



## SISTEMA DI ELABORAZIONE DELLE CURVE TIME DOMAIN REFLECTOMETRY PER STAZIONI AUTOMATICHE DI MISURA DEL CONTENUTO IDRICO DEL SUOLO

*I. Bevilaqua<sup>1</sup>, D. Canone<sup>1</sup>, M. Previati<sup>1</sup>, D. Pognant<sup>1</sup>, E. Strolla<sup>1</sup>, S. Ferrari<sup>1</sup>,  
S. Ferraris<sup>1</sup>*

(1) Dipartimento di Economia e Ingegneria Agraria Forestale e Ambientale (DEIAFA),  
Sez. Idraulica Agraria, Università degli Studi di Torino.

### SOMMARIO

*Uno delle metodologie maggiormente diffuse per la determinazione del contenuto idrico volumetrico del suolo è la Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR). Tale tecnica, basata sulla correlazione esistente tra la permittività elettrica relativa ed il contenuto idrico del suolo, è tra le più utilizzate in virtù della rapidità, precisione e scarsa invasività delle misure. La permittività viene ricavata attraverso l'analisi della riflessione delle curve generate dallo strumento. Tali curve, in relazione alle caratteristiche del suolo, al suo contenuto idrico e alla geometria delle sonde, possono contenere anomalie o essere di difficile interpretazione, generando potenziali errori sulla misura del contenuto idrico. Per ovviare a questi problemi nella presente memoria viene descritto un sistema automatico basato su un codice MATLAB<sup>®</sup> per l'elaborazione delle curve TDR acquisite da una stazione automatica composta da 160 sonde di lunghezza compresa tra 0.15 e 2.0 m. Il software è risultato essere molto efficace sia nella gestione e nell'analisi delle curve TDR che nell'elaborazione del contenuto idrico del suolo.*

*Parole chiave: TDR, idrologia, contenuto idrico del suolo*

### 1 INTRODUZIONE

La conoscenza del contenuto idrico degli strati più superficiali del suolo è un fatto di cruciale importanza per comprendere i diversi processi idrologici ed eco-idrologici. La Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR) è la tecnica di riferimento per la misura del contenuto idrico volumetrico  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) nei mezzi porosi, che si basa sulla correlazione tra  $\theta$  e la permittività elettrica relativa  $\varepsilon_r$  (-) del mezzo indagato.

Nel presente studio la permittività del suolo è stata considerata come la permittività composita  $\varepsilon_c$  (-) della fasi solida, liquida e gassosa del suolo.

Le prime applicazioni della TDR per la misura del contenuto idrico del suolo risalgono alla fine degli anni settanta (Davis & Chudobiak, 1975; Topp et al., 1980). Negli ultimi due decenni, questa tecnica è diventata di riferimento grazie alla rapidità, precisione e ridotta invasività delle misure, nonché alla sua relativa semplicità di

utilizzo e alla possibilità di creare stazioni automatizzate (Heimovaara & Bouten, 1990).

La TDR misura le cadute e le risalite di tensione di un segnale elettrico lungo una guida d'onda (la sonda) in funzione delle caratteristiche di impedenza del materiale attraversato (il suolo) e le registra sotto forma di curve. L'interpretazione di tali curve per individuarne i punti di riflessione e ricavare  $\varepsilon_c$  è un lavoro complesso. Infatti le riflessioni dell'onda dipendono, oltre che da  $\theta$ , anche dalla concentrazione di elettroliti e dal contenuto di argilla (Topp *et al.*, 1980). Inoltre, anche la lunghezza delle sonde influisce sul segnale. Con sonde molto lunghe, le riflessioni sono difficilmente osservabili, mentre con sonde molto corte risulta difficile misurare il tempo di percorrenza del segnale. Il valore di  $\varepsilon_c$ , dipende dal tempo di percorrenza del segnale, definito come la distanza tra la prima e la seconda riflessione. Ottenuta la permittività apparente ( $\varepsilon_a$ ), da questa si può ricavare  $\theta$  attraverso formule empiriche (Topp *et al.*, 1980) o fisicamente basate (Roth *et al.*, 1990; Hook & Livingston, 1995).

Le curve sono state acquisite con il programma WinTDR (Or *et al.*, 2004), il quale consente la loro elaborazione, ma l'algoritmo che utilizza per l'analisi delle curve ha alcuni limiti e consente di calcolare  $\theta$  solo con formule empiriche. D'altro canto l'elaborazione manuale, oltre a richiedere molto tempo, è influenzata dalla soggettività dell'operatore nell'individuare i punti di riflessione.

Per questo motivo è stato messo a punto un metodo di elaborazione, sviluppato in ambiente MATLAB<sup>®</sup> per l'elaborazione automatica di  $\theta$  a partire dalle curve TDR.

Il programma inizialmente sottopone le curve a una fase di *smoothing* e individua ed elimina dal dataset le curve anomale, dopodiché individua i punti di riflessione ed infine calcola  $\theta$  con la formula di Roth *et al.* (1990). Con tale programma sono state elaborate le curve acquisite tra il 16/08/2005 e il 20/01/2009, per un totale di 1.641.192 curve. I risultati ottenuti sono stati quindi confrontati a campione con quelli ottenuti con l'elaborazione manuale per verificare l'efficacia del metodo proposto.

## 2 LA RIFLETTOMETRIA NEL DOMINIO DEL TEMPO (TDR)

Il suolo inteso come mezzo poroso è composto da tre fasi: solida, liquida e gassosa. La fase liquida a sua volta si divide in acqua libera, i cui movimenti sono governati dalla capillarità e dalla forza gravitazionale, e acqua legata, le cui molecole sono vincolate alla fase solida. Quando le molecole d'acqua libera vengono immerse in un campo elettromagnetico esse si orientano assorbendo dell'energia che viene poi rilasciata nel momento in cui il campo cessa.

Lo strumento TDR invia nel suolo un segnale a gradino con un tempo di risalita di 200 ps (Heimovaara, 1994) lungo una guida d'onda (la sonda), la cui velocità  $v$  è funzione di  $\varepsilon_c$  (-), la quale è definita come il rapporto tra la permittività del materiale  $\varepsilon$  ( $F m^{-1}$ ) e quella dello spazio libero  $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  ( $F m^{-1}$ ). L'impulso percorre la sonda e al suo termine si riflette ritornando al TDR, dopo un tempo dipendente dalla velocità di propagazione. Il rapporto tra il tempo di percorrenza, la sua lunghezza e  $\varepsilon_c$  è dato da:

$$J_c = \left( \frac{tcL}{c} \right)^2 \quad (1)$$

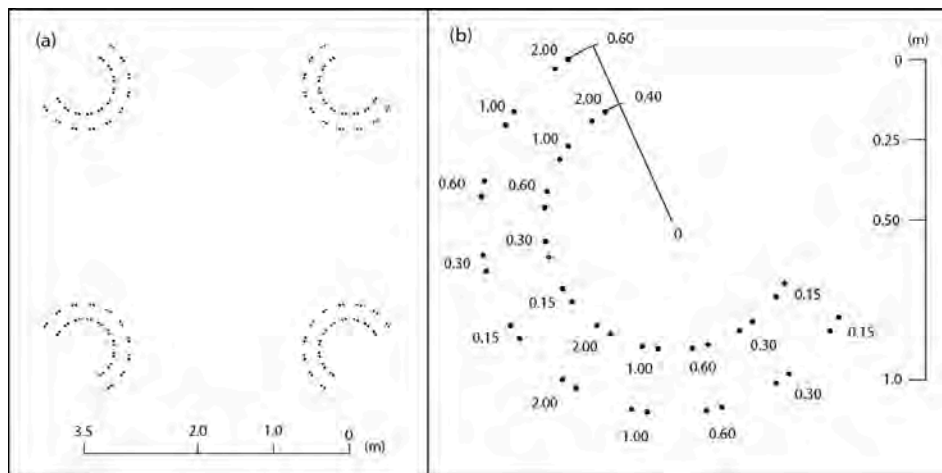
dove  $c$  è la velocità della luce =  $3 \cdot 10^8$  ( $m s^{-1}$ ),  $L$  è la lunghezza della sonda (m) e  $At$  (s) è il tempo di percorrenza del segnale. Il valore di  $\varepsilon_c$  è inversamente proporzionale al quadrato della velocità di transito dell'impulso elettrico  $v$  (m/s). Tali due grandezze sono legate dalla seguente equazione:

$$v_c = \sqrt{J_c} \quad (2)$$

### 3 LA STAZIONE AUTOMATICA

Il sistema automatizzato si trova a Grugliasco, nel campo sperimentale del campus della Facoltà di Agraria dell'Università di Torino (297 m s.l.m.). L'area in cui si trova la stazione di misura ha una copertura erbacea e in una sua parte ospita sedici piante di vite (*Vitis vinifera* L.). La tessitura sabbiosa del suolo e la quasi totale assenza di scheletro hanno permesso di installare le sonde fino alla profondità di due metri senza creare vie di deflusso preferenziali.

La stazione è composta da 160 sonde, formate da due aste in acciaio inossidabile di diametro di  $6 \cdot 10^{-3}$  m, distanziate di  $6 \cdot 10^{-2}$  m inserite verticalmente nel suolo a diverse profondità (0.15, 0.3, 0.6, 1.0 e 2.0 m) e organizzate in gruppi di 20 di diversa lunghezza lungo due semicirconferenze del diametro di 0.4 e 0.6 m (Fig. 1). Le sonde sono gestite attraverso un personal computer da cui il programma WinTDR (Or et al., 2004) si interfaccia con un TDR Tektronix 1502c il quale, attraverso un sistema di multiplexer effettua le acquisizioni con cadenza oraria e le memorizza su disco in un file di testo.



**Figura 1.** (a) Disposizione di quattro degli otto gruppi di sonde che compongono la stazione automatica; (b) organizzazione delle sonde di diversa lunghezza all'interno di uno dei gruppi.

### 4 ELABORAZIONE DATI

#### 4.1 Analisi delle curve TDR

Attualmente in letteratura sono riportati tre metodi per individuare i punti di riflessione: (i) interpretazione manuale delle linee tangenti (Topp et al., 1982; Baker & Allamaras, 1990); (ii) analisi dei punti caratteristici della derivata (Or et al., 2004); (iii) analisi inversa dell'onda TDR (Yanuka et al., 1988). Tra questi tre metodi il secondo è

stato usato come punto di partenza, in quanto è quello che meglio si presta ad essere implementato sotto forma di software.

#### **4.2 Gestione e organizzazione del database**

Lo strumento TDR discretizza le curve in 251 punti e il programma WinTDR le salva in un file di testo. Per via della diversa lunghezza delle sonde e della variabilità del contenuto idrico del suolo, le curve acquisite hanno forme molto variabili. Per questo motivo, la prima fase del lavoro è consistita nel suddividere l'insieme delle curve in 5 gruppi in base alla lunghezza delle sonde, selezionando per ogni gruppo un set di curve campione contenente delle curve interpretabili, e curve anomale.

#### **4.3 Pre-processamento delle curve**

Le curve TDR possono essere affette da un rumore di fondo, che graficamente si traduce nella presenza di numerosi micro picchi, i quali interferiscono con la corretta individuazione dei punti di riflessione. Per questo motivo prima di essere analizzate secondo la procedura descritta nei paragrafi seguenti, le curve sono state sottoposte a una fase di *smoothing* per migliorarne l'elaborabilità. Tra i metodi disponibili in MATLAB®, quello che si è dimostrato essere più adatto è il *loess*. Esso si basa su una regressione ai minimi quadrati pesata su un intervallo di dati pari al 9% dei punti della curva. Ogni dato viene processato definendo una funzione che approssima i punti compresi nell'intervallo in base alla distanza dal dato centrale.

Una volta applicato l'algoritmo di *smoothing* il programma calcola le derivate prime e seconde di ogni curva, necessarie per applicare le procedure descritte nei seguenti paragrafi.

##### **4.3.1 Filtraggio dei dati**

In questa fase vengono individuate le curve che hanno una forma anomala (dovuta a errori dello strumento, danni ai cavi coassiali, ai multiplexer o alle teste delle sonde), che non possono essere elaborate. Tale procedimento è stato realizzato individuando una serie di parametri discriminanti, ottenuti analizzando le curve campione precedentemente selezionate, e incorporandoli nel codice MATLAB® sotto forma di una serie di istruzioni condizionali. Solo le curve che soddisfano tutti questi requisiti sono state considerate interpretabili e sottoposte alle fasi successive.

##### **4.3.2 Analisi dei punti di riflessione**

Il primo punto di riflessione, il quale è determinato dalla lunghezza del cavo che collega il TDR alla sonda e dalle caratteristiche costruttive di quest'ultima è stato considerato come una caratteristica della sonda. Per ognuna delle 160 sonde il punto della prima riflessione è stato individuato cortocircuitando le aste a valle della testa della sonda in modo da evidenziare in quale punto il segnale si separa dalla curva rilevata nel suolo secco. I valori così ottenuti, associati al codice numerico identificativo della sonda, sono diventati costanti numeriche del codice.

Il secondo punto di riflessione è individuato dall'intersezione di due tangenti tracciate nei punti significativi delle curve seguendo il metodo descritto da *Or et al.* (2004). Le tangenti sono calcolate nel punto di flesso successivo alla seconda riflessione e nel punto di minima tensione tra il flesso precedente e quello successivo al secondo punto di riflessione. Nel caso di curve in cui non è possibile misurare il punto di minima tensione, la tangente orizzontale viene tracciata nel punto di flesso, precedente alla

seconda riflessione.

Sono stati introdotti anche questa volta i parametri che definiscono le modalità di individuazione dei picchi sulle derivate a seconda della lunghezza della sonda.

#### 4.3.3 Calcolo della permittività apparente e del contenuto idrico

Una volta individuati i due punti di riflessione delle curve il programma calcola la distanza tra essi e da questa ricava  $\epsilon_r$  (Eq. 1), e quindi calcola il contenuto idrico volumetrico del suolo  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) attraverso la formula di Roth et al. (1990):

$$N = \frac{\int_{\epsilon_a}^{\epsilon_c} \frac{d\epsilon_r}{\epsilon_r^2}}{\int_{\epsilon_a}^{\epsilon_c} \frac{d\epsilon_r}{\epsilon_r^2}} \quad (3)$$

dove  $\eta = 37\%$  è la stima della porosità del suolo,  $\alpha = 0.46$  (-) è un coefficiente empirico,  $\epsilon_c$  è la permittività composta del suolo,  $\epsilon_w = 80.36$  (-) è la permittività dell'acqua a 20 °C,  $\epsilon_s = 4.45$  (-) è la permittività della fase solida del suolo ed  $\epsilon_a = 1.00059$  (-) è la permittività dell'aria.

## 5 RISULTATI

Una volta ultimata la scrittura del programma si è proceduto a effettuare un confronto tra i valori di contenuto idrico ottenuti mediante l'elaborazione automatica e un campione di 4000 dati ottenuti attraverso l'elaborazione manuale.

Gli scarti osservati (Fig. 2) sono quasi sempre prossimi all'errore strumentale del TDR, pari a  $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Hook & Livingston, 1995) e sono quindi trascurabili. Le massime differenze di contenuto idrico riscontrate sono di  $\pm 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e almeno in parte sono da attribuire alla soggettività intrinseca nell'elaborazione manuale.

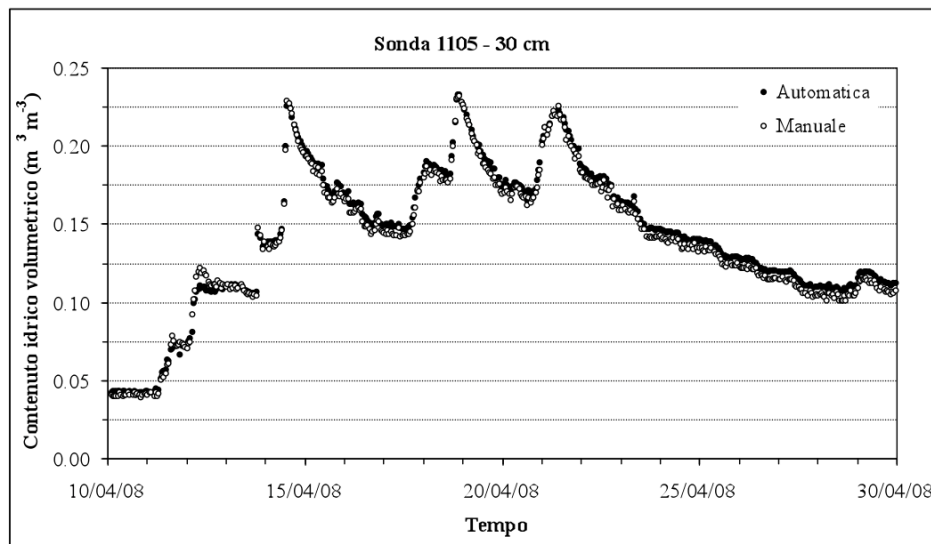


Figura 2. Confronto tra i contenuti idrici elaborati manualmente e quelli elaborati con il metodo proposto relativi a una sonda di 30 cm di lunghezza e a un lasso di tempo di 20 giorni.

## 6 CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro è stato lo sviluppo di un sistema per l'analisi dei dati TDR per la misura del contenuto idrico del suolo attraverso un nuovo metodo e la sua implementazione in un software realizzato in ambiente MATLAB®.

La metodologia proposta semplifica notevolmente la procedura di analisi delle curve TDR, gestendo e organizzando le misure, calcolando direttamente il contenuto idrico del suolo. Oltre a eliminare la soggettività dell'operatore nell'interpretazione delle curve, si riduce drasticamente il tempo necessario alla loro elaborazione. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante nel caso di un sistema automatizzato formato da un grande numero di sonde ad elevata frequenza di campionamento, come quello preso in esame.

## BIBLIOGRAFIA

- Baker, J.M. & Allmaras, R.R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by Time-Domain Reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 55, 1-6.
- Davis, J.L. & Chudobiak, W.J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. *Geological Survey of Canada Paper*, 1975, 75(1), Part A, 75-79.
- Heimovaara, T.G. & Bouten, W. A computer controlled 36 channel Time Domain Reflectometry system for monitoring soil water contents, *Water Resources Research*, 1990, 26(10), 2311-2316.
- Heimovaara, T.G., Bouten, W. & Verstraten, J.M. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 2. A four-component complex dielectric mixing model for soils. *Water Resources Research*, 1994, 30(2), 201-209.
- Hook, W.R. & Livingston, N.J. Errors in converting Time Domain Reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 1995 60(1), 35-41.
- Or, D., Jones, S.B., van Shaar, J.R., Humphries, S. & Koberstein, L. Win TDR Version 6.1 – Soil analysis software users guide, (USU Soil Physics Group), University of Connecticut and Utah State University, 2004.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D. & Friedman, S.P. A Review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soil using Time Domain Reflectometry, *Vadose Zone Journal*, 2003, 2, 444-475.
- Roth, K., Schulin, R., Fluehler, H. & Attinger, W. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resources Research*, 1990, 26(10), 2267-2273, doi: 10.1029/WR026i010p02267.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 1980, 16(3), 574-582.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines, *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46, 678-684.
- Yanuka, M., Topp, G.C., Zegelin, S. & Zebchuk, W.D. Multiple reflection and attenuation of Time Domain Reflectometry pulses: Theoretical considerations for application to soil and water, *Water Resources Research*, 1988, 7, 939-944.