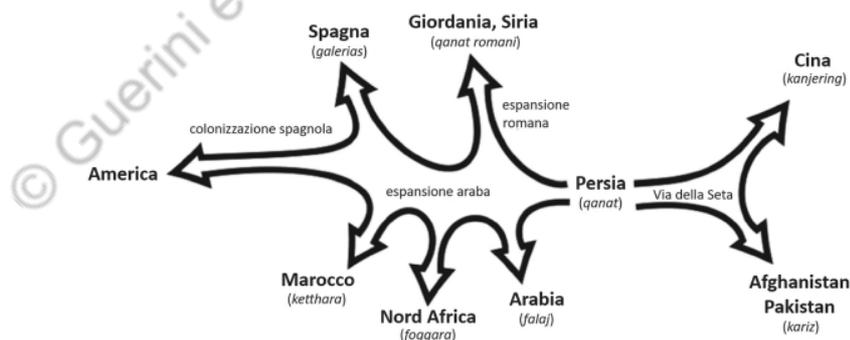
Il fatto di scorrere in profondità permetteva all'acqua non solo di non evaporare durante il percorso, ma anche di giungere pulita e fresca a destinazione. Questi

vantaggi evidentemente non saranno posseduti dagli acquedotti romani, a fronte di un minore impegno costruttivo del sistema di adduzione. La mancanza di strumenti che supportassero la precisione e la correttezza dello scavo della galleria orizzontale e dei pozzi verticali, tra cui la bussola, aiuta a comprendere meglio le difficoltà incontrate nella costruzione di queste opere imponenti, per non dire della pesantezza del lavoro totalmente manuale che comportava tempi di realizzazione dell'ordine di generazioni.

Per il fatto che si presta bene allo sfruttamento delle risorse idriche nelle zone semiaride e desertiche, il sistema dei qanat si diffonde rapidamente nel Medio Oriente, in tutta l'Africa settentrionale dall'Egitto al Marocco fino ad arrivare in Spagna e nel Sud Italia. A seconda dei luoghi, il sistema è stato definito con altri nomi (figura 1.5).

Sono attualmente in funzione molti qanat, che vengono mantenuti con le stesse tecniche del passato beneficiando di strumenti moderni tra cui meccanizzazione e attrezzature da lavoro più sicure.

Figura 1.5 - Diffusione della tecnologia qanat



Fonte: Mohsen *et al.*, 2013

1.3. Il sistema Dujiangyan

È il sistema di irrigazione più antico e tuttora in uso tra quelli che non facevano uso di dighe per il controllo dei flussi idrici. Fu costruito intorno al 250 a.C. per gestire le acque del fiume Min, l'affluente più lungo dello Yangtze, per il controllo delle inondazioni e per provvedere ai fabbisogni di acqua della città (figura 1.6). L'area si trova in Cina nella parte occidentale della pianura di Chengdu, in prossimità dell'altopiano tibetano.

Figura 1.6 - Schema del sistema Dujiangyan



Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dujiangyan-Irrigation-System-TOUR-Map104.jpg>

In origine, il Min scendeva precipitosamente dai monti Min e rallentava bruscamente dopo aver raggiunto la pianura di Chengdu, riempiendo il corso d'acqua di

materiale terroso trasportato in sospensione, rendendo così le aree vicine estremamente soggette alle inondazioni. L'originalità del progetto del Dujiangyan consiste nel fatto che le acque del fiume non venivano arginate, ma separate in tre canali a partire dallo sbarramento detto Bocca di Pesce che ha la funzione di fermare il trasporto solido. Per aprire uno dei tre canali, chiamato il Collo di Bottiglia per via della sua forma, è stato necessario tagliare il monte Yulei, operazione che ha richiesto circa otto anni. Il sistema di irrigazione di Dujiangyan, che oggi irriga oltre 650.000 ettari di terreno agricolo, è stato iscritto nella lista UNESCO come patrimonio mondiale dell'umanità nel 2000.

1.4. I pionieri dell'idraulica moderna

L'assenza di basi scientifiche fece sì che nell'età antica l'idraulica fosse un'arte costituita da intuizione, pratica e capacità costruttiva. Ciò non impedì l'elaborazione di teorie e principi che nel tempo avrebbero portato ai risultati attesi grazie anche al fervore che caratterizzò l'età ellenistica o alessandrina. In questo periodo, che inizia nel 334 a.C. con la spedizione di Alessandro contro l'Impero persiano, la civiltà greca si diffuse nel mondo mediterraneo e orientale e influenzò le culture locali con la conseguente nascita della civiltà ellenistica, che divenne modello ispiratore in campi quali filosofia, economia, religione, scienza e arte. Alessandria, capitale del regno ellenistico d'Egitto, ospitò la Biblioteca reale che fu la più grande e ricca del mondo antico. Con l'annesso Museo costituì uno dei principali poli culturali ellenistici e ricoprì un ruolo determinante nello sviluppo e diffusione della cultura.

Euclide (IV-III secolo a.C.)

È ricordato soprattutto per i due teoremi sui triangoli rettangoli che portano il suo nome e per la fondazione della Scuola di Matematica. Non fu soltanto un matematico: nella sua opera più importante, *Elementi*, detta le regole per un rigido processo deduttivo della scienza, fondato sulla successione: enunciazione, esempio, specificazione, costruzioni aggiuntive, dimostrazione, conclusione. La dimostrazione, a sua volta, è condotta attraverso l'analisi, la sintesi, la confutazione dell'assurdo, l'escaustione e la determinazione (Rouse, Ince, 1957).

Con gli *Elementi* Euclide assegna alla matematica una struttura fatta di assiomi, principi indiscutibilmente veri che portano a garantire la verità certa di tutta la matematica. Rappresentando la base del pensiero matematico nonché l'essenza stessa della matematica, gli *Elementi* avranno un forte impatto sulla cultura occidentale fino a tutto il XIX secolo.

Archimede di Siracusa (287-212 a.C.)

Gli studi di Archimede abbracciarono vari settori della scienza, ma la sua notorietà è soprattutto legata alle scoperte in geometria e in idraulica. In particolare all'enunciato sul principio di galleggiamento, secondo cui ogni corpo immerso in un fluido subisce una forza diretta dal basso verso l'alto di intensità equiparabile alla forza-peso del fluido spostato. Tra le molte invenzioni realizzate sulla base dei suoi studi meritano di essere menzionati il cannone a vapore, con il quale sfrutta l'energia del vapore d'acqua in pressione per lanciare proiettili pesanti, e la vite d'acqua, detta anche Vite di Archimede o coclea. Si trattava di una pompa molto semplice che tuttavia rappresentò un passo importante nel sollevamento delle acque per l'irrigazione. La descrizio-

ne di strumenti simili appare in alcuni documenti egizi e probabilmente sono gli stessi descritti per il sollevamento dell'acqua nei giardini pensili di Babilonia da Filone di Bisanzio.

Ctesibio di Alessandria (285-222 a.C.)

Fu un ingegnere greco antico a cui si attribuisce l'invenzione della pompa, dell'organo a canne, dell'orologio ad acqua e del primo modello di cannone funzionante senza polvere da sparo. Il funzionamento di questi strumenti era basato sull'uso della pressione dell'aria e dell'acqua e per questo Ctesibio è ritenuto il fondatore della pneumatica e l'iniziatore della scuola dei meccanici Alessandrini. La pompa di Ctesibio ha due pistoni a tenuta che scorrono in altrettanti cilindri di bronzo collegati a un tubo di mandata e dotati di valvole che garantiscono un flusso unidirezionale dell'acqua. Alzandosi e abbassandosi alternativamente permettono un flusso continuo di acqua e non più intermittente, come tipicamente avviene nelle pompe a pistone singolo. L'accoppiamento delle valvole al sistema cilindro-pistone, che viene descritto per la prima volta in questo dispositivo, è tuttora in uso. Per le sue caratteristiche, la realizzazione della pompa di Ctesibio richiedeva lavorazioni precise in modo da assicurare una buona tenuta delle valvole e tra pistoni e cilindri. Vitruvio, che cita anche l'impiego di olio lubrificante nella pompa, riporta che ai lavori di Ctesibio sulla pneumatica e sulla costruzione di automi attingono sicuramente Filone di Bisanzio ed Erone di Alessandria.

Filone di Bisanzio (280-220 a.C.)

Fu discepolo di Ctesibio e perfezionò alcune scoperte nell'ambito della pneumatica e della balistica. Nei suoi

scritti, di cui sono giunti a noi solo frammenti, esaminò il principio di funzionamento del sifone impiegandolo in applicazioni che utilizzavano sia aria che acqua. Alcuni di questi sistemi trovavano applicazione in dispositivi adatti a creare giochi ed effetti speciali, tra cui animazioni, in occasione di eventi particolari.

Erone di Alessandria (10-70 d.C.)

È stato un matematico, ingegnere e inventore alessandrino. Fu insegnante di materie tecniche nel Museo di Alessandria, autore della formula che porta il suo nome³, si formò sui testi di Ctesibio e Filone e studiò le opere di Euclide e Archimede. La capacità di armonizzare il sapere acquisito nei secoli precedenti lo fa diventare il maggiore tecnico dell'antichità. A lui si deve l'enunciazione del principio dei vasi comunicanti, le nozioni per costruire i giochi meccanici destinati a *suscitare meraviglia*, tra cui l'eolipila⁴ (che di fatto con la propulsione a getto è anche la prima macchina a vapore), la fontana di Erone e il sifone. Applicò gli studi sull'efflusso all'orologio ad acqua trovando, senza quantificarla, la relazione tra aree delle sezioni, velocità, volume e tempo per determinare la portata di un flusso⁵, confutò il rifiuto aristotelico dell'esistenza del vuoto e postulò che il vuoto potesse sia esistere che essere prodotto artificialmente attraverso una forza sufficientemente intensa, ammettendo che intensa dovesse essere la forza necessaria a

³ La formula di Erone esprime l'area di un triangolo in funzione dei suoi lati e del semiperimetro.

⁴ L'eolipila, o sfera di Eolo, mostra come l'energia termica può essere trasformata in energia meccanica sfruttando la pressione derivante dal riscaldamento di acqua all'interno di una sfera metallica.

⁵ Questa osservazione sarà la base della Legge di continuità o di Leonardo e Castelli.

eliminarlo e introducendo il concetto di *peso dell'atmosfera*. Svolsse numerose ricerche in vari ambiti tra cui l'astronomia, l'ottica e la topografia, inventò dispositivi come la dioptra e l'odometro e fu autore di numerosi trattati, tra cui ebbero grande influenza fino all'epoca rinascimentale *Mechanica*, *Pneumatica* e *Automata*. *Mechanica* è un manuale in tre libri destinato agli architetti e agli ingegneri, *Pneumatica* descrive macchine funzionanti con la pressione di aria, acqua o vapore, *Automata* illustra in dettaglio macchine capaci di creare effetti in diversi contesti d'intrattenimento tramite mezzi meccanici o pneumatici, come teatrini automatici dotati di moto autonomo per tutta la durata dello spettacolo. Erone fu senza dubbio una mente geniale che si trovò a operare in un'epoca ancora non matura e comunque inadatta ad acquisire i suoi contributi. Sostenitore della necessità di una preparazione che comprenda teoria e pratica, diventerà dopo la caduta di Costantinopoli (1453) un importante riferimento per gli scienziati del periodo umanistico-rinascimentale, tra cui Leonardo da Vinci e soprattutto Bernardo Buontalenti per le sue applicazioni idrauliche necessarie alle realizzazioni nel parco mediceo di Pratolino, vicino a Firenze, nella seconda metà del XVI secolo.

Marco Vitruvio Pollione (80-15 a.C.)

È stato un architetto e scrittore romano, attivo nella seconda metà del I secolo a.C., considerato il più famoso teorico dell'architettura di tutti i tempi. Il suo trattato *De Architectura* è stato il fondamento dell'architettura occidentale fino alla fine del XIX secolo. Il libro VIII è dedicato all'idrologia e all'idraulica e si conclude con la trattazione delle condotte per l'acqua, aspetto caro a Vitruvio in quanto, secondo Frontino, collaboratore di

Agrippa quando questi ricopriva la carica di *curator aquarum*, una delle più alte cariche dello Stato che aveva il controllo assoluto sull'approvvigionamento idrico della città di Roma e sulla gestione degli acquedotti. L'appellativo di *Regina aquarum* deriva dal fatto che la storia della città è strettamente legata all'acqua fin dalla sua fondazione. Non deve quindi sorprendere che la maggior parte degli acquedotti romani abbia funzionato a lungo, alcuni fino all'età moderna o addirittura ai giorni nostri, proprio per le caratteristiche costruttive e la manutenzione a cui erano sottoposti. Dei metodi di manutenzione e di costruzione degli acquedotti parla Vitruvio nel *De Architectura*, senza citare i problemi e gli abusi della rete idrica pubblica nella Roma imperiale. Riguardo ai materiali utilizzati nella costruzione delle condutture, in muratura erano gli acquedotti extraurbani, in terracotta le condutture destinate agli usi agricoli, in piombo i tubi per la distribuzione urbana. Per questi ultimi venivano fornite notazioni legate alla nocività del piombo.

La caduta di Bisanzio e la diffusione dei testi classici

Nell'antichità il bisogno di governare le acque fu prevalente sulla necessità di capirne le leggi fisiche, poiché le conoscenze empiriche e la tecnologia disponibile erano sufficienti a soddisfare le esigenze collettive. Alla metà del XV secolo la caduta di Costantinopoli rappresenta la tappa fondamentale per la nascita dell'Umanesimo, del Rinascimento, e per l'inizio dell'età moderna. Secondo la maggior parte degli studiosi, l'importanza complessiva della fase che si apre in questo periodo è superiore a quella rappresentata dalla scoperta dell'America. La cultura bizantina si salva dal possibile scempio da parte dei turchi anche grazie a Manuele Crisolora, che inse-

gnò a Firenze dal 1397 al 1400. Questi anni rappresentano il punto di svolta di uno spostamento del sapere verso l'Italia dell'Umanesimo che andrà avanti per tutto il Quattrocento e di cui sono protagonisti i libri e i personaggi che hanno legato ai libri la loro esistenza. Con la riscoperta dei classici e la nascita dell'Umanesimo si scoprono nuove tecniche architettoniche, conoscenze scientifiche andate perse e molte opere letterarie che spingono verso l'uscita dal teocentrismo medievale e permettono all'individuo di comprendere la sua importanza. Cosimo il Vecchio della famiglia fiorentina dei Medici contribuì a raccogliere molti manoscritti dell'epoca ellenistica di grande importanza e bellezza e a farli assegnare al convento di San Marco (1441).

1.5. Le compagnie di navigazione, gli albori della globalizzazione e l'introduzione di nuove specie vegetali

Con la scoperta dell'America viene fatta iniziare la storia del colonialismo e quindi l'occupazione e lo sfruttamento di territori da parte dei Paesi europei, attività che nel corso dei secoli evolverà fino a diventare il fenomeno della globalizzazione. La via marittima è quella di gran lunga preferita per raggiungere i luoghi fino ad allora inesplorati e perciò nascono le compagnie di navigazione per trasportare quello che viene prodotto o semplicemente si trova nelle colonie. Tra la moltitudine di prodotti che arrivano in Europa, sono soprattutto i portoghesi e gli spagnoli a introdurre nuove colture dalle colonie del Centro e Sud America. Tra queste:

- il mais (*Zea mays*) viene importato da America centrale e Messico. In Italia si comincia a coltivare nel 1554

in Veneto e diventa una coltura importante intorno alla metà del Seicento;

- la patata (*Solanum tuberosum*) proviene dalle Ande di Colombia e Cile. Arriva in Europa alla fine del Cinquecento, ma in Italia comincia a essere coltivata soltanto all'inizio dell'Ottocento;
- il pomodoro (*Solanum lycopersicum*), quasi certamente originario del Perù, in poco tempo si diffonde in Europa, mentre in Italia la coltivazione su larga scala comincia all'inizio dell'Ottocento;
- il peperone (*Capsicum annuum*), diffuso in Messico, Ecuador, Perù e Bolivia dove veniva coltivato da circa settemila anni;
- il fagiolo comune (*Phaseolus vulgaris*), originario del Centro e Sud America, viene importato dagli spagnoli all'inizio del XVI secolo e si diffonde rapidamente in Europa, mentre per la diffusione in Italia occorre aspettare la metà del secolo;
- il tabacco (*Nicotiana tabacum*), introdotto da Jean Nicot (1530-1600) nell'area mediterranea, dove si diffonde rapidamente.

Molte di queste si adatteranno ai nuovi contesti produttivi a condizione che vengano irrigate per produrre in quantità ritenute soddisfacenti.

1.6. La nascita del metodo sperimentale e gli studi sulle acque

Leonardo da Vinci (1452-1519), considerato il genio assoluto essendo eccelso scienziato, inventore e artista, fu profondamente influenzato nella sua formazione scientifica, come lui stesso ammise, dai grandi scienziati del

passato tra cui Archimede, Vitruvio, Euclide ed Erone, i cui insegnamenti si percepiscono nell'approccio di Leonardo alla nascita del metodo sperimentale:

... io tratterò di tali argomenti, ma prima farò molti esperimenti e poi dimostrerò perché i corpi sono forzati ad agire in questo modo. Questo è il metodo che uno deve perseguire nell'investigare i fenomeni della natura. È vero che la natura inizia a ragionare e termina dall'esperienza; ma tuttavia noi dobbiamo portare il modo opposto: come ho detto dobbiamo iniziare con l'esperimento e cercare attraverso esso di scoprire le ragioni... (Rouse, Ince, 1957; Loffi, 2007),

e nella premessa allo studio del moto dell'acqua: «Ricordati che quando parli di correnti d'acqua devi portare prima l'esperienza e dopo la ragione».

Leonardo dimostra grande interesse verso l'acqua e le opere idrauliche e le sue idee rivoluzionarie sulla fluidodinamica si ritrovano nei testi e nei disegni giunti fino a noi. Nell'opera *Del moto e misura dell'acqua*, un trattato in nove parti, affronta argomenti tra cui gli efflussi da fori e aperture e il moto dell'acqua nelle condotte. Per primo descrisse, tra l'altro, la distribuzione della velocità in un vortice, i profili dei getti liberi, il salto idraulico. Tra le numerose osservazioni sul moto dell'acqua nei fiumi, al capitolo 41 del libro ottavo Leonardo scrive:

Il fiume d'equal profondità haverà tanto più fuga nella minor larghezza, che nella maggiore, quanto la maggior larghezza avanza la minore. Questa propositione si prova chiaramente per ragione confermata dall'esperienza [...] altrimenti non sarebbe vera la passata, che dice: che il fiume dà transito in ogni parte della sua larghezza con equal

tempo a equal quantità d'acqua di qualunque larghezza sia il fiume (Di Teodoro, 2022).

L'osservazione della proporzionalità inversa tra velocità della corrente e sezione di passaggio a parità di portata fluente anticipa la formulazione del principio di continuità. Partendo dall'assunto dell'incompressibilità dell'acqua, come Erone osservò correttamente che area della sezione di passaggio e velocità media nella sezione sono tra loro inversamente legate. Analizzando il principio di funzionamento della siringa, osservò che

... le sezioni dell'ugello, attraverso il quale l'acqua fuoriesce, sono cento volte più piccole della sezione principale dello stantuffo; l'acqua fluirà nell'ugello cento volte più veloce del movimento del pistone. Immaginiamo che un secondo pistone, cento volte più piccolo del primo, si opponga al flusso dell'acqua; certo avverrà che la forza che si applica al secondo pistone sia circa uguale alla centesima parte di quella che spinge il pistone largo; e se la forza supera le cento parti, il piccolo pistone avanza e quello grande recede... (Rouse, Ince, 1957; Loffi, 2007).

Questa affermazione contiene di nuovo il principio di continuità, descritto dall'abate *Benedetto Castelli* un secolo dopo⁶, e il principio della trasmissione della forza attraverso la compressione di un fluido, noto come Principio di Pascal, formulato un secolo e mezzo più tardi. Le sue osservazioni vanno perciò considerate novità troppo elevate per la scienza del tempo e anticipatrici di principi e interpretazioni che giunsero molto dopo con Carte-

⁶ Nel suo trattato *Della misura delle acque correnti* del 1628 Castelli enuncia per primo che «la velocità delle acque correnti diminuisce col crescere della sezione nella quale esse acque defluiscono».

sio, Pascal, Huygens e Galileo, contribuendo a costruire le basi per i grandi progressi del XVII e XVIII secolo. Nel problema dell'efflusso, cioè dell'uscita di un fluido da un recipiente attraverso fori praticati nella sua parete e posti a differenti profondità rispetto al pelo libero⁷, Leonardo incorse nell'errore di considerare che la velocità di efflusso dipendesse direttamente dal valore del carico idraulico⁸ e non dalla radice quadrata dello stesso, come dimostrato da Torricelli un secolo dopo.

1.7. La specializzazione delle professionalità e la diffusione del sapere

I principi tramandati dalla scuola ellenistica vengono descritti in modo chiaro, ma la mancanza delle relazioni matematiche tra le grandezze che caratterizzano i fenomeni osservati ne limita le possibilità applicative, vincolandole alla disponibilità dei testi e soprattutto alla loro comprensione.

Il rinnovamento culturale che caratterizza il Rinascimento si manifesta anche attraverso lo studio dei classici che all'occorrenza vengono tradotti per costruzioni meccaniche e idrauliche realizzate quasi esclusivamente in ambito residenziale o paesaggistico, ma non agricolo. È il caso dei testi di Erone, *Meccanica* e *Pneumatica*, dapprima tradotti in latino nel 1575 e poi in italiano nel 1582 su richiesta di Bernardo Buontalenti per procedere con le realizzazioni nel giardino della villa di Pratoli-

⁷ Argomenti tipici della foronomia.

⁸ Lo stesso errore fu commesso da Carlo Fontana (1638-1714), architetto, scultore, ingegnere, nel suo *Utilissimo trattato dell'acque correnti* quando afferma che «Nel fine precipizio dell'acque incondottate, hanno esse Acque doppia velocità di quella, che è a mezz'altezza».

no vicino a Firenze, tutte legate all'uso dell'acqua, dai giochi fino agli spettacoli prodotti da automi.

Il flusso di visitatori animati dalla curiosità verso i rinnovamenti rinascimentali crea le condizioni per scambi culturali in Europa tanto che alla fine del XVI secolo si assiste all'inizio della mobilità delle maestranze artigiane, tra cui fontanieri e idraulici, fra le corti europee. Questo comporta una crescente diffusione di modelli stilistici e tecnologie su scala internazionale.

1.7.1. La nascita delle Accademie e la ricerca dal XVII al XIX secolo

Più o meno nello stesso periodo si assiste alla nascita delle Accademie e della comunità scientifica che, con il rapido sviluppo della stampa, creano le condizioni per una diffusione sempre più rapida delle riviste scientifiche e della letteratura tecnica specialistica, dando forma alla moderna scienza idraulica. Oltre alle conoscenze descrittive dei principi di fisica e meccanica legate alla tradizione greco-romana, diventa sempre più stringente la necessità di una maggiore comprensione delle proprietà fisiche degli elementi, in particolare dell'acqua, in modo da svelare gli aspetti quantitativi dei fenomeni naturali e artificiali (come gli artifici d'acque) attraverso le leggi fondamentali della meccanica dei fluidi, fino a «plasmare a proprio piacimento la materia liquida».

La scienza idraulica moderna muove i passi anche da questi presupposti e *Agostino Ramelli* (1531-1608) ne è un esempio. Ingegnere, scrisse un unico testo dal titolo *Le diverse et artificiose machine del Capitano Agostino Ramelli Dal Ponte Della Tresia Ingegniero del Christianissimo Re di Francia et di Pollonia: nelle quali si contengono varij et industriosi Movimenti, degni di grandissima speculatione, per carvarne beneficio infinito in ogni sorte d'operatione* pubblicato

a Parigi nel 1588. È costituito da 195 capitoli, ciascuno con l'illustrazione e la descrizione, in francese e in italiano, di una diversa macchina, nella maggioranza dei casi adatta al sollevamento dell'acqua. Tra queste, oltre a norie, viti di Archimede e una grande varietà di pompe, illustra un'ingegnosa pompa rotativa ideata da lui stesso. Fu un testo di riferimento, poiché le macchine di Ramelli usano tutti i tipi di ingranaggi che sarebbero stati usati nei secoli successivi, oltre a vari tipi di valvole.

Il XVII secolo

La ricerca nell'ambito dell'idraulica progredì grandemente nel secolo XVII. *Galileo Galilei* (1564-1642) avviò l'interpretazione scientifica dei concetti eroniani e contribuì allo sviluppo della meccanica dei fluidi. Come previsto dal cosiddetto metodo scientifico, Galileo sosteneva che, ai fini della riproducibilità della sperimentazione e delle relative misure al variare del tempo e dei laboratori, si dovevano stabilire le unità standard delle grandezze lunghezza e tempo, cosa che formò la base su cui confermare le leggi matematiche tramite il ragionamento induttivo. Osservò che nel metodo scientifico sono necessarie esperienza e dimostrazione. *Evangelista Torricelli* (1608-1647) condusse studi sulla pressione e gli strumenti per la sua misura, sulla velocità di caduta, sul peso dell'aria da cui la dimostrazione che il moto dell'acqua avviene per effetto di una spinta e non per trazione (errore in cui era caduto anche Galileo). *Blaise Pascal* (1623-1662) contribuì fortemente allo studio dell'idrostatica e dell'idrodinamica e approfondì i concetti espressi da Torricelli sulla pressione, per la quale formulò l'omonimo principio riferito ai liquidi incompressibili, quindi ideali, e applicato nella pressa idraulica di sua invenzione. Riuscì a dimostrare l'esistenza del vuoto.

to, confutando il pensiero della fisica antica che lo negava. *Edme Mariotte* (1620-1684) fu uno dei più grandi ricercatori nella sperimentazione idraulica, con particolare riguardo alle correnti a superficie libera, e fu tra i fondatori della fisica sperimentale in Francia, dove condusse studi di meccanica che portarono all'enunciazione dell'omonima formula⁹. Fondamentali furono gli studi sulle proprietà elastiche dei gas da cui la legge di Boyle-Mariotte. *Salomon de Caus* (1576-1626) fu architetto e ingegnere idraulico, compì un viaggio in Italia a fine secolo XVI durante il quale visitò i giardini di Villa d'Este a Tivoli e di Pratolino, raccogliendo una dettagliata documentazione su quanto osservato. La sua pubblicazione più rilevante nell'ambito dell'idraulica è *Les raisons des force mouvantes*, un manuale dove espone i principi su cui erano basati i funzionamenti di automi, fontane e scherzi d'acqua nel giardino del XVII secolo. Più in generale, tratta i meccanismi che caratterizzavano gli impianti idraulici dei giardini rinascimentali italiani derivati dai testi di Archimede, Filone, Vitruvio e, soprattutto, dalle opere appena rieditate di Erone di Alessandria. Sulle condotte, de Caus pone attenzione alla necessità di scegliere i materiali costruttivi, tra legno, terracotta e piombo, in relazione alla provenienza dell'acqua, ai tipi di tracciato e alle pressioni che possono verificarsi lungo il percorso (Tolle-Kastenbein, 2005). Inoltre, in caso di condotte molto lunghe suggerisce di realizzare pozzi di ispezione e areazione a intervalli di 400-800 metri, in modo da facilitare l'individuazione di guasti e la successiva riparazione, oltre a evitare pressioni eccessive in condotta. Per garantire le migliori condi-

⁹ «Formula di Mariotte» è il nome che in Italia si assegna alla formula della tensione circonferenziale primaria nei gusci cilindrici.

zioni di flusso dell'acqua suggerisce inoltre, con raffigurazioni molto chiare, l'utilità di sfiatatoi da posizionare nelle parti della condotta dove potrebbe accumularsi aria e di valvole di spurgo nelle zone più basse in modo da rimuovere impurità accumulate (Cavagnero *et al.*, 2009). *Christiaan Huygens* (1629-1695) fu fisico, astronomo e matematico. Condusse studi sulla caduta dei corpi, studiò il principio della forza centrifuga e la legge del moto oscillatorio. Fu il primo direttore della Académie Royale des Sciences.

Del lavoro di questi scienziati, e di altri che hanno operato nello stesso secolo, beneficeranno anche quelli che popoleranno il successivo secolo dei lumi.

Il XVIII secolo

L'illuminismo, che abbraccia quasi tutto il secolo, porta alla scoperta delle leggi naturali e ciò rappresenta una rivelazione o «illuminazione» che alimenta la fiducia nell'intelligenza degli esseri umani. I personaggi di scienza sono artefici di scoperte che a tutt'oggi rappresentano l'asse portante della scienza idraulica contemporanea e delle sue applicazioni. Tra i più rappresentativi si ricordano *Isaac Newton* (1642-1726), forse il più grande scienziato di tutti i tempi e scopritore della legge della gravitazione universale e di quelle del moto che ne conseguono. Nello studio dei fluidi si definiscono newtoniani quelli la cui viscosità non varia al variare dello sforzo di taglio che viene applicato e quindi della velocità a cui sono sottoposti. Di conseguenza, i fluidi newtoniani hanno un valore definito di viscosità. *Bernard Forest Bélidor* (1697-1761) fu ingegnere militare e il suo lavoro più famoso, *L'architecture hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*, pubblicato per la prima volta nel 1737 e considerato

il primo vero trattato di ingegneria moderna, è una guida completa alla gestione e alla realizzazione di opere idrauliche come pozzi, canali, acquedotti e getti d'acqua, dove il calcolo integrale viene utilizzato per la prima volta nella risoluzione di problemi tecnici. Nel tomo II, libro IV, capitolo 3, Bélidor tratta anche il problema delle perdite di carico, distribuite e concentrate, e il loro non trascurabile effetto sulle altezze dei getti. Riguardo alle perdite di carico distribuite, si limita a constatarne la proporzionalità con la sola lunghezza della condotta e riporta prove di studiosi suoi contemporanei che le quantificavano in 0,325 m ogni 195 m di condotta. Sulle perdite concentrate osserva che i diversi tipi che si possono incontrare lungo il percorso della condotta, come curve, diramazioni e imbocchi, possono assumere valori rilevanti e che, a differenza di quanto sostenuto da Mariotte, non possono essere calcolate rispetto alla sola differenza di quota e alla corrispondente lunghezza della condotta (Cavagnero *et al.*, 2009). *Daniel Bernoulli* (1700-1782) fu matematico e fisico. Considerato il padre dell'idrodinamica, formulò l'omonima equazione che esprime il principio di conservazione dell'energia meccanica, la legge più importante della fluidodinamica¹⁰, esposta in *Hydrodinamica*, la sua opera più conosciuta. *Jean-Baptiste d'Alembert* (1717-1783) fu matematico, fisico, astronomo, filosofo ed enciclopedista. Studiò l'equilibrio dei sistemi in movimento e formulò l'omonimo principio. Fu tra i primi a occuparsi del calcolo alle derivate parziali, per i cui risultati fu chiamato con Denis Diderot a dirigere l'*Encyclopédie*. An-

¹⁰ Per un fluido ideale e incompressibile in moto stazionario, la somma dell'energia potenziale, cinetica e di pressione si mantiene costante lungo tutto il percorso.

toine Chézy (1718-1798) fu ingegnere e fisico. Elaborò l'omonima formula matematica tuttora utilizzata nell'ambito dell'ingegneria idraulica per calcolare la velocità di una corrente a pelo libero in moto uniforme e principalmente turbolento, la cui applicazione è stata estesa alle correnti in pressione.

Il XIX secolo

Se nel XVIII secolo erano state poste le basi per l'idraulica come oggi la conosciamo, in quello successivo si percorrono passi importanti soprattutto nell'ambito dell'idrodinamica. *Jean Poiseuille* (1799-1869), medico, fisiologo e fisico, fu autore di molte ricerche sul cuore e sulla dinamica circolatoria, in particolare sul moto del sangue nei capillari tramite strumenti da lui ideati. I suoi studi sulla viscosità furono di grande importanza nell'ambito della meccanica dei fluidi e dell'idraulica. *Henry Darcy* (1803-1858), ingegnere, diede importanti contributi all'idraulica, come la formulazione dell'omonima legge sullo studio del flusso attraverso mezzi porosi, gli studi sulle perdite di carico distribuite in tubi non lisci e in condizioni di moto uniforme, il miglioramento del design del tubo di Pitot nella forma utilizzata oggi. *Julius Weisbach* (1806-1871), matematico e ingegnere, condusse nell'ambito dell'idraulica studi sulle perdite di carico nelle condotte, sull'influenza della velocità di arrivo sulla portata di una bocca e sui getti, perfezionò le conoscenze disponibili attraverso il suo lavoro sperimentale al punto che alcuni dei suoi dati sono tuttora utilizzati. *Osborne Reynolds* (1842-1912), fisico e ingegnere, si occupò di idraulica e di idrodinamica e fondamentali furono i suoi studi sulle pompe rotative e sul moto dei fluidi reali, per i quali distinse un moto laminare e un moto vorticoso o turbolento. Il suo nome è legato al

cosiddetto numero di Reynolds, che per ogni situazione sperimentale assume un valore critico per il quale il fluido passa dal moto laminare al moto turbolento.

1.7.2. I trattatisti

Nel XVIII secolo si assiste a fenomeni che ne descrivono la portata su tutti i fronti della società: da un lato l'intensità del progresso scientifico rendeva difficoltoso definire lo stato dell'arte nei diversi settori che ne beneficiavano, dall'altro l'avversione da parte di alcuni ambienti alla cultura e al sapere come vettori di progresso e di libertà politica e culturale.

Quello che accadde ad Antoine Joseph Dezallier d'Argenville è emblematico delle difficoltà derivanti dalla rapidità della crescita delle conoscenze, mentre quello che può essere considerato il primo esempio di Enciclopedia ha dovuto subire le ingerenze e le persecuzioni dei poteri ostili alla libera critica e al progresso delle scienze.

Antoine Joseph Dezallier d'Argenville (1680-1765), naturalista e storico dell'arte, si propose di scrivere un compendio che intitolò *La théorie et la pratique du jardinage*. Per l'esigenza imposta dai continui aggiornamenti richiesti, l'opera fu pubblicata in più edizioni dal 1709 al 1747 ed è considerata la più importante guida alla progettazione del giardino formale francese. L'ultima edizione contiene nozioni di idraulica che, rispetto alle precedenti versioni, vengono ampliate e strutturate organicamente al punto da farne un vero e proprio *Trattato di idraulica ad uso dei giardini*. Qui Dezallier fornisce indicazioni pratiche su metodi e relazioni per il calcolo delle portate, delle velocità dell'acqua e delle pressioni richieste per ottenere zampilli dell'altezza desiderata, sull'individuazione di sorgenti e sulle modalità di costruzione degli acquedotti in modo da garantirne il cor-

retto funzionamento in termini di continuità del flusso e sufficiente pressione per il funzionamento di fontane e zampilli senza dover fare ricorso all'uso di pompe, quelle ideate all'inizio del Settecento durante la prima rivoluzione industriale e a cui nel *Trattato* attribuisce la maggiore importanza tra tutte le macchine.

L'*Encyclopédie des sciences*, elaborata da Diderot e d'Alembert e anch'essa risalente al XVIII secolo, può essere considerata il primo esempio enciclopedico nonché uno dei primi grandi manifesti rappresentativi dell'illuminismo europeo. È un'opera che privilegia l'aspetto pratico e sperimentale del sapere e che si ispira a padri della rivoluzione scientifica quali furono Galileo, Newton e Huygens. Il lavoro è costituito da 17 volumi di voci e 11 di tavole illustrate, iniziato nel 1751 e completato nel 1772, dopo battute d'arresto imposte dai poteri contrari alla diffusione di una visione del mondo laica e moderna.

2. Dalla rivoluzione francese ai giorni nostri

2.1. L'uso dell'energia nel sollevamento idraulico

Con la tecnologia dell'epoca era poco redditizio sfruttare l'energia cinetica dell'acqua fluente per l'azionamento delle pompe. Il lavoro che se ne poteva ricavare era relativamente modesto, a fronte della complessità e costosità delle macchine e alla difficoltà del trasporto dell'energia catturata. La Macchina di Juanelo Turriano¹¹ (XVI

¹¹ Era il nome di un dispositivo complesso costruito a Toledo nel XVI secolo da Juanelo Turriano. Fu progettato per fornire acqua alla città sollevandola dal fiume Tago fino all'Alcázar.

secolo) detta *Artificio de Juanelo* e la *Machine de Marly*¹² ne sono esempi eclatanti.

Il carbone come combustibile solido è utilizzato sin dal 1500 a.C., ma a partire dal tardo Medioevo il suo utilizzo comincia crescere nei Paesi Bassi e in Inghilterra, fino a diventare la principale fonte della produzione energetica mondiale con la rivoluzione industriale (1760-1840). Dal momento che l'attività estrattiva può portare a intercettare falde acquifere profonde e impossibili da drenare con gli strumenti tradizionali, diventa necessario il sollevamento meccanico dell'acqua tramite pompe da azionare con l'energia del carbone stesso.

I dispositivi azionati a vapore, come l'eolipila di Eronne, erano conosciuti fin dal I secolo d.C., e nel XVI secolo furono impiegati per altri usi tra cui giochi e animazioni.

Nel 1606 Jerónimo de Ayanz y Beaumont brevettò la prima pompa a vapore per il drenaggio delle miniere, ma fu soltanto con l'introduzione di perfezionamenti alle guarnizioni di tenuta verso la fine del secolo che le pompe alternative a stantuffo divennero effettivamente di tipo aspirante-premente. Le prime ad azionamento meccanico tramite vapor d'acqua, ideate e costruite da Denis Papin nel 1687, erano formate da due stantuffi di diametro diverso, montati alle estremità della stessa asta in modo che su uno agisse la pressione del vapore e l'altro provvedesse allo spostamento dell'acqua. Allo stesso Papin si attribuisce un esemplare di pompa centrifuga costruito nel 1705 con pale giranti piatte e radiali contenute in una voluta a spirale. Fu Thomas Savery nel 1698

¹² Rappresenta il primo tratto di un sistema idraulico costruito per prelevare l'acqua dalla Senna e portarla alla reggia di Versailles per alimentare le numerose fontane e i giochi d'acqua della reggia.

a costruire la prima macchina a vapore per sollevare le acque di scavo nelle miniere di carbone, brevettandola nel 1705. La macchina utilizzava la condensazione del vapore per creare un vuoto che faceva sollevare l'acqua dal basso e la rilanciava ancora più in alto utilizzando la pressione del vapore in espansione. L'altezza di sollevamento era tuttavia limitata a meno di 10 metri e le maggiori pressioni del vapore necessarie a sollevamenti superiori determinavano frequenti esplosioni delle caldaie. In seguito Savery, grazie al brevetto, collaborò con Thomas Newcomen alla realizzazione, nel 1712, delle prime macchine con motore a condensazione interna in grado di trasmettere potenza continua.

Nel 1764 James Watt migliorò significativamente il rendimento del sistema raccogliendo il vapore esaurito in un recipiente separato dove veniva condensato (condensazione esterna), evitando così il raffreddamento del cilindro motore. I motori di Newcomen e Watt erano entrambi alimentati dalla pressione dell'aria che spingeva un pistone nel vuoto parziale generato dalla condensazione del vapore, invece della pressione del vapore in espansione. I cilindri e i pistoni del motore dovevano essere grandi perché su di essi agiva soltanto la pressione atmosferica.

I tentativi di produrre pompe rotative capaci di sostituire quelle a pistoni si succedettero senza successo fino alla metà del XIX secolo, quando Osborne Reynolds introdusse i palettaggi diffusori e la sagomazione a voluta spirale della cassa. L'innovazione rappresentò lo spunto per l'evoluzione delle pompe a giranti palettate, sia mono che multi-stadio, avvenuta parallelamente all'introduzione e al perfezionamento dei motori elettrici e delle turbine a vapore per il loro azionamento. Nel XX secolo il campo di applicazione delle pompe si è note-

volmente esteso con quelle a palettaggi elico-assiali (Medici, 1967).

2.2. L'elettricità e lo sfruttamento della risorsa idrica per uso energetico. Il secolo delle grandi dighe

L'utilizzo del carbone per produrre vapore aveva diversi inconvenienti tra cui il basso rendimento complessivo, un impatto pesante sull'ambiente e l'impossibilità di trasportare l'energia prodotta su grandi distanze. Con la prima Mostra internazionale dell'elettricità che si svolse a Parigi nel 1881 si compresero le potenzialità offerte da questa forma di energia, che veniva prodotta sfruttando la velocità dell'acqua in caduta secondo la trasformazione dell'energia da potenziale a cinetica passando per quella di pressione all'interno delle condotte forzate che collegavano l'invaso in quota alle turbine posizionate nelle centrali idroelettriche. A differenza dell'energia prodotta con i combustibili fossili, quella elettrica generata con l'acqua è rinnovabile.

Per i Paesi che disponevano di acqua per caduta si trattò di una coincidenza fortunata, considerato che il processo di industrializzazione, fortemente energivoro, stava crescendo rapidamente e che per alcuni Paesi, tra cui l'Italia, l'uso del carbone era sempre meno conveniente perché doveva essere importato a costi anche tre volte superiori ai prezzi praticati nei Paesi produttori. Si giunse perfino a definire l'acqua «carbone bianco» per esaltarne l'importanza energetica. In Italia, «uno dei Paesi più ricchi di alte cadute», il *cammino elettrico* inizia nel 1895 con la realizzazione delle prime centrali idroelettriche italiane sui corsi d'acqua alpini. Inizialmente non si disponeva di energia elettrica ad alta tensione e le reti

erano di conseguenza di sola distribuzione, con le centrali che si trovavano vicino ai grandi centri di consumo.

Con la possibilità di operare ad alta tensione si otteneva il vantaggio sia di trasferire l'energia su distanze elevate e con minori sprechi per dissipazione da effetto Joule, sia di costruire le centrali idroelettriche in zone dove i salti erano più elevati. Alla vigilia della Prima guerra mondiale l'Italia era quinta per consistenza degli impianti elettrici (dopo USA, Germania, Gran Bretagna e Francia) e prima in Europa per potenza idroelettrica. La guerra penalizzò i processi estrattivi del carbone e perciò le centrali idroelettriche lavorarono al limite delle potenzialità, cosa che portò a costruirne di nuove e gli ingegneri italiani a diventarne maestri. Fino a tutti gli anni Cinquanta, la produzione energetica italiana fu quasi esclusivamente idroelettrica e nel 1962 venne costituito l'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica (ENEL) che assorbì 1.270 imprese elettriche.

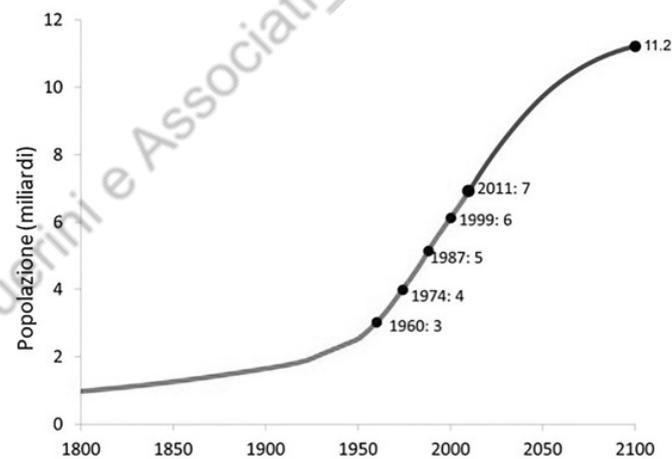
Mentre in Europa la costruzione di dighe per uso idroelettrico continuava a crescere anche nel secondo dopoguerra per le ovvie necessità di ricostruzione, negli USA lo slancio in questa direzione si affievolì dopo la costruzione della diga Hoover sul fiume Colorado, completata nel 1936 con la formazione del lago Mead, a tutt'oggi il massimo invaso del Paese.

2.3. Il crescente bisogno di energia, i combustibili fossili e l'acqua per l'irrigazione

In realtà il fabbisogno energetico stava crescendo in tutto il mondo e negli Stati Uniti la richiesta veniva soddisfatta sempre di più attraverso il ricorso al petrolio che diventò perciò un vero e proprio modello di sviluppo.

All'inizio del XX secolo il petrolio forniva ancora solo il 10% circa dell'energia prodotta al mondo, ma verificata la sua validità economica ed energetica sui motori a combustione interna con i suoi derivati, la benzina e il diesel, altri usi si aggiunsero nei decenni successivi, in un crescendo inarrestabile che portò a una rapidità dello sviluppo dell'economia globale, soprattutto dopo la Seconda guerra mondiale, altrimenti impossibile. L'agricoltura ne trasse vantaggio perché si favorì la meccanizzazione di gran parte delle operazioni tradizionali, con il risultato di ottenere maggiori produzioni di cibo e a più basso costo, cosa che si tradusse in un incremento del benessere generale e una corrispondente esplosione del tasso di crescita della popolazione nell'immediato secondo dopoguerra (figura 1.7).

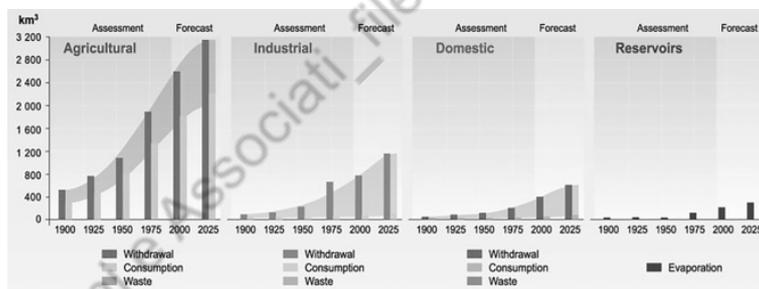
Figura 1.7 - Popolazione mondiale fino al 2100, variante di fertilità media



Fonte: UN World Population Prospects: 2015 revision (modif.)

La ripresa industriale, il miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie e nutrizionali, con diete sempre più diversificate e ricche di prodotti di origine animale in gran parte consentite dalla Rivoluzione Verde, insieme al cambiamento degli stili di vita sono gli elementi che hanno giocato un ruolo determinante sull'incremento del prelievo idrico globale, che ha nella popolazione il maggior fattore di pressione sulla risorsa. Poiché ogni settore produttivo necessita di acqua per funzionare, come avviene per la popolazione anche per l'acqua si osserva un incremento significativo degli usi a partire dal secondo dopoguerra, con l'agricoltura che è di gran lunga il maggiore destinatario del prelievo (figura 1.8).

Figura 1.8 - Stima del consumo annuo mondiale di acqua per settore nel corso del XX secolo



Fonte: UNEP, 2022 (modif.)

2.4. Le materie plastiche (PE e PVC) e l'energia a basso costo La diffusione delle pompe centrifughe

Il grande impulso che nel secondo dopoguerra si ha nel campo dell'irrigazione fu senz'altro dovuto anche all'uso civile delle scoperte dettate dalle esigenze militari.

Questo collegamento non è nuovo, come dimostrato dai molti miglioramenti della tecnologia idraulica che nel corso dei secoli aveva beneficiato dei perfezionamenti introdotti dall'industria bellica, come ad esempio le lavorazioni sempre più precise della componentistica dei sistemi di sollevamento, tra cui condotte, valvole, pistoni ed elementi di tenuta. Più in generale, si osserva come l'evoluzione tecnologica dell'irrigazione giunga quasi sempre «per caduta» da altri settori produttivi, quando il costo dell'innovazione stessa diventa accessibile. Ne sono dimostrazione le tecnologie satellitari e le interconnessioni gestite dall'intelligenza artificiale che caratterizzano l'irrigazione 4.0.

Il Novecento è anche il secolo della plastica. Nel 1907 si ottiene la bakelite, che per molti anni sarà la materia plastica più utilizzata. Nel 1912 viene scoperto il processo per la produzione del polivinilcloruro (PVC), mentre nel 1913 si ha l'invenzione del cellophane, il primo materiale flessibile, trasparente e impermeabile che trova subito applicazione nel campo dell'imballaggio. Negli anni che precedono e comprendono la Seconda guerra mondiale si concretizza il passaggio verso la moderna industria della plastica, di cui il petrolio diviene la materia prima necessaria alla produzione. Nel 1933 viene sintetizzato quasi casualmente il polietilene (PE), la plastica destinata a diventare quella maggiormente prodotta. Inizialmente il processo produttivo richiedeva pressioni di circa 1.400 bar a temperature di 170 °C, condizioni difficili sia per il costo energetico che per i macchinari dell'epoca che tuttavia non rallentarono la rapida crescita della domanda. Nel 1935 viene sintetizzata la poliammide (nylon), nel 1941 viene brevettato il polietilene tereftalato (PET) e nel 1957 verrà prodotto industrialmente il polipropilene (PP). Nel 1953 viene messo

a punto un procedimento per produrre i materiali termoplastici (PE e PP) a pressione meno elevata e con una migliore qualità e maggiore resistenza.

Parallelamente migliorano le tecniche di lavorazione, a partire da quelle di stampaggio e di estrusione. La tecnologia per la trafilatura dei tubi, introdotta intorno alla metà del XIX secolo per l'estrusione del rivestimento dei cavi sottomarini, era applicata a macchine che funzionavano grazie all'azione di un pistone idraulico per il trasporto del materiale alla filiera. Il processo produttivo era lento e limitato a lunghezze discrete e così negli anni Trenta del XX secolo la trafilatura a pistone fu sostituita con gli estrusori a vite.

Dopo la Seconda guerra mondiale, con lo sviluppo dei materiali termoplastici l'estrusione diviene la tecnologia più utilizzata per la lavorazione delle materie plastiche. Nel tempo migliora la qualità dei macchinari e di tutti gli elementi coinvolti nel processo produttivo che raggiunge così alti valori di efficienza e continuità produttiva, aspetti che ne consentono la riconosciuta convenienza economica.

Il PE è molto diffuso nell'impiantistica per l'irrigazione e trova larga applicazione nella costruzione di raccorderie e di condotte, disponibili in una grande varietà di forme e dimensioni, leggere, resistenti, di lunga durata, economiche e facili da trasportare.

Il polietilene viene attualmente prodotto in tre diverse qualità: alta densità (HD-PE), bassa densità, ramificato (LD-PE) e bassa densità, lineare (LLD-PE).

Nell'immediato dopoguerra la crescente disponibilità di energia a basso costo, sia da fonti rinnovabili che fossili, e di materie plastiche adatte al convogliamento di acqua su lunghe distanze in modo efficiente (senza perdite) e a pressione superiore a quella atmosferica, insieme

alla crescente industrializzazione delle produzioni creano le condizioni per l'utilizzo su larga scala delle pompe centrifughe per l'irrigazione agricola. In questo modo si può passare dai tradizionali metodi di superficie o gravitazionali, caratterizzati da alte portate richieste e corrispondenti basse efficienze d'uso dell'acqua, ai nuovi metodi in pressione, con l'acqua che viene trasportata in piccole portate in corrispondenza del punto di utilizzo.

Questa condizione crea i presupposti per la moderna irrigazione, caratterizzata da prestazioni impiantistiche adatte a conseguire elevati valori di efficienza d'uso dell'acqua. Tuttavia, come spesso accade con l'introduzione di tecnologie più efficienti e complesse, l'incremento della loro diffusione porta a un maggior consumo totale di risorsa¹³, a cui spesso si accompagnano valori di efficienza largamente inferiori a quanto potenzialmente consentito a causa di un uso non corretto delle tecnologie stesse.

2.5. *L'esplosione demografica e la Rivoluzione Verde*

Negli anni Quaranta del XX secolo, gli studi del genetista Norman Borlaug, premio Nobel per la Pace nel 1970,

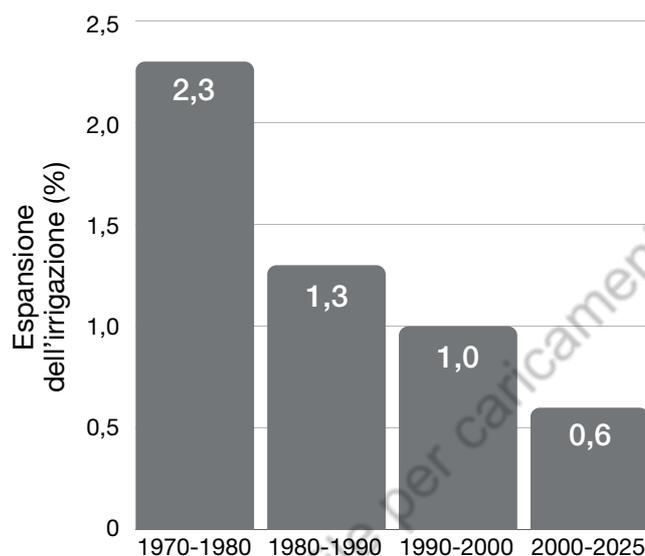
¹³ È il cosiddetto paradosso di Jevons, secondo cui l'aumento di efficienza si traduce in una diminuzione di costi e, quindi, in un aumento dei consumi. Il paradosso fu enunciato nel 1865 da William Stanley Jevons nel libro *The Coal Question*, osservando che il consumo di carbone in Inghilterra era cresciuto dopo che James Watt aveva migliorato l'efficienza del motore di Thomas Newcomen facendo condensare il vapore esausto esternamente al cilindro motore. Le innovazioni di Watt resero il carbone una fonte di energia più redditizia e questo ne determinò un consumo maggiore pur essendo diminuito il consumo unitario, cioè quello necessario a produrre lo stesso lavoro.

portarono a nuove varietà di frumento e mais che, oltre a essere molto più produttive di quelle esistenti, erano anche più adatte alla raccolta meccanizzata.

Nell'immediato dopoguerra le nuove tecnologie produttive, che contemplavano l'uso di fertilizzanti, pesticidi e acqua di irrigazione, furono inizialmente esportate in India e Pakistan e successivamente si diffusero in tutto il mondo pur se con risultati diversi tra regioni. La produzione mondiale di cereali raddoppiò rapidamente, consentendo una drastica riduzione della sottonutrizione e aumentando la sicurezza alimentare. L'incremento delle rese e l'adattamento alla meccanizzazione dei nuovi ibridi richiese un uso crescente sia di macchine agricole, sia di prodotti chimici che dovevano anche compensare la progressiva perdita di fertilità dei suoli. Tutto ciò rendeva l'irrigazione una pratica imprescindibile per il sostegno della produzione. Questi tratti definiscono a grandi linee la cosiddetta Rivoluzione Verde, che nasce intorno agli anni Sessanta del Novecento ed evolve in una parabola che ha il suo apice delle produzioni ad ettaro dei cereali intorno alla metà degli anni Settanta, per poi decrescere drammaticamente all'inizio degli anni Novanta. Nello stesso periodo la superficie coltivata cresce con la messa a coltura di terre progressivamente sempre più marginali, fino a contrarsi alla fine del secolo (figura 1.9).

Tra le cause dell'inversione di tendenza vi è la perdita di fertilità dovuta a salinizzazione e *waterlogging* e il maggior valore ottenuto dal cambio nella destinazione d'uso da agricolo a edificabile (Lasserre, 2004). Quel mezzo secolo di produzione ha comportato un uso crescente dei combustibili fossili, un prelievo talvolta smodato di acqua per l'irrigazione e un conseguente progressivo inquinamento di suoli e falde acquifere, soprattutto nel-

Figura 1.9 - Incremento delle terre irrigate negli ultimi cinquant'anni



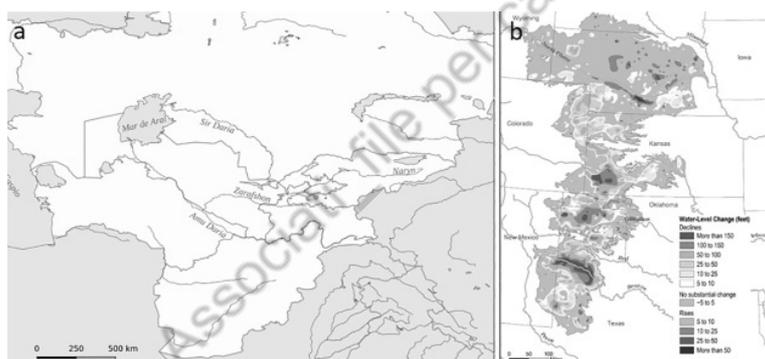
Fonte: ICID, 2013

le aree dove veniva praticata la monocoltura. L'aumento della produzione ad ogni costo non solo non è riuscito a eliminare la fame nel mondo, con gli oltre 800 milioni di persone tuttora sottonutrite secondo l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), ma ha creato il paradosso di un'espansione globale di obesità nell'Occidente del mondo. Oggi la Rivoluzione Verde deve affrontare i temi dell'agricoltura sostenibile e perciò è associata alla Transizione Ecologica, un pilastro del progetto Next Generation EU.

2.6. L'irrigazione come fattore produttivo. Il lago d'Aral e l'acquifero dell'Ogallala

È evidente come lo sfruttamento intensivo delle risorse vada contro i Sustainable Development Goals lanciati dall'ONU nel 2015 e che la tanto invocata resilienza debba muoversi all'interno di nuovi paradigmi che facciano tesoro degli errori passati. I casi del lago d'Aral (figura 1.10a) e della falda Ogallala (figura 1.10b) sono emblematici.

Figura 1.10 - Il lago d'Aral e i suoi affluenti (a) e la falda Ogallala (b)



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aral_map.png#/media/File:Aral_map-es.svg (a); <https://www.climate.gov/news-features/featured-images/national-climate-assessment-great-plains%E2%80%99-ogallala-aquifer-drying-out> (b)

Fino al 1960 il lago d'Aral, chiamato anche mare d'Aral perché le sue acque erano salate, era tra i quattro laghi più grandi del mondo. Si trova in Asia centrale al confine tra Uzbekistan e Kazakistan, non ha emissari ed era alimentato da due fiumi, l'Amu Darya e il Syr Darya, che nascono nella regione del Pamir e che con i loro bacini

idrografici coinvolgono anche i territori di Turkmenistan, Tajikistan e Kirghizistan.

Durante la guerra fredda fu deviato il corso dei due fiumi in modo da irrigare i campi con le nuove coltivazioni intensive di cotone, allo scopo non nascosto di danneggiare il mercato del cotone americano. La riduzione della portata in arrivo al lago si tradusse in una diminuzione della sua superficie che nel tempo si è ridotta del 75% rispetto alla sua estensione originale. Oltre a questo, la monocoltura del cotone ha richiesto dosi crescenti di prodotti chimici che hanno portato a un accumulo irreversibile di polveri inquinanti sul fondo del lago, oltre alla contaminazione delle sue acque.

Più o meno nello stesso periodo le Grandi Pianure situate al centro degli Stati Uniti stavano attraversando una fase di spopolamento dovuta alle difficili condizioni climatiche culminate con un periodo di siccità che durò per tutti gli anni Trenta. Negli anni Cinquanta fu scoperta nella regione la falda dell'Ogallala, un acquifero fossile esteso su circa 450.000 km² e 300 m di profondità che interessava Colorado, Kansas, Nebraska, Oklahoma, South Dakota, Texas e Wyoming.

Questa enorme massa d'acqua fu prontamente utilizzata anche per le produzioni agricole, al punto da trasformare le stesse pianure da Dust Bowl in territori altamente produttivi grazie all'introduzione di sistemi di irrigazione su larga scala.

Specularmente alla produzione russa di cotone, fu avviata una produzione di grano su larghissima scala con finalità che non escludevano le lotte commerciali della guerra fredda. Fornendo quasi un terzo dell'acqua per l'irrigazione degli Stati Uniti, i prelievi superarono ben presto e di gran lunga la capacità di ricarica al punto che l'abbassamento della falda superò i 70 m in alcu-

ne zone. Secondo *Mission 2012 Clean Water*¹⁴, uno studio del Massachusetts Institute of Technology, l'attuale tasso di prelievo dall'acquifero è troppo alto per essere sostenuto nei prossimi decenni e il suo riempimento richiederebbe migliaia di anni nel caso venisse esaurito.

Per fronteggiare i rischi connessi al prelievo vengono attuati provvedimenti e politiche che variano da Stato a Stato. Diversamente dal lago d'Aral, la situazione dell'Ogallala appare meno drammatica, ma entrambi i casi dimostrano sia la fragilità dell'equilibrio degli ecosistemi sotto l'azione antropica, sia l'impatto irreversibile che può produrre un uso inappropriato dell'irrigazione.

2.7. I nuovi sistemi di irrigazione

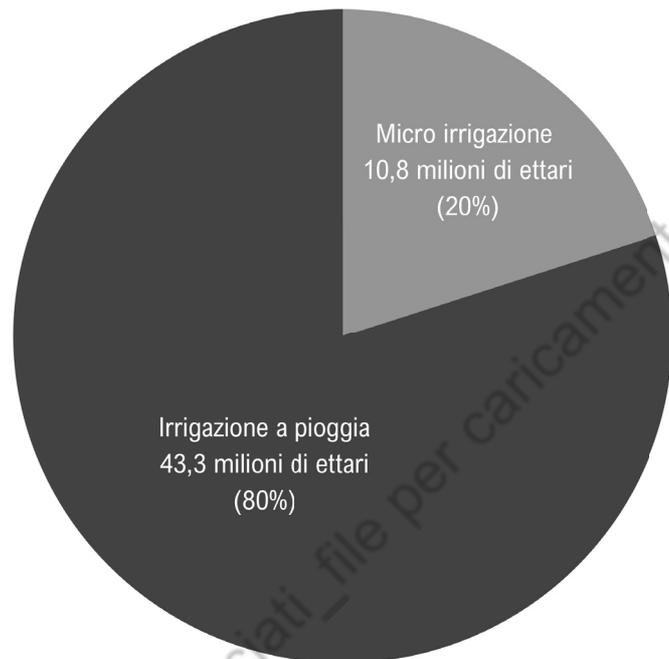
L'avvento delle materie plastiche, delle pompe centrifughe e dell'energia a basso costo fece da catalizzatore per l'avvio dell'irrigazione in pressione, favorita da un'economia globale che doveva riprendersi in fretta dopo la Seconda guerra mondiale e da una popolazione in rapida crescita. Gli strumenti caratteristici dei nuovi sistemi di irrigazione, destinati a sostituire almeno in parte quelli tradizionali per gravità, definivano due tipologie principali di irrigazione in pressione: quella ad aspersione e quella a localizzazione spinta o micro-irrigazione. La ripartizione a scala globale è riportata nella figura 1.11.

2.7.1. Irrigazione a pioggia

È difficile attribuire la paternità di una tecnica che può essere realizzata in molti modi e questo vale anche per le irrigazioni in pressione. Le ricerche in rete indicano

¹⁴ <https://web.mit.edu/12.000/www/m2012/finalwebsite/>.

Figura 1.11 - Ripartizione della superficie irrigata con i sistemi in pressione



Fonte: ICID, 2013

William Congreve come inventore di un sistema a pioggia con funzione anti-incendio nel 1812. Il sistema fu brevettato ed era costituito da un tubo forato posizionato sul soffitto di un teatro, azionabile manualmente tramite l'apertura di una valvola posizionata all'esterno dell'edificio.

Il primo irrigatore a scopo paesaggistico è attribuito a Joseph Lessler che nel 1871 inventò una «fontana e irrigatore portatile», consapevolmente o no ispirato a realizzazioni rinascimentali (figura 1.12).



Figura 1.12 - Irrigazione a pioggia tramite pompa in un giardino inglese del XVI secolo

Fonte: Hill, 1586

Il primo sistema a pioggia per uso agricolo è attribuito a Charles Skinner, un agricoltore dell'Ohio che nel 1894 lo brevettò con il nome di «sistema Skinner».

Il primo irrigatore a impatto con azione orizzontale sembra che sia stato inventato nel 1933 in California per l'irrigazione degli agrumi. Fu brevettato nel 1935 e il brevetto fu poi venduto a Rain Bird. Gli impianti a pioggia più comuni erano dotati di questo tipo di irrigatore e l'alimentazione avveniva tramite tubi d'acciaio.

È meno incerta l'origine delle macchine a perno centrale (figura 1.13a) e a movimento laterale (figura 1.13b). Le prime furono sviluppate e brevettate alla fine degli anni Quaranta nel Nebraska. Le condotte erano sostenute da cavi agganciati alle torri e il movimento delle campate (*span*) era consentito dalla pressione dell'acqua di irrigazione che agiva sulle trasmissioni idrostatiche operanti su ogni gruppo di ruote.

Negli anni Cinquanta Robert Daugherty acquisì i diritti per la produzione e lo fece con il marchio «Valley». L'australiana Raincat propose i motori elettrici per l'avanzamento della macchina e l'americana Layne and Bowler Company li introdusse definitivamente.

Per alcuni decenni i sistemi di irrigazione a perno centrale sono stati associati all'agricoltura su larga scala,

Figura 1.13 - Irrigazione con center pivot (a) e lateral move (b)



Fonte: www.agrivi.com/ (a); courtesy: Porto Felloni farm (b)

mentre oggi trovano successo anche tra le piccole aziende agricole, talvolta attraverso sistemi cooperativi di condivisione.

Prima dell'avvento dell'irrigazione con i center pivot, gli agricoltori delle Grandi Pianure coltivavano in asciutto e quindi facevano affidamento sulle precipitazioni naturali. Con la siccità iniziata nel 1930 e durata dieci anni, la condizione degli agricoltori precipitò verso la catastrofe con un impatto economico devastante. Le precipitazioni che ripresero regolarmente nel 1939 non allontanarono la paura dagli agricoltori finché nel 1948 fu inventato in Nebraska il primo sistema di irrigazione a perno centrale, poi sottoposto a domanda di brevetto nel 1949. L'innovazione fu accolta con entusiasmo dopo che il Dust Bowl degli anni Trenta aveva convinto gli agricoltori che soltanto l'introduzione di nuove tecnologie avrebbe impedito che ciò potesse accadere di nuovo.

Con la scoperta della falda acquifera di Ogallala questi sistemi si svilupparono di pari passo con i progressi del sollevamento meccanico dell'acqua dai pozzi alimentati dall'acquifero.

2.7.2. *Irrigazione localizzata o microirrigazione*

Anche per la microirrigazione è difficile stabilire come sia apparsa. Trascurando le leggende che la vogliono già in uso nei giardini pensili di Babilonia o i racconti di erogazioni puntiformi e discontinue tramite vasi porosi di argilla assimilabili a olle nell'antica Cina, la moderna irrigazione localizzata prende forma e si concretizza negli anni Cinquanta grazie al lavoro di Simcha Blass in Israele e Pietro Celestre in Italia. Lo studio di entrambi beneficiò sia dei reciproci scambi epistolari, sia della disponibilità delle moderne materie plastiche per la costruzione degli erogatori, lavorati in modo da ottenere la necessaria dissipazione dell'energia dell'acqua durante lo scorrimento al loro interno e garantirne l'erogazione costante in forma di gocce.

All'inizio degli anni Sessanta Blass sviluppò e brevettò il primo gocciolatore in plastica. Successivamente fu la volta di un gocciolatore in linea realizzato in collaborazione con altri ingegneri che formarono Netafim, la prima azienda di irrigazione a goccia al mondo.

A Pisa, nel novembre 1960 Pietro Celestre pubblicò una nota tecnica intitolata *Sistema di irrigazione a goccia*, in cui la nuova tecnica veniva descritta nelle sue principali caratteristiche idrauliche, strutturali ed economiche. Come Blass, anche il cammino di Celestre iniziò nei primi anni Cinquanta e si concluse nel 1960 con il brevetto n. 635845. L'idea di fondo consisteva nella possibilità di realizzare un'erogazione completa dell'acqua di irrigazione che fosse continua nel tempo e parziale nello spazio. Questa, come altre intuizioni avute da figure che precorrevano i tempi, rappresentava una visione al limite delle caratteristiche e delle possibilità del procedimento che veniva proposto.

L'irrigazione localizzata, che ha nella goccia la sua

variante più rappresentata, è una tecnica di irrigazione avanzata che sia nella versione interrata che in quella superficiale ha il potenziale per risparmiare acqua e sostanze nutritive rispetto alle altre tecniche di irrigazione perché la distribuisce in prossimità dell'apparato radicale della pianta. Nelle gestioni che non prevedono l'insorgenza di stress idrici per le piante, il risparmio di acqua consiste nella riduzione degli sprechi.

Questa possibilità è facilitata dalle caratteristiche intrinseche della localizzazione, a condizione di uno sforzo aggiuntivo da dedicare alla gestione, che presenta una maggiore complessità rispetto all'aspersione e alle irrigazioni di superficie.

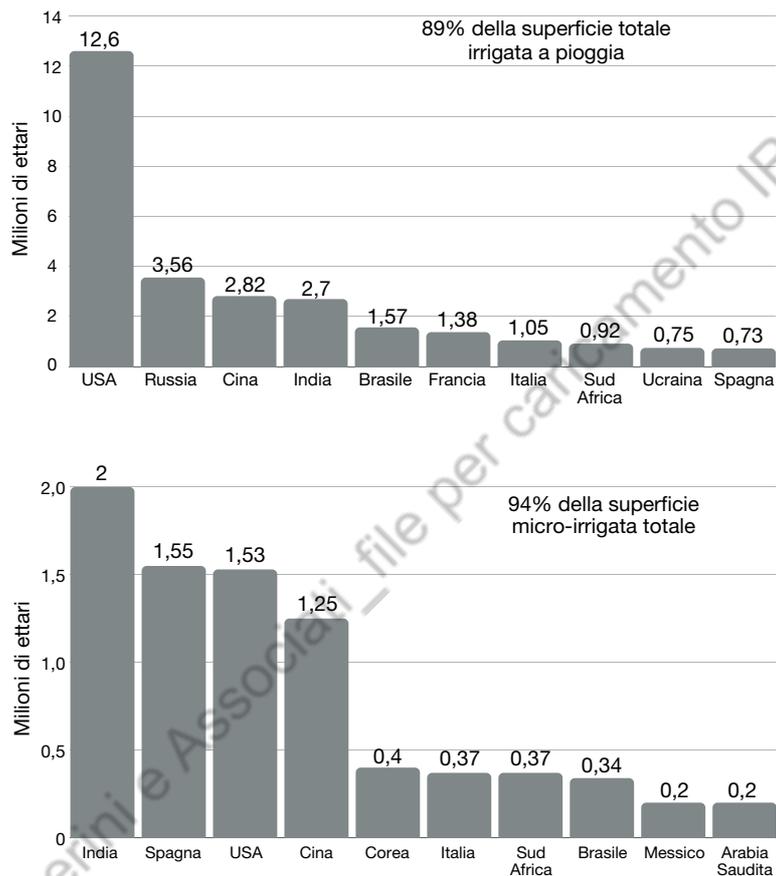
La prima linea gocciolante leggera, detta Dew Hose, apparve negli Stati Uniti all'inizio degli anni Sessanta. La sua evoluzione ne ha reso possibile l'uso su larga scala e su colture annuali anche con l'introduzione del T-Tape nel 1987 da parte di Plastro Irrigation. Qualunque sia la consistenza del tubo, la tecnica non è ovviamente esente da criticità, tra cui la facilità di occlusione degli erogatori in caso di insufficiente filtrazione dell'acqua di irrigazione.

L'irrigazione localizzata può essere realizzata anche con dispositivi detti micro-irrigatori perché distribuiscono acqua su una piccola superficie. Per questo sono generalmente utilizzati su colture con apparati radicali espansi quali sono le arboree.

I Paesi con le maggiori superfici irrigate con metodi a pioggia e localizzati sono riportati nella figura 1.14.

Negli ultimi anni, le aziende che operano nel settore dell'irrigazione hanno cominciato ad accorparsi, dando origine a strutture sempre più grandi sia per differenziare le attività, sia per avere maggior peso sul mercato globalizzato.

Figura 1.14 - I dieci Paesi con le maggiori superfici irrigate a pioggia e a microirrigazione (milioni di ha)



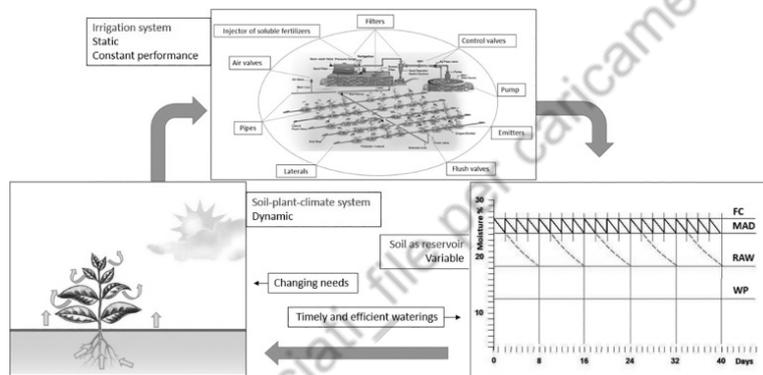
Fonte: ICID, 2010 (modif.)

2.8. Efficienza, spreco e consumo

Nel tempo gli obiettivi dell'irrigazione si sono evoluti, adeguandosi sia ai cambiamenti continui del settore, sia

alle mutate disponibilità di risorsa. Per sua natura, tramite l'acqua distribuita da un sistema progettato e gestito dall'uomo, l'irrigazione connette gli elementi di un sistema dinamico fatto da suolo, pianta e clima che cambiano nel tempo e i cui cambiamenti si influenzano reciprocamente (figura 1.15).

Figura 1.15 - L'irrigazione come elemento di connessione di un sistema produttivo dinamico



Questa condizione non può che essere affrontata attraverso un approccio di sistema, vale a dire nella piena consapevolezza delle dinamiche relative alla molteplicità degli ambiti coinvolti e facenti parte della cosiddetta Agricoltura 4.0.

Dal semplice rendere possibile la produzione vegetale attraverso il controllo dei deflussi superficiali, l'irrigazione è diventata uno strumento capace di aumentare e stabilizzare la produzione, conseguire profitto, migliorare la qualità della vita in senso lato. Queste caratteristiche hanno assunto sempre maggiore importanza nel tempo e oggi si devono muovere all'interno degli obiet-

tivi di sviluppo sostenibile, lanciati dall'ONU nel 2015. Ciò comporta la necessità di aumentare la produttività dell'acqua impiegata, WP, in un processo reso possibile dall'evoluzione delle conoscenze coinvolte nel settore, sia relative alla tecnologia che alla fisiologia vegetale. All'aumento di WP si associa l'aumento dell'efficienza d'uso dell'acqua, WUE, e di altre efficienze come il controllo delle infestanti, la fertilizzazione e il controllo dei parassiti e delle malattie. Come è noto, la WUE indica la frazione, in percentuale, dell'acqua somministrata che è effettivamente utilizzabile per gli usi utili desiderati, tra i quali il reintegro del consumo evapotraspirativo che di solito è quello quantitativamente più rilevante.

Aumentare l'efficienza significa ridurre lo spreco, quindi l'eccesso, e se ciò può consentire da un lato un consumo unitario di risorsa più basso a parità di produzione ottenuta (*more crop per drop*), dall'altro può portare a un consumo complessivo maggiore di risorsa (Boularbah *et al.*, 2019) se non vengono attuate politiche di controllo della disponibilità, secondo il già citato *Paradosso di Jevons*.

Con l'espansione dell'irrigazione cresce l'importanza della gestione sia perché aumentano le quantità di risorse in gioco, sia perché si ampliano le conoscenze necessarie al corretto svolgimento dei processi coinvolti nelle dinamiche del sistema complesso di cui l'irrigazione è l'elemento di connessione. Oltre che sull'impiantistica, la ricerca si focalizza sulla risposta delle colture all'acqua attraverso le funzioni produttive¹⁵, con lo scopo di stabilire procedure di calcolo dell'evapotraspira-

¹⁵ La funzione di risposta produttiva di una coltura esprime la relazione tra la resa commerciale ottenuta e la quantità totale di acqua utilizzata dalla pianta attraverso l'evapotraspirazione.

zione colturale per quantificare la quota di reintegro, tramite l'irrigazione, dei consumi in funzione della resa ottenibile (figura 1.16).

Figura 1.16 - Esempi di funzioni lineari di risposta produttiva all'acqua per colture arboree (sinistra) e cerealicole (destra)



Fonte: FAO, 2002 (modif.)

Molti studi si sono succeduti a partire dall'immediato secondo dopoguerra. Tra questi si ricordano i contributi di Wit (1958), Jensen (1968), Stewart, Hagan (1973), Nairizi, Rydzewski (1977), Hexem, Heady (1978), Solomon (1985), English (1990), Fereres, Soriano, (2007).

2.9. Organizzazioni per la ricerca e la divulgazione

Un ruolo fondamentale verso la moderna irrigazione è svolto da molti decenni da enti e organizzazioni attraverso attività di ricerca e divulgazione. Per storia, consistenza e rilevanza transnazionale si ricordano la Food and Agriculture Organization (FAO) e l'International Commission on Irrigation and Drainage (ICID).

FAO è un'Agenzia delle Nazioni Unite (UN), istituita a Québec City nel 1945 e con sede a Roma dal 1951, che ha come obiettivo primario il raggiungimento di un livello nutrizionale quantitativamente e qualitativamente adeguato a livello mondiale. Tra gli strumenti e le iniziative attuate nel corso degli anni, la divisione Land and Water è quella più strettamente legata ai temi che ruotano intorno all'irrigazione. Il cardine dell'attività è la gestione sostenibile delle risorse acqua e terra nelle diverse dimensioni dello sviluppo orientato alla sicurezza alimentare, alla salute umana, alla conservazione della biodiversità, alla mitigazione e all'adattamento ai cambiamenti climatici. Attraverso partenariati e iniziative di collaborazione, con progetti, studi e condivisione di informazioni, la FAO contribuisce in maniera determinante ad accrescere le conoscenze necessarie alla comprensione scientifica delle relazioni tra terra e acqua alle diverse scale territoriali. La divisione Land and Water mette a disposizione prodotti di supporto all'irrigazione costantemente aggiornati con la crescita delle conoscenze. Tra questi meritano di essere menzionati i *Soils Bulletins*, una serie storica iniziata nel 1965, e soprattutto la serie *Irrigation and Drainage Paper*, che sulla risposta produttiva all'acqua e sulle procedure per il calcolo dei fabbisogni idrici delle colture ha prodotto pietre miliari come il Paper n. 24 (Doorenbos, Pruitt, 1975), il n. 33 (Doorenbos, Kassam, 1979) e il n. 56 (Allen *et al.*, 1998). Con il progresso degli strumenti informatici e gli aggiornamenti sulla pedologia, la fisiologia delle piante e le prestazioni dei sistemi di irrigazione, la FAO ha prodotto potenti modelli di supporto decisionale largamente usati sia nell'ambito della ricerca che della gestione ordinaria, tra cui CROPWAT e soprattutto AQUACROP (Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009).

L'*ICID*, Commissione internazionale per l'irrigazione e il drenaggio, è la più grande organizzazione internazionale a carattere tecnico-scientifico senza fini di lucro che opera nel campo dell'irrigazione, del drenaggio, della gestione delle acque e degli eventi climatici estremi allo scopo di promuovere e conseguire uno sviluppo sostenibile dell'agricoltura irrigua.

Fu costituita nel 1950 a Nuova Delhi ed è attualmente composta da 78 Paesi membri attivi, presso i quali opera attraverso i rispettivi Comitati Nazionali, che si avvalgono dell'attività di oltre 500 esperti che operano nei settori correlati. La rete dei Paesi membri dell'*ICID* copre oltre il 90% della superficie irrigata del mondo. La Commissione ha svolto un ruolo attivo nella definizione di Agenda 21, della World Water Vision, dei World Water Forum e di altre iniziative orientate agli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite.

La Commissione ha sviluppato una solida base di conoscenze che rende disponibili sia attraverso pubblicazioni speciali, documenti di sintesi e atti, sia tramite aggiornamenti trimestrali, mensili e settimanali mediante bollettino elettronico con cui diffonde le informazioni più recenti.

L'*ICID* collabora con UN-Water e ha stretti legami con agenzie delle Nazioni Unite come FAO, IFAD, UNEP, UNESCO, OMS, WMO e altre organizzazioni professionali internazionali come ADB, AWC, GWP, ICARDA, ICOLD, ICRISAT, IFPRI, IGS, IHA, IUCN, IWRA, IWMI, ISO, AARDO, WWC, Banca Mondiale ecc., con l'obiettivo di riunire i soggetti interessati alla gestione idrica sostenibile nell'agricoltura.

La crescente complessità che accompagna la moderna irrigazione ha evidenziato la necessità di un lessico chiaro e condiviso tra tutti gli stakeholder per l'utilizzo

di un linguaggio comune che favorisca la comunicazione e non dia adito a fraintendimenti. Nel 1967 l'ICID pubblicò il primo Multilingual Technical Dictionary (MTD), oggi alla quinta versione che contiene 9.370 termini tecnici ed è disponibile in lingua cinese, giapponese e russa oltre all'inglese e francese.

All'inizio del XXI secolo la Commissione stabilì e adottò nuovi criteri per definire in maniera inequivocabile il concetto di efficienza dell'irrigazione (Perry, 2007), fino ad allora soggetto a interpretazioni arbitrarie e perciò di fatto non utilizzabile.

Il 15 settembre 1987 l'ICID è stata designata Messaggero di Pace dal segretario generale delle Nazioni Unite.

3. Le prospettive dell'irrigazione

È in corso una profonda rivisitazione dei criteri che dovrebbero caratterizzare la moderna irrigazione. Vecchi capisaldi come l'uniformità di distribuzione e la massimizzazione delle produzioni vengono riconsiderati e interpretati alla luce delle nuove conoscenze tecnico-scientifiche e della crescente sensibilità verso le tematiche ambientali.

3.1. Dall'uniformità di distribuzione alla gestione della variabilità. L'agricoltura di precisione

La moderna agricoltura prevede la meccanizzazione delle operazioni colturali e beneficia dell'espansione delle superfici delle unità coltivate, cosa che inevitabilmente comporta un incremento della variabilità spaziale degli elementi che costituiscono le unità stesse e di

cui le diverse operazioni agronomiche, tra cui l'irrigazione, devono tenere conto. L'agricoltura di precisione, PA, è quell'insieme di tecnologie che permette di gestire la variabilità in campo, dando a ogni pianta ciò di cui ha bisogno esattamente quando ne ha bisogno. L'obiettivo è massimizzare le produzioni o aumentare la qualità delle stesse, eliminando gli sprechi con un conseguente guadagno per l'agricoltore e per l'ambiente.

3.2. *L'irrigazione di precisione*

All'irrigazione tradizionalmente intesa è richiesto di somministrare l'acqua nei tempi, nelle quantità e nei modi rispondenti alle esigenze del contesto produttivo in cui è praticata. L'attenzione alla variabilità spaziale dell'unità colturale richiede che i passi precedenti siano applicati a sottounità colturali, dette Management Zone (MZ), individuate all'interno dell'unità principale e sufficientemente omogenee rispetto a una combinazione di fattori limitante la resa. La necessità di una stima accurata dei reali fabbisogni idrici della coltura, dell'applicazione precisa delle restituzioni nei momenti opportuni per soddisfare le esigenze in maniera tempestiva e uniforme, definisce i principi dell'irrigazione di precisione, PI, che dovrebbe perciò implicare alti valori di WUE e WP. In principio, gli obiettivi della PI sono raggiungibili attraverso il controllo della distribuzione dell'acqua di irrigazione tramite un sistema capace di erogare a gruppi di piante o a parte del campo la quantità di acqua necessaria e in maniera altamente uniforme. È perciò evidente che per l'irrigazione tradizionale un'alta uniformità della distribuzione sia condizione necessaria, ma non sufficiente, per raggiungere un'alta WUE.

La PI si configura come un modo di pensare che richiede un approccio sistemico più che come una tecnologia specifica. Si può infatti ottimizzare la resa in modo integrato, vale a dire trattando dati diversi, comprese interazioni ed effetti sul medio periodo, relativi al sistema colturale nel suo insieme. Un sistema pensato per la PI richiede perciò l'impiego di tecnologie diverse, non necessariamente sofisticate, per la pratica di qualsiasi tipo di irrigazione su qualsiasi coltura (gestione ed esecuzione degli interventi), tra cui sensoristica prossimale e remota, modellistica e controllo.

Non esiste una metodologia standard per la definizione delle MZ, che sono da considerare come settori irrigui per la cui gestione si ammette, tra l'altro, che la variabilità spaziale della risposta produttiva all'irrigazione sia significativa. La dimensione ottimale delle MZ dipende dalle caratteristiche del sistema di irrigazione, da fattori ambientali e dalle caratteristiche della coltura.

Qualunque siano i dati utilizzati per delineare le MZ (proprietà del suolo, vigoria ecc.), lo scopo è minimizzarne il numero, ad esempio in base alle sole caratteristiche idrologiche dei suoli. Va osservato che la gestione sito-specifica dell'irrigazione non è garanzia di risparmio idrico. È necessario caratterizzare la variabilità spaziale a una scala sufficientemente fine perché la precisione possa essere efficace. Se questo non è possibile, allora è meglio applicare l'ipotesi «nulla» della PA, ovvero che l'applicazione uniforme è più appropriata di quella variabile spazialmente (Whelan, McBratney, 2000).

In termini di risparmio idrico, le oscillazioni osservate sono molto ampie (0-50%) rispetto all'irrigazione uniforme. L'intervallo tende a ridursi nel tempo ed è indicato intorno al 10-15%. In termini di rese, i vantaggi sembrano meno evidenti (4-6%).

La PI può risultare economicamente vantaggiosa per colture ad alto reddito in condizioni di elevata variabilità in campo. L'economicità della IP dipende anche dalla vita utile della tecnologia impiegata, per il cui ammortamento possono essere necessari anche molti anni.

A questo si aggiunge lo scetticismo, se non la riluttanza, da parte degli agricoltori a investire in macchine anche solo capaci di avvicinarsi alla PI.

Al momento non è ancora strutturato un sistema di corretto trasferimento della conoscenza tecnologica verso i potenziali utenti. Quindi, per provare l'efficacia della strategia adottata, i sistemi irrigui che realizzano la PI dovrebbero essere valutati alla fine di ogni stagione colturale alla scala di campo o aziendale, a seconda della coltura e dell'attrezzatura disponibile (Castrignanò, De Benedetto, 2015).

3.2.1. Irrigazione 4.0

Idealmente, un sistema di PI ad alto livello di digitalizzazione e interamente geolocalizzato è configurabile come idoneo all'Irrigazione 4.0 se comprende una tecnologia in grado di leggere una cartografia digitale stratificata, la possibilità di applicare l'acqua con tecnologia a rateo variabile (VRT), un'automazione spinta, tecnologie informatiche di comunicazione e controllo in tempo reale (inclusa la memorizzazione di tutte le operazioni), capacità di calcolo dei costi di irrigazione per ogni unità produttiva. Il sistema 4.0 che ne consegue è sempre connesso con le diverse componenti dell'impianto a un server remoto e le sue funzioni sono gestibili da un portale internet o da una app per smartphone. Gli impianti meccanizzati, in particolare i center pivot, sono quelli che meglio si prestano allo scopo.

Esiste la possibilità di beneficiare di incentivi per age-

volare l'introduzione di innovazioni tecnologiche per l'Agricoltura 4.0, con benefici fiscali anche per l'acquisto degli impianti di irrigazione. Inoltre tramite Revamping 4.0 si può ammodernare la macchina per l'irrigazione senza dover sostituire tutto l'impianto. Essendo di introduzione relativamente recente, mancano statistiche attendibili sull'Irrigazione 4.0, anche se attualmente il risparmio idrico ottenibile in media è stimato intorno al 30%.

3.3. Considerazioni

3.3.1. Applicabilità della PI a VRT

La restituzione differenziata dell'acqua con sistemi mobili a VRT comporta gestioni in cui i parametri irrigui vengono forzati, soprattutto se la coltura è la stessa all'interno dell'area servita e la variabilità dei suoli è elevata.

I sistemi mobili non permettono irrigazioni frequenti e leggere. Questo comporta qualche difficoltà nell'effettuare interventi di soccorso (specialmente con il center pivot o il rainger). L'insorgenza di stress idrici su MZ a bassa capacità di ritenzione diventa un rischio concreto soprattutto se il decorso stagionale è asciutto.

Se si applica la *teoria del minimo* di Liebig, la gestione a VRT perde i connotati della PI e perciò i sistemi fissi al servizio delle MZ permetterebbero, in linea di principio, un maggiore risparmio di acqua e rese non inferiori alla PI.

Rispetto all'irrigazione uniforme con VRT, l'impianto fisso a settori può avere dimensioni maggiori ma, in principio, è meno vincolato alla dimensione minima della MZ che inevitabilmente risente delle caratteristiche funzionali del sistema di irrigazione a VRT (ad esempio, la gittata di un grosso irrigatore semovente).

3.3.2. Sulla accuratezza degli input

Tra le informazioni fondamentali per la corretta gestione dell'irrigazione, non sempre sono note quelle sui fabbisogni colturali, sulle caratteristiche idrauliche e idrologiche dei suoli e sulle caratteristiche dell'impianto di irrigazione stesso (intensità di precipitazione, uniformità di distribuzione).

La maggior parte dei metodi utilizzabili a supporto della gestione è classificabile come applicazione feed-forward del fabbisogno idrico della coltura, stimato a bilancio, oppure come feedback dei sensori volto a mantenere l'umidità del suolo o lo stress idrico delle piante entro un intervallo prestabilito.

In entrambi i casi si tratta di misure indirette dello stato idrico della pianta e perciò si tende a consigliarne l'uso combinato per compensarne in qualche misura i limiti, poiché è noto che dalla corretta gestione dipende la maggior parte del risparmio idrico conseguibile. Va tuttavia rilevato che l'interpretazione di fenomeni complessi non è esente da errore e di questo è necessario essere consapevoli nella pratica della PI.

3.3.2.1. Metodo FAO per il calcolo dell'evapotraspirazione

Nella pratica dell'irrigazione moderna il più delle volte si calcolano i fabbisogni colturali attraverso le procedure standardizzate FAO, possibilmente con l'utilizzo della formula di Penman-Monteith, PM, perché ritenuta quella che più si avvicina al valore reale. Studi recenti (Ragab *et al.*, 2017) condotti con tecnologie moderne tra cui eddy covariance e scintillometria, hanno evidenziato come in molti casi e per diversi tipi di coltura la formula di PM tenda a sovrastimare l'evapotraspirazione calcolata in modo talvolta rilevante (50% circa). La causa prin-

cipale è stata individuata nel valore della resistenza stomatica utilizzato nell'equazione, pari a 70 sm^{-1} , che è inferiore a quello reale che, per le diverse colture, varia con la stagione e con le ore del giorno (figura 1.17).



Figura 1.17 - Evapotraspirazione misurata con eddy covariance e scintillometria. Si evidenzia una diffusa sovrastima di circa il 50% con la formula di Penman-Monteith

Fonte: Ragab *et al.*, 2017

3.3.2.2. Misura dell'umidità del suolo tramite sensori a terra

Il monitoraggio dell'umidità del terreno può permettere un controllo efficace dell'esecuzione degli interventi irrigui. Normalmente si riconosce a questo tipo di misura il limite principale di fornire un dato puntuale, la cui rappresentatività si riduce all'aumentare dell'eterogeneità dell'area che rappresenta. Oltre a questo andrebbero considerati anche aspetti che possono causare errori di misura, tra cui il tipo di suolo e la salinità. Un esempio dell'incidenza di tali errori è illustrato nella tabella 1.1, dove sono riportati gli esiti di un test in campo svolto su sette sensori diffusi sul mercato (Campbell *et al.*, 2022).

I risultati hanno dimostrato che, pur se la maggior parte dei sensori ha funzionato in maniera soddisfacente, nessuno lo ha fatto entro le specifiche fornite dal produttore per tutti i tipi di terreno e conducibilità elettrica dell'estratto saturo (ECe). La calibrazione è neces-

Tabella 1.1 - Errore quadratico medio (RMSE) per ciascun sensore in diverse combinazioni tipo di suolo e conducibilità elettrica dell'estratto saturo (ECe)

| Sensor | All Soil Types/ ECe | Natural Soil Types | Natural Sand (all ECe) | Sandy Loam (all ECe) | Silt Loam (all ECe) | HB Clay (all ECe) |
|-------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| Hydra Probe | 8,0 | 8,1 | 2,2 | 4,2 | 6,7 | 13,8 |
| SM 100 | 8,6 | 4,7 | 3,7 | 14,4 | 4,7 | 8,4 |
| SMEC 300 | 11,6 | 7,7 | 4,4 | 16,4 | 8,5 | 14,1 |
| TDR-315 | 5,1 | 4,9 | 3,1 | 4,6 | 3,7 | 8,1 |
| TEROS 12 | 4,0 | 3,6 | 2,4 | 3,2 | 3,1 | 6,4 |
| Theta Probe | 5,4 | 5,2 | 3,2 | 5,5 | 5,0 | 7,3 |
| Wet-2 | 6,6 | 7,8 | 2,4 | 5,1 | 5,5 | 10,7 |

RMSE<5% 5%<RMSE<10% RMSE>10%

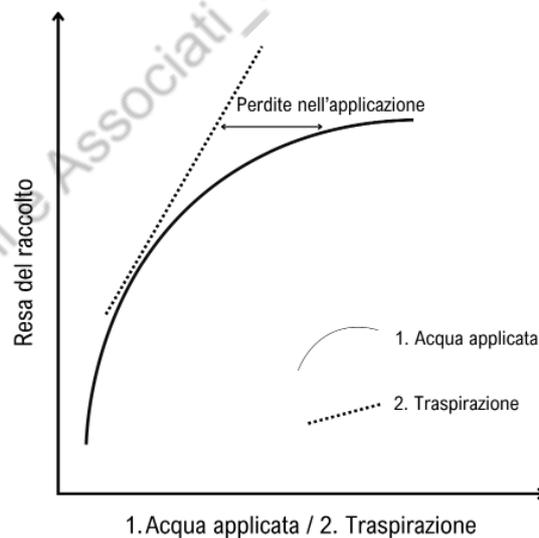
Fonte: Campbell *et al.*, 2022

saria per migliorare l'accuratezza e occorre anche porre attenzione al comportamento dei suoli, come gli argillosi, soggetti a forti espansioni e contrazioni.

3.4. Le strategie irrigue a sussidio ridotto (*deficit irrigation*)

La pratica irrigua tradizionale ha tra gli obiettivi la massimizzazione della resa e la riduzione dell'incertezza delle produzioni. Tuttavia, la somministrazione di volumi crescenti di acqua irrigua comporta una perdita di efficienza complessiva principalmente legata alle quan-

Figura 1.18 - Forma generale di una funzione produttiva. La linea che rappresenta la resa culturale rispetto all'irrigazione tende ad allontanarsi sempre più dalla linea della traspirazione all'aumentare dei volumi distribuiti



Fonte: ARC, 2010

tità erogate, con il risultato che aumenta la frazione non utile dell'acqua distribuita (figura 1.18). In un contesto di progressiva riduzione della disponibilità di acqua, la moderna irrigazione richiede un incremento sia della WUE che della WP.

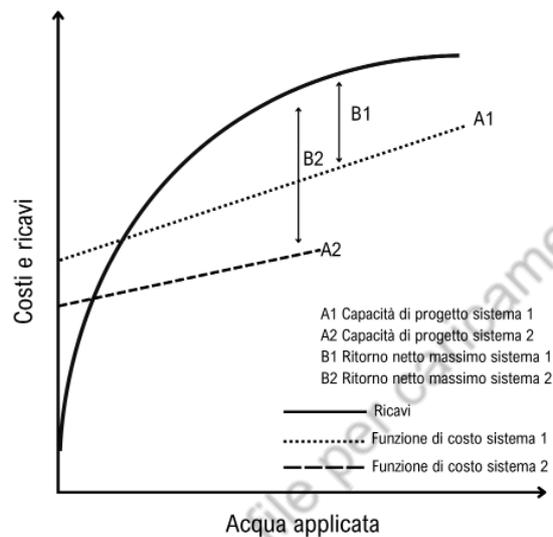
Già all'inizio degli anni Settanta gli studi sulle risposte produttive in funzione dei livelli di stress idrico indotti durante il ciclo colturale avevano indicato come le strategie irrigue a restituzione parziale dei consumi evapotraspirativi, genericamente definite deficit irrigation (DI), potessero essere applicate su colture adatte a fornire modeste riduzioni di resa a fronte di elevate riduzioni di acqua irrigua (Stewart, Musick, 1982) con conseguente incremento di WUE e WP.

La teoria è stata confermata su specie annuali come patata, mais, pomodoro, barbabietola da zucchero, e perenni tra cui vite, pero e pesco, risultando in minime perdite di produzione a fronte di restituzioni fino al 50% inferiori ai fabbisogni calcolati (FAO, 2002). Con un sistema di irrigazione progettato e gestito per la DI si possono ridurre sia i costi diretti, fissi e variabili, che crescono al crescere degli interventi e dei volumi erogati (English, Nuss, 1982), sia gli usi non utili dell'acqua. Di conseguenza il reddito aziendale può essere incrementato (figura 1.19).

Come accade in assenza di strategie specifiche, anche in DI la riduzione effettiva del consumo totale può avvenire solo se esiste un limite alla disponibilità di acqua per l'irrigazione, una contabilizzazione dei prelievi e un corretto piano di tariffazione.

Nonostante i vantaggi conseguibili, la DI stenta a diffondersi perché porta con sé un'incertezza che l'agricoltore medio normalmente non si sente di accettare. Almeno fino a quando l'acqua e l'energia saranno di-

Figura 1.19 - Funzioni di costo e ricavo. La funzione di ricavo ha la stessa forma della curva di resa colturale rispetto all'acqua applicata



Fonte: ARC, 2010

sponibili a costi relativamente bassi ed egli stesso non avrà acquisito le necessarie conoscenze di sistema.

3.5. Il rapporto con il cambiamento del clima

Rispetto al passato, il cambiamento climatico in atto dovuto al global warming e con occorrenze di anomalie sempre più frequenti, impone un nuovo modo di interpretare l'irrigazione.

L'aumento dell'energia dell'atmosfera influisce sulla lunghezza dei cicli colturali, sulle rese produttive, sulle esigenze idriche e irrigue, sull'insorgenza di nuove ma-

lattie e patogeni, sulle caratteristiche degli areali di coltivazione. L'accresciuta variabilità che ne consegue ha impatti sulle produzioni, sulle perdite di prodotto e sull'economia.

Tipicamente si cerca di mitigare il problema agendo sulle cause, come diminuire le fonti di emissione di GHG per ridurre il fenomeno, oppure di adattarsi agli effetti prodotti dal cambiamento climatico modificando azioni e comportamenti per ridurre gli effetti negativi. Gli aggiustamenti di breve termine consistono in strategie di adattamento che prevedono variazioni minime del sistema agricolo che incidono sulla gestione dei sistemi colturali attraverso modifiche direttamente o indirettamente connesse all'irrigazione. Tra queste merita ricordare l'impiego contemporaneo di cultivar con caratteristiche diverse allo scopo di ridurre la variabilità della produzione, modifiche alle pratiche agronomiche come la data di semina o trapianto, cambiamenti nel tipo e modalità di impiego di fertilizzanti e pesticidi, la conservazione dell'umidità del suolo tramite l'introduzione di tecniche appropriate e soprattutto attraverso una corretta gestione dell'irrigazione in termini di quantità distribuite ed efficienze.

3.6. Acqua virtuale, irrigazione e impronta idrica (water footprint)

La moderna irrigazione non si misura soltanto con il livello della tecnologia impiegata o con le efficienze raggiunte. Le criticità fin qui evidenziate, unite alla disparità nella disponibilità di risorse tra le diverse regioni del mondo, devono indirizzare verso un approccio consapevole ai numerosi temi che la caratterizzano. Questo è

reso possibile da nuovi concetti capaci di originare indicatori più adatti alla valutazione della sostenibilità dell'irrigazione e degli stili di vita ad essa correlati, oltre a fornire indicazioni utili per ridurre gli effetti negativi prodotti dall'incremento demografico.

Uno di questi è il concetto di *acqua virtuale*. Fu introdotto nel 1993 per definire la quantità di acqua utilizzata nella produzione e nella commercializzazione di alimenti e beni di consumo, il cui commercio corrisponde al quantitativo di acqua necessario alla loro produzione.

L'impronta idrica (*water footprint*) fu introdotta successivamente ed è semplicemente il volume di acqua utilizzata, sia virtuale che reale. A livello individuale, è utile conoscere l'impronta in funzione della dieta alimentare e dei modelli di consumo. A livello nazionale è legata alle abitudini alimentari delle persone, con il consumo di carne che comporta una grande impronta idrica. Quanto più gli alimenti provengono da colture irrigate, tanto maggiore è l'impronta idrica corrispondente. Ne consegue che per Paesi situati in zone a clima caldo e con un consumo di acqua relativamente elevato per la produzione alimentare domestica (nazionale), l'impronta idrica sia maggiore rispetto a quella di un Paese a clima sub-umido. Sarebbe opportuno interrogarsi sull'opportunità di importare prodotti agricoli da Paesi dove l'acqua scarseggia e l'efficienza dell'irrigazione è bassa.

Bibliografia

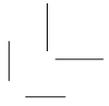
Allen R.G., Periera L.S., Raes D., Smith M. (1998), *Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements)*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- ARC - Institute for Agricultural Engineering (2010), *Standards and Guidelines for Improved Efficiency of Irrigation Water Use from Dam Wall Release to Root Zone Application*, GUIDELINES - Report to the Water Research Commission, WRC REPORT NO. TT 466/10, WRC Project No K5/1482/4.
- Boularbah S., Kuper M., Hammani A., Mailhol J.C., Taky A. (2019), «The blind angle: performance assessment of drip irrigation in use in a large-scale irrigation scheme in Morocco», *Irrigation and Drainage*, 68, pp. 925-936.
- Campbell S.C., Campbell C.S., Canha M.D., Galloway O., Rivera L.D., Cobos D.R. (2022), «Performance evaluation of research grade water content sensors across multiple soil types and electrical conductivities», *Meter*.
- Castrignanò A., De Benedetto D. (2015), «Irrigazione di precisione: principi e applicazione», in *L'acqua in agricoltura*, Edagricole, Milano, pp. 205-230.
- Cavagnero P., Giusti M.A., Revelli R. (2009), *Scienza idraulica e restauro dei giardini*, Celid, Torino.
- Di Teodoro F.P. (2022), *Introduzione a Leonardo da Vinci, Del moto e misura dell'acqua*, a cura di E. Carusi e A. Favaro, Zanichelli, Bologna.
- Doorenbos J., Kassam A.H. (1979), «Yield Response to Water», *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*, FAO, Rome.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. (1975), «Guidelines for predicting Crop Water Requirements», *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24*, FAO, Rome.
- Engineering*, 116, pp. 399-412, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:3\(399\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:3(399)).
- English M.J. (1990), «Deficit Irrigation. I: Analytical Framework», *Journal of Irrigation and Drainage*.
- English M., Nuss G.S. (1982), «Designing for deficit irrigation», *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 108, n. 2, <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001386>.
- FAO (2002), «Deficit irrigation practices», *Water reports*, n. 22, FAO, Rome.
- Fereres E., Soriano M.A. (2007), «Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use», *Journal of Experimental Bo-*

- tany*, 58 (2), pp. 147-159, <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erl165>.
- Hanks R.J. (1974), «A model for predicting plant yield as influenced by water use», *Agronomy Journal*, 66 (5), pp. 660-664, <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1974.00021962006600050017x>.
- Hexem R.W., Heady E.O. (1978), *Water Production Functions for Irrigated Agriculture*, The Iowa State University Press, Ames.
- Hill T. (1586), *The Gardener's Labyrinth*, reperibile presso U.S. Department of Agriculture, National Agricultural Library.
- ICID - International Commission on Irrigation and Drainage (2010), Annual Report, https://www.icid.org/ar_e_2010.pdf.
- ICID - International Commission on Irrigation and Drainage (2013), Annual Report, https://www.icid.org/ar_e_2013.pdf.
- Jensen M.E. (1968), «Water Consumption by Agricultural Plants», in T.T. Kozlowski (ed.), *Water Deficits and Plant Growth*, Academic Press, New York, vol. 2, pp. 1-22.
- Lasserre F. (2004), *Acqua, spartizione di una risorsa*, Ponte alle Grazie, Milano.
- Liverani M. (2001), «Vicino Oriente antico. Agricoltura e irrigazione», [https://www.treccani.it/enciclopedia/vicino-oriente-antico-agricoltura-e-irrigazione_\(Storia-della-Scienza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/vicino-oriente-antico-agricoltura-e-irrigazione_(Storia-della-Scienza)/).
- Loffi S.G. (2007), *Piccola storia dell'idraulica*, <https://www.cic.cr.it/images/pdf/idro/PiccolaSI.pdf>.
- Medici M. (1967), *Le pompe*, Hoepli, Milano.
- Mohsen T.J., Han M., Davoudi M., Kim M. (2013), «Review of Ancient Wisdom of Qanat, and Suggestions for Future Water Management», *Environmental Engineering Research*, 18 (2), pp. 57-63.
- Nairizi S., Rydzewski J. (1977), «Effects of Dated Soil Moisture Stress on Crop Yields», *Experimental Agriculture*, 13 (1), pp. 51-59, <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479700007602>.

- Perry C. (2007), «Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations», *Irrigation and Drainage*, n. 56, pp. 367-378.
- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E. (2009), «AquaCrop – The FAO Crop Model for Predicting Yield Response to Water: II. Main algorithms and soft ware description», *Agronomy Journal*, 101 (3), pp. 438-447, <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.
- Ragab R., Evans J.G., Battilani A., Solimando D. (2017), «Towards accurate estimation of crop water requirement without the crop coefficient Kc: new approach using modern technologies», *Irrigation and Drainage*, 66, pp. 469-477, doi: 10.1002/ird.2153.
- Rouse H., Ince S. (1957), *History of Hydraulics*, suppl. a *La Houille Blanche*, Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa.
- Scintilena (2023), «I Qanat, il sistema idraulico millenario dell'Iran», <https://www.scintilena.com/i-qanat-il-sistema-idraulico-millenario-delliran/12/08/>.
- Solomon K.H. (1985), *Typical Crop Water Production Functions*, American Society of Agricultural Engineers winter meeting, Chicago.
- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E. (2009), «AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles», *Agronomy Journal*, 101, pp. 426-437, <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.
- Stewart J.I., Hagan R.M. (1973), «Function to predict effect of crop water deficit», *J. Irrig. Drain. Div.*, ASCE, 99, IR4, pp. 421-439.
- Stewart B.A., Musick J.T. (1982), «Conjunctive use of irrigation and rainfall in semi-arid regions», *Advances in Agronomy*, 1, pp. 1-23.
- Tolle-Kastenbein R. (2005), *Archeologia dell'acqua, la cultura idraulica nel mondo classico*, Longanesi, Milano.
- UNEP - United Nations Environment Program (2022), <https://www.unep.org/resources/annual-report-2022>.

- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015), «World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables», Working Paper No. ESA/P/WP.241.
- Vercelloni M., Vercelloni V., Gallo P. (2009), *L'invenzione del giardino occidentale*, Jaca Book, Milano.
- Whelan B.M., McBratney A.B. (2000), «The 'null hypothesis' of precision agriculture management», *Precision Agriculture*, 2, pp. 265-279.
- Wit C.T.D. (1958), «Transpiration and crop yields», Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage, Wageningen (The Netherlands).



© Guerini e Associati_file per caricamento IRIS



Finito di stampare nel mese di ottobre 2024
da Geca Industrie Grafiche - San Giuliano Milanese (MI)

