

# GESTIONE DELLE PERDITE ENERGETICHE NELL'IRRIGAZIONE A SPRAY: UNA NUOVA METODOLOGIA DI ANALISI

Giulio Lorenzini\*

\*Alma Mater Studiorum-Università di Bologna  
Dipartimento di Economia e Ingegneria Agrarie  
viale Giuseppe Fanin 50, 40127 Bologna, Italia  
giulio.lorenzini@unibo.it

## SOMMARIO

L'energia nelle sue varie forme gioca un ruolo fondamentale in molti processi dell'agricoltura. Nell'irrigazione a spray (a sprinkler) il concetto di energia può essere associato, in chiave dissipativa, alla perdita energetica per attrito con l'aria delle gocce d'acqua in volo dallo spruzzatore fino a terra.

Tale fenomeno si associa ad una parziale evaporazione della singola goccia che quindi giunge al suolo diminuita nel proprio contenuto d'acqua iniziale.

I risvolti economici ed ecologici di questo evento vengono discussi, evincendone la grande importanza anche alla luce dei possibili metodi di descrizione.

A tale scopo viene utilizzato un modello analitico che, provata la sua affidabilità nelle previsioni cinematiche dell'irrigazione a spray, può essere applicato anche al computo energetico-dissipativo.

I risultati, ottenuti dietro la formulazione di alcune ipotesi, appaiono qualitativamente realistici, nei limiti precisati all'interno del lavoro e dunque il metodo costituisce, potenzialmente, un utile strumento di analisi energetico-economica dell'irrigazione a spray.

## 1. INTRODUZIONE

Il risparmio energetico è un tema che negli ultimi decenni sta acquisendo sempre più rilevanza in ogni settore professionale e scientifico che sia vincolato all'attenzione per un budget economico da rispettare. Ogni perdita energetica infatti, indipendentemente dall'ambito specifico nel quale essa viene riscontrata, rappresenta una fonte di sicuro danno economico al processo in corso. Da un punto di vista strettamente scientifico una perdita energetica che avvenga mentre un fenomeno si sta compiendo, determina una minore efficacia dell'insieme, mentre da un punto di vista strettamente tecnico essa implica una peggiore prestazione dell'apparato che ne risulta coinvolto. In agricoltura questo tipo di problema assume un rilievo particolare in molte applicazioni: quella dell'irrigazione a spray con tecnica sprinkler, tema che il presente lavoro affronta, è una fra quelle di maggior significato. Infatti l'utilizzo in campo di questa metodologia si accompagna sempre ad importanti perdite energetiche, che nella fattispecie assumono un connotato dissipativo legato all'attrito dell'aria che ogni singola goccia d'acqua incontra nel tragitto aereo che la porta dallo spruzzatore, punto di fuoriuscita dall'apparato, fino a terra, punto che definisce la distanza che ha percorso. Questo effetto legato all'attrito dell'aria dipende da un certo numero di parametri, sia geometrici sia termo-fluidodinamici, fra i quali: il diametro della goccia, la temperatura dell'aria, la presenza o l'assenza del vento, la temperatura dell'acqua, la quota dello spruzzatore rispetto al suolo, la velocità di fuoriuscita della goccia dallo spruzzatore. Questa prima elencazione già mostra come il tema sia complesso, soprattutto poiché tutti i fattori menzionati interagiscono l'un l'altro nella definizione del fenomeno nel suo complesso cagionando così, da un punto di vista analitico, una dipendenza non lineare fra i parametri in

esame. Le conseguenze sono chiare: da un punto di vista teorico, infatti, una formulazione completa che descriva il processo di una goccia d'acqua uscente da uno sprinkler, alla luce di tutti i fattori che lo condizionano, non esiste e i pochi studi a riguardo risultano di limitata applicabilità pratica, o a causa delle troppe condizioni imposte all'origine e quindi della scarsa generalità dei risultati, o a causa dell'eccessiva complicazione di fondo dei modelli [1; 2; 3]; da un punto di vista sperimentale, in aggiunta, questa dipendenza reciproca marcatamente non lineare dei parametri in gioco rende molto complicata la comprensione degli effetti dovuti a ciascuno degli stessi, indipendentemente dagli altri [4; 5; 6]. Il presente lavoro si focalizzerà sull'applicazione di un modello matematico [7] che, descrivendo l'intero processo cinematico di una goccia d'acqua che esce dallo spruzzatore di uno sprinkler e giunge a terra dopo aver seguito il suo particolare tragitto, può essere utilizzato per definire alcuni aspetti delle perdite energetiche legate all'apparato in uso ed al processo che si vuole descrivere. I risultati, sicuramente passibili di sviluppi ed evoluzioni, aprono comunque una prospettiva originale per la valutazione del danno economico ed ambientale che questo utilizzo dell'acqua in agricoltura determina.

## 2. METODO

La metodologia applicata per questa analisi si basa sul modello matematico formulato e validato in una recente pubblicazione di Lorenzini [7]. Trattasi di un approccio semplificato per la modellizzazione cinematica di una goccia d'acqua in uscita da uno sprinkler. Senza riportare qui l'intera trattazione e le ipotesi sulle quali essa stessa si basa, in quanto tutto è consultabile in dettaglio nella pubblicazione citata, basterà ricordare che, partendo dal Secondo Principio della

Dinamica, si giunge ai seguenti risultati per quanto riguarda la posizione  $[x(t), y(t)]$ , la velocità  $[\dot{x}(t), \dot{y}(t)]$  ed il tempo di volo  $\tau$ :

$$x(t) = \frac{m}{k} \ln \left( \frac{v_{0x} k}{m} t + 1 \right) \quad (1)$$

$$y(t) = h - \frac{m}{k} \ln \frac{\cos \left( \arctan \frac{\sqrt{\frac{k}{m}} v_{0y}}{\sqrt{\frac{n}{m}} g} \right)}{\cos \left( \arctan \frac{\sqrt{\frac{k}{m}} v_{0y}}{\sqrt{\frac{n}{m}} g} - t \frac{\sqrt{kng}}{m} \right)} \quad (2)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{m v_{0x}}{m + k v_{0x} t} \quad (3)$$

$$\dot{y}(t) = -\sqrt{\frac{ng}{k}} \tan \left[ -\frac{\sqrt{ngk}}{m} t + \arctan \left( \frac{\sqrt{\frac{k}{m}} v_{0y}}{\sqrt{\frac{n}{m}} g} \right) \right] \quad (4)$$

$$\tau = \frac{m \sqrt{gkn} \operatorname{arccsc} \left[ e^{\frac{hk}{m}} \sqrt{1 + \frac{k v_{0y}^2}{gn}} \right] + m \sqrt{gkn} \arctan \left[ \frac{\sqrt{\frac{k}{m}} v_{0y}}{\sqrt{\frac{gn}{m}}} \right]}{gkn} \quad (5)$$

In particolare  $k = \frac{f \rho A}{2}$  è il coefficiente d'attrito  $[\text{kg m}^{-1}]$ ;  $\rho$  è la densità dell'aria (funzione della temperatura)  $[\text{kg m}^{-3}]$ ;  $A$  è la sezione trasversale della goccia in esame  $[\text{m}^2]$ ;  $f$  è il fattore d'attrito secondo Fanning [8] [-];  $h$  è l'altezza dello spruzzatore rispetto al suolo  $[\text{m}]$ ;  $g$  è l'accelerazione di gravità  $[\text{m s}^{-2}]$ ;  $m$  è la massa della goccia  $[\text{kg}]$ ;  $n$  è la massa reale della goccia tenuto conto del galleggiamento  $[\text{kg}]$ ;  $t$  è il tempo  $[\text{s}]$ ;  $v_{0x}$  è la componente orizzontale iniziale di velocità  $[\text{m s}^{-1}]$ ;  $v_{0y}$  è la componente verticale iniziale di velocità  $[\text{m s}^{-1}]$ ;  $\dot{x}$  è la componente orizzontale di velocità  $[\text{m s}^{-1}]$ ;  $\dot{y}$  è la componente verticale di velocità  $[\text{m s}^{-1}]$ ;  $\tau$  è il tempo di volo della goccia  $[\text{s}]$ .

### 3. RISCONTRI CINEMATICI

La validazione del modello specificato alla sezione precedente [7] è consistita nell'inserire i dati di altri autori nelle equazioni create andando a verificare se i risultati ottenuti risultavano compatibili con quelli dei lavori di origine e quindi se i trend calcolati si mostravano prossimi a quelli di riferimento in letteratura scientifica. Due lavori, ormai riconosciuti diffusamente come "classici" dell'irrigazione a sprinkler, sono stati utilizzati per la validazione: quello di Edling [2] e quello di Thompson et al. [3]. Le condizioni di prova, desunte dai riferimenti bibliografici ora citati, erano individuate dai seguenti parametri: portata in uscita dallo sprinkler (Edling:  $1.4 \times 10^{-4} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ ; Thompson et al.:  $5.5 \times 10^{-4} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ ); diametro dello spruzzatore (Edling: 3.96 mm; Thompson et al.: 4.76 mm); inclinazione del getto rispetto all'orizzontale (Edling:  $-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$ ; Thompson et al.:  $25^\circ$ ); altezza da terra dello spruzzatore (Edling: 2.44 m; Thompson et al.: 4.50 m); diametro della goccia (Edling:  $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ; Thompson et al.:  $0.3 \times 10^{-3} \text{ m}, 0.9 \times 10^{-3} \text{ m}, 1.8 \times 10^{-3} \text{ m}, 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}, 5.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ ); temperatura dell'aria (Edling:  $29.4^\circ\text{C}$ ; Thompson et al.:  $38.0^\circ\text{C}$ ); vento (Edling: assente; Thompson et al.: assente). I risultati di questo confronto parziale sono visibili nelle figure 3.1 e 3.2 riferite, rispettivamente, al confronto con i dati di Edling [2] e con quelli di Thompson et al. [6].

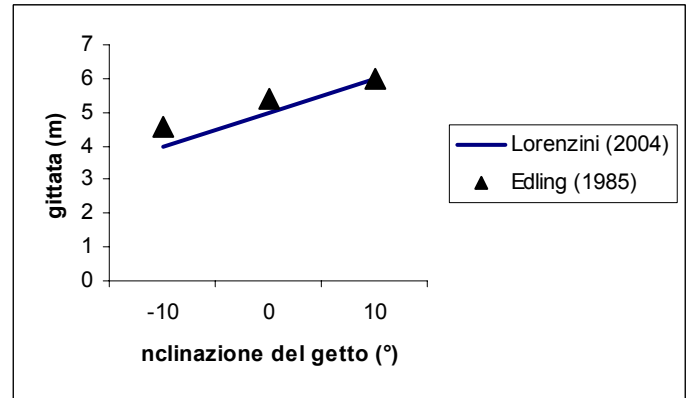


Figura 3.1. Confronto fra un set di dati di Edling [2] ed i corrispondenti di Lorenzini [7].

In generale, nel range di valori operativi specificato, si evince un accordo più che soddisfacente fra i dati di riferimento e quelli calcolati in base al modello analitico presentato nella sezione precedente. Ciò rende ragionevole l'estensione nell'utilizzo della metodologia medesima ad ulteriori ambiti, come peraltro il titolo stesso di questo lavoro preannuncia.

### 4. PERDITE ENERGETICHE

Come risulta già evidente dall'esame delle sezioni precedenti del presente lavoro, il processo attraverso il quale una goccia d'acqua preposta ad un uso irriguo esce dallo spruzzatore di uno sprinkler, compie il suo tragitto aereo e raggiunge infine il suolo, è soggetto ad una perdita energetica. Tale perdita energetica si manifesta in un meccanismo dissipativo che trae

origine dall'effetto dell'attrito dell'aria sulla goccia stessa in transito.

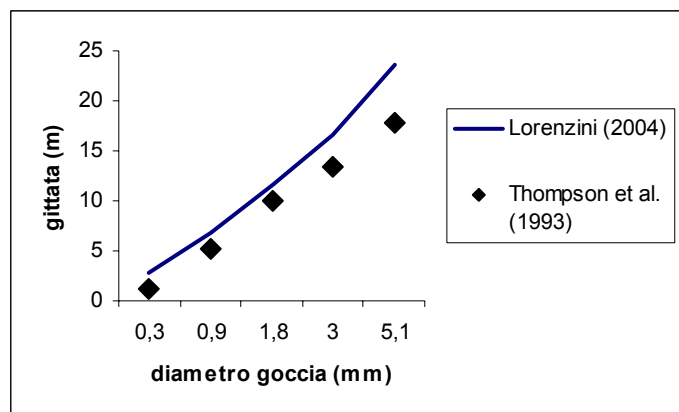


Figura 3.2. Confronto fra i dati di Thompson et al. [3] ed i corrispondenti di Lorenzini [7].

Si realizza così una parziale evaporazione dell'acqua, che determina pertanto un danno di natura economica al processo in corso in quanto a tanta acqua pagata non corrisponde altrettanta acqua giunta a destinazione e dunque resa efficace. Questo tipo di problema, in Italia ancora poco sentito visto che il prezzo dell'acqua è ancora fondamentalmente dettato da ragioni "politiche", assume un significato di rilievo in altre parti del mondo occidentale dove, come in certi stati degli U.S.A., i consorzi che approvvigionano d'acqua le svariate utenze lo fanno ad un costo ben più elevato del nostro e dove quindi, così come da noi per i prodotti petroliferi, una politica di risparmio si rende necessaria all'intera convenienza della pratica irrigua da un lato e della produzione dall'altro, nel caso di utenze agricole. Il problema però non è solo economico ma anche ambientale e questo è un aspetto cui, al contrario, anche in Italia ed in Emilia-Romagna in particolare, si comincia a prestare attenzione in ragione dei danni che ne stanno conseguendo. L'agricoltura, infatti, è responsabile ogni anno, nei paesi occidentali, dell'utilizzo di circa il 60% delle risorse di acqua dolce complessivamente usate [9]. Questo dato, apparentemente sorprendente, cancella l'impressione "istintiva" che l'utente medio dei servizi idrici ha, e cioè che gli usi industriali e civili siano i principali fruitori (e dissipatori) di acqua dolce. In questo senso, senza ovviamente volerne però incoraggiare la pratica, ha poco senso, ecologicamente parlando, sentirsi in grande colpa se ci siamo qualche volta "dimenticati" il rubinetto di casa aperto nell'atto di lavarci i denti! In pratica, quindi, il futuro del risparmio idrico si gioca più in ambito agricolo che non industriale e civile, almeno in termini di percentuali. La ricaduta ecologica dell'enorme dissipazione "energetica" legata allo spreco d'acqua in agricoltura è purtroppo ormai sotto gli occhi di tutti ed ha un nome tristemente attuale: subsidenza. La subsidenza è quel fenomeno di abbassamento del livello del suolo in conseguenza del calo del livello di falda sotterranea per eccessivo sfruttamento dei bacini idrici del sottosuolo. Di tale sfruttamento sono responsabili, principalmente, proprio gli agricoltori che attingono da pozzi e sorgenti sotterranee a scopo irriguo molta più acqua di quanto il sistema-pioggia non sia in

grado di ripristinare con il suo ciclo naturale. Ecco perché se un processo come quello dell'irrigazione a sprinkler causa una dissipazione "in volo" di acqua, allora l'operatore per reintegrare tale perdita sarà indotto a pompare altra acqua dal sottosuolo e quindi determinerà un ulteriore sfruttamento delle falde idriche del sottosuolo. Risulta quindi molto utile riuscire in qualche modo a quantificare questa perdita energetica, consistente in evaporazione per attrito d'acqua, in modo tale da poter percepire correttamente l'entità di tale dissipazione. A tale scopo può essere utilizzato il modello matematico prima presentato [7] il quale però, per le ipotesi grazie alle quali è stato formulato, ci può dare informazioni solamente su ciò che concerne l'effetto dell'attrito dell'aria sul fenomeno e non, chiaramente, sugli altri fattori che giocano un ruolo importante nel processo, così come il gradiente locale della concentrazione di vapore acqueo o l'umidità dell'aria. Le ulteriori ipotesi da formulare per conseguire il risultato finale con il modello in questione sono [9]: l'evaporazione calcolata è dovuta al lavoro totale della risultante delle forze interamente convertito in calore; l'evaporazione della goccia d'acqua avviene solamente alla fine del volo ed è calcolata sulla base della forza totale lungo l'intero percorso compiuto; la goccia è un punto materiale. La seconda condizione imposta rende ragione del fatto che il risultato atteso andrà a massimizzare l'effetto dell'attrito sull'evaporazione della goccia in quanto la superficie trasversale presentata dalla stessa durante il volo sarà sempre quella massima: a rigore quindi il valore computato sarà un limite superiore, un massimante teorico del processo, comunque utile nello stabilire il range entro cui ci si può venire a trovare. La terza condizione consente invece l'utilizzo del Teorema delle Forze Vive. A questo punto il codice, con le ipotesi poc'anzi formulate, può essere applicato, per un'indicazione di massima, a dei casi pratici. A tal scopo ci si può riferire alle condizioni sperimentali di Edling [2] [E] e Thompson et al. [3] [T]: portata in uscita dallo sprinkler  $0.73 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$  [E],  $0.55 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$  [T]; diametro spruzzatore 7.14 mm [E], 4.76 mm [T]; inclinazione del getto rispetto all'orizzontale  $0^\circ$  [E],  $25^\circ$  [T]; altezza da terra dello spruzzatore 3.66 m [E], 4.50 m [T]; temperatura dell'aria  $21.11^\circ\text{C}$  [E],  $38^\circ\text{C}$  [T]; umidità relativa 20% [E], 20% [T]. Il vento risultava assente in entrambi gli studi. Le percentuali di evaporazione delle gocce d'acqua al variare del diametro sono riportate in figura 4.1 e 4.2 riferite, rispettivamente, alle condizioni operative di Edling [2] e di Thompson [3]. I risultati presentati graficamente risultano numericamente abbastanza elevati ma il trend è sicuramente ragionevole essendo l'attrito complessivo una funzione della sezione trasversale della goccia e quindi valendo senz'altro l'affermazione che gocce più grandi, a parità di condizioni, subiscono una più elevata evaporazione a causa delle forze d'attrito. Il fatto peraltro che i valori di evaporazione risultino numericamente elevati non stupisce in quanto si è premesso come le ipotesi formulate pur, rispettose della qualità del fenomeno, avrebbero sicuramente prodotto dei risultati espressioni dei massimanti dei valori reali. Questo risultato, pur rendendosi necessario sviluppare il modello onde cogliere tutti gli aspetti del fenomeno evaporativo e non solo quelli legati all'attrito dell'aria, fa chiarezza su un aspetto sin qui trascurato in letteratura: l'attrito dell'aria gioca sicuramente un ruolo importante nell'irrigazione a sprinkler ed è quindi un fattore che non può essere trascurato a meno di non commettere gravi errori. Siccome poi la parziale evaporazione di una goccia d'acqua in volo a causa dell'attrito coincide, come premesso,

con una perdita energetica di natura dissipativa, ecco che, fin d'ora ma ancor di più con gli sviluppi futuri, l'approccio presentato costituisce un valido supporto di calcolo e di analisi per la valutazione delle perdite energetiche nell'irrigazione a spray.

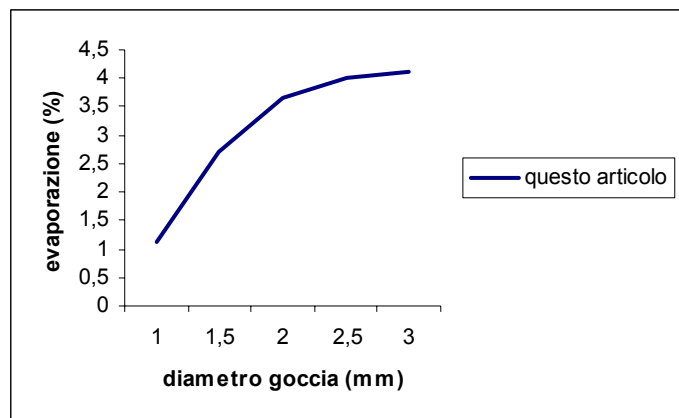


Figura 4.1. Evaporazione delle gocce (dati di Edling [2]).

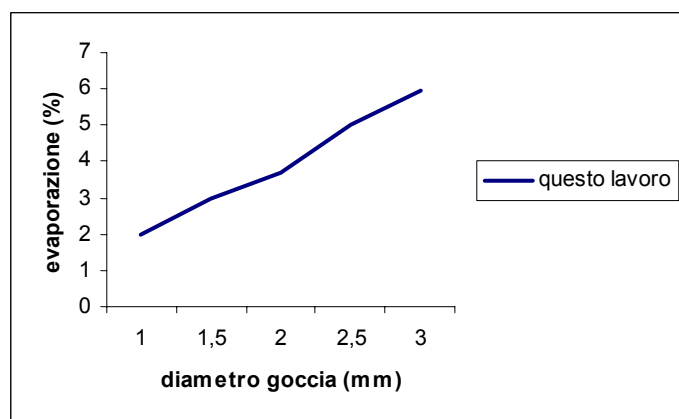


Figura 4.2. Evaporazione delle gocce (dati di Thompson et al. [6]).

## 5. CONCLUSIONI

Il problema dell'energia e quello dell'acqua sono in agricoltura inscindibilmente legati nella gestione delle varie metodologie operative finalizzate alla produzione. Fra di esse spicca senz'altro l'irrigazione che, nella pratica a spray, associa la distribuzione idrica ad una perdita energetica di natura dissipativa legata all'attrito che le gocce d'acqua durante il loro transito aereo incontrano con l'aria. Tale perdita energetica si traduce in una evaporazione parziale delle gocce stesse con conseguente danno economico ed ecologico all'intero ciclo irriguo. Il danno economico, come peraltro evidente, è dovuto al fatto che non tutta l'acqua percepita al "contatore" raggiunge terra e quindi viene resa efficace ai fini agricoli, richiedendo così un surplus di consumo che ha ovviamente un costo. Il danno ecologico, sicuramente ancora più grave anche se purtroppo di minor impatto temporaneo sul singolo utente, si

lega al fatto che una dissipazione energetica dell'acqua, proprio perché richiede un surplus di consumo, va a determinare con il tempo un eccessivo sfruttamento delle falde sotterranee d'acqua dolce causandone un progressivo disseccamento ed in aggiunta cagiona una crescita del fenomeno della subsidenza, che già in molti luoghi come nelle parti costiere dell'Emilia-Romagna, sta provocando uno sprofondamento del suolo. Il presente lavoro, conscio di questi problemi, ha suggerito l'applicazione al problema energetico specifico di un modello matematico per la descrizione del processo di irrigazione a spray che, in chiave cinematica, ha già dato ottimi risultati. Le indicazioni qualitative qui fornite danno, nei limiti specificati in sezione 4, la prova della significatività dell'effetto dell'attrito dell'aria sull'intero processo di irrigazione a spray, ponendo quindi l'accento su questo parametro, finora trascurato in letteratura. Ulteriori sviluppi del modello per una descrizione di natura anche quantitativa del processo reale sono in corso.

## NOMENCLATURA

$A$ , sezione trasversale della goccia,  $m^2$   
 $f$ , fattore d'attrito secondo Fanning  
 $g$ , accelerazione di gravità,  $m\ s^{-2}$   
 $h$ , altezza da terra dello spruzzatore,  $m$   
 $k$ , parametro d'attrito,  $kg\ m^{-1}$   
 $m$ , massa della goccia,  $kg$   
 $n$ , massa reale della goccia considerando il galleggiamento,  $kg$   
 $t$ , tempo,  $s$   
 $v_{0x}$ , velocità orizzontale iniziale,  $m\ s^{-1}$   
 $v_{0y}$ , velocità verticale iniziale,  $m\ s^{-1}$   
 $\bullet \bullet$   
 $x, \dot{x}$ , velocità e accelerazioni orizzontali,  $m\ s^{-1}, m\ s^{-2}$   
 $\bullet \bullet$   
 $y, \dot{y}$ , velocità e accelerazioni verticali,  $m\ s^{-1}, m\ s^{-2}$   
 $\rho$ , densità dell'aria,  $kg\ m^{-3}$   
 $\tau$ , tempo di volo della goccia,  $s$

## BIBLIOGRAFIA

1. Kinzer, G. D., Gunn, R. 1951. The evaporation, temperature and thermal relaxation-time of freely falling waterdrops. *Journal of Meteorology* 8(2): 71-83.
2. Edling, R. J. 1985. Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. *Transactions of the ASAE* 28 (5): 1543 – 1550.
3. Kincaid, D. C., Longley, T. S. 1989. A water droplet evaporation and temperature model. *Transactions of the ASAE* 32 (2): 457 – 463.
4. Tarjuelo, J. M., Ortega, J. F., Montero, J., de Juan, J. A. 2000. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management* 43(3): 263-284.
5. Smolik, J., Dzumbova, L., Schwarz, J., Kulmala, M. 2001. Evaporation of ventilated water droplet: connection between heat and mass transfer. *Journal of Aerosol Science* 32: 739-748.
6. Thompson, A. L., Gilley, J. R., Norman, J. M. 1993. A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy

model: II. Model application. *Transactions of the ASAE* 36 (3): 743-750.

7. Lorenzini, G. 2004. Simplified Modelling of Sprinkler Droplet Dynamics. *Biosystems Engineering* 87 (1): 1 - 11.
8. Bird, R. B., Steward, W. E., Lightfoot, E. N. 1960. Transport phenomena. New York : Wiley & Sons.
9. Keller, J., Bliesner , R. D. 1990. Sprinkler and trickle irrigation. New York: Van Nostrand Reinhold.
10. Lorenzini, G., De Wrachien, D. 2003. Phenomenological analysis of sprinkling spray evaporation: the air friction effect. *Rivista di Ingegneria Agraria* (4), 49-54.