

# EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO POR GRAVIMETRÍA Y REFLECTOMETRÍA

Quichimbo, Pablo<sup>a,b\*</sup>; Guamán, José<sup>b</sup>; Cajamarca, Milton<sup>b</sup>; Aguirre, A.J.<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Institute of Soil Science and Site Ecology, Dresden University of Technology, Piennner Str. 19. 01737 Tharandt, Germany.

<sup>b</sup> Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Campus Yanuncay: Av. 12 de Octubre y Diego de Tapia, Cuenca, Ecuador.

<sup>c</sup> Proyecto PROMETEO, Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, 9 de Octubre y Ramírez Dávalos, Casa Patrimonial, Quito, Ecuador.

## Resumen

El contenido de humedad del suelo es un parámetro ampliamente usado en las ciencias ambientales y específicamente dentro de la ciencia del suelo, uno de sus usos está orientado hacia el establecimiento de balances de agua para necesidades de riego. En este contexto, se han desarrollado múltiples tecnologías, entre ellas están las basadas en Reflectometría de Dominio Temporal (TDR). Este trabajo se desarrolló con la finalidad de evaluar el contenido de humedad en suelos arcillosos a nivel de parcela, con el uso de dos tipos de sensores TDR, uno de registro automático y el otro de registro manual; estos dos sensores fueron comparados con el método gravimétrico, que es el método estándar de calibración, y fueron evaluados considerando tres profundidades del suelo: 0-20; 20-40, y 40-60 cm. Los resultados mostraron diferencias entre los valores de humedad dados por los sensores TDR y el método gravimétrico, siendo el TDR de medición manual el que mostró diferencias significativas, tendiendo a subestimar el contenido de humedad del suelo en las tres profundidades. Mientras que el TDR de medición automática mostró una mayor asociación con los valores dados por la gravimetría. Sin embargo las estimaciones dadas por los dos equipos resultan ser variables por lo que se concluye

que la recomendación del uso o restricción de este tipo de sensores de humedad en suelos arcillosos se tiene que realizar previo a un estudio de evaluación y calibración.

**Palabras clave:** Humedad del suelo, método gravimétrico, profundidad del suelo, TDR

## EVALUATION OF SOIL MOISTURE CONTENT BY GRAVIMETRY AND REFLECTOMETRY

### Abstract

The soil moisture content has been a parameter widely used in environmental sciences, and particularly in Soil Science one of its several uses has been addressed to the determination of the water balance for irrigation. Under this context, there are several technologies; one of them is the Time Domain Reflectometry (TDR). This work was carried out to assess the soil water content in clay soils at plot scale, testing two TDR sensors, an automatic and a manual equipment. Both sensors were compared to the standard gravimetric method under three soil depths: 0-20, 20-40, and 40-60 cm. Results showed differences between values given by TDR sensors and values from the gravimetric method. The manual TDR shows the highest differences tending to underestimate the values in the three soil depths, while the automatic TDR showed to be more related with the values reported by the gravimetric method. However, estimates given by both sensors result to be variables, therefore the recommendation of use

\*Correspondencia a: Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Campus Yanuncay: Av. 12 de Octubre y Diego de Tapia. Cuenca, Ecuador. Teléfono: +(593) 7 405100 Ext. 3500. e-mail: pablo.quichimbo@ucuenca.edu.ec.

or restriction of this kind of sensors in clay soils need to be given after an study of assessment and calibration.

**Keywords:** Soil depth, soil moisture, TDR, gravimetric method

## I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del contenido de humedad en medios porosos como el suelo ha sido un tema de gran interés en varias disciplinas. [1] Sin embargo, la Ciencia del Suelo marcó un inicio para un rápido desarrollo de la tecnología TDR para las mediciones del contenido de humedad edáfica. [2] Aunque existen muchos métodos que se han desarrollado para este fin, [3] los basados en reflectometría han mostrado múltiples ventajas, como: [4] a) una alta precisión; b) carencia de peligros presentes con otros métodos asociados a radiación; c) excelente resolución espacial y temporal; d) mediciones simples de obtener, con la posibilidad de automatización; y e) requisitos mínimos de calibración bajo ciertas circunstancias. Sin embargo, esta tecnología presenta ciertos inconvenientes en la estimación en suelos orgánicos, volcánicos y de textura fina; y por lo tanto la calibración se requeriría para optimizar la precisión de las estimaciones del contenido de humedad en dichos medios, [5,6] por lo que es de gran importancia el conocer la magnitud de la variación en las estimaciones dadas por el método estándar gravimétrico frente a los de los sensores TDR.

El método de reflectometría de dominio temporal fue creado por Davis & Chudoviak en 1975 [7] y se basa en la determinación de la constante dieléctrica de un objeto mediante el uso de electrodos que se insertan dentro del objeto del cual se requiere conocer tal constante. Este método ha sido ampliamente usado para estimar el contenido de humedad del suelo ya que la constante dieléctrica del agua es mucho mayor que la de cualquier otro componente del suelo. [8-11] Pese a su utilidad, varios estudios han reportado la necesidad de calibración ya sea en laboratorio o *in situ*, siendo esta última recomendada para obtener estimaciones más razonables del contenido volumétrico del agua del suelo, [3,12-15] sin embargo no se han reportado estudios de comparación entre sondas de estimación continua versus las de lectura puntual para conocer

la variación en sus estimaciones frente a un método reconocido como un estándar, como es el caso del método gravimétrico en un suelo de textura fina. Dentro de este contexto, este trabajo pretende evaluar la estimación del contenido de humedad del suelo obtenido por gravimetría y tras el uso de sensores de Reflectometría de Dominio de Tiempo (TDR) a nivel de campo en una zona de suelos de textura fina en el sur de los Andes ecuatorianos. Los resultados de este trabajo contribuirían a conocer si se podrían usar directamente las estimaciones del contenido de humedad dados por los sensores TDR o caso contrario si se debería recurrir a la calibración.

## II. METODOLOGÍA

### Área de estudio

El estudio a nivel de parcela fue desarrollado con la finalidad de eliminar la mayor variabilidad posible aportada por otros factores como la topografía, clima, tipo de suelo, cobertura y uso del suelo. La parcela está localizada en la Granja Experimental "Irkis", de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca, localizada en la provincia del Azuay, al sur de los Andes del Ecuador. Los suelos del área de estudio son Vertisoles según la cartografía de suelos (escala 1:25000). [16]

### Monitoreo y muestreo

La parcela de experimentación tuvo un área de 25 m<sup>2</sup> y está incluida en una zona de pastos degradados. Esta parcela fue aislada mediante una zanja de 2 m de profundidad excavada en los cuatro lados de la misma para evitar la entrada de agua de los alrededores y, además, se la cubrió con un techo de plástico para evitar la entrada de agua por precipitación durante el período de monitoreo. En dicha parcela se evaluaron tres métodos (tratamientos) de estimación del contenido de humedad del suelo: i) método gravimétrico (GRA), ii) TDR de medición automática o continua (TDR1), sensor CS655 (Campbell Scientific Inc., US), y iii) TDR de medición discreta o manual (TDR2), sensor TRIME FM (IMKO, GmbH, Germany). Para cada tratamiento se tuvieron tres repeticiones, disponiendo de un total de 9 subparcelas de 1 m<sup>2</sup> cada una. El contenido de humedad de cada subparcela fue evaluado a tres profundidades: 0-20, 20-40 y 40-60 cm. El período de evaluación fue de una semana, tras la

saturación del suelo mediante un riego abundante. Debido a que el análisis gravimétrico requiere de la extracción de muestras inalteradas, las mismas se extrajeron usando anillos de Kopecky de 100 cm<sup>3</sup> de volumen, y fueron tomadas de las subparcelas de 1 m<sup>2</sup> de acuerdo con un diseño aleatorizado, en donde cada subparcela fue dividida en 100 zonas de 1 dm<sup>2</sup>, de este conjunto, se extrajeron 7 muestras al azar: una por día y profundidad. Este mismo diseño de muestreo se aplicó para las mediciones con el sensor de humedad TRIME FM. Para el TDR1 se instalaron tres sensores, uno por cada profundidad en cada una de las subparcelas y sus repeticiones.

**Tratamiento de datos y análisis estadísticos**

La normalidad y homocedasticidad de los valores de humedad se comprobó con la prueba de Shapiro-Wilks [17] y Bartlett [18] respectivamente. La eliminación de los outliers se llevó a cabo mediante la distancia de Cook. [19] La variable humedad se transformó mediante el método Box-Cox. [20,21] La correlación entre las variables se llevó a cabo mediante el cálculo del coeficiente de Pearson. Para evaluar las posibles diferencias entre los valores de humedad obtenidos a través de los métodos de medición y según profundidad, se llevó a cabo un ANCOVA con éstos como factores fijos. La variable día se añadió como covariable (p = 0,001). A los valores de los factores fijos se les aplicó el test Post-Hoc de Tukey en caso de apreciarse un efecto significativo. Para los efectos fijos y la interacción se calculó el tamaño de su efecto con η<sup>2</sup>. La comparación múltiple de medias se corrigió mediante la ecuación de Bonferroni. [22] Para determinar la calibración entre la humedad medida con los TDRs y la gravimetría, se llevó a cabo una regresión lineal, tanto por profundidades como en total, poniendo en evidencia su significación a través de un ANOVA de los coeficientes. Para todos los análisis se ha utilizado el SAS 9.4 (SAS Institute Inc.).

**III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El contenido de humedad volumétrico en general para el período de monitoreo (7 días) mostró un valor promedio para la profundidad total de 60 cm del suelo de 47,5± 8,64%, considerando el método de gravimetría, que normalmente es el que se considera como método de referencia y calibración. [12] También se puede notar que el contenido de

humedad mostró diferencias significativas entre las profundidades evaluadas, siendo mayor en los primeros 20 cm (Tabla 2) y esto puede explicarse por el aumento del contenido de arcillas con la profundidad (0-60 cm) lo que impide una rápida infiltración contribuyendo al aumento de la humedad en la capa superior. [23] El promedio de la humedad del suelo, en función de la profundidad, a lo largo de los días y según los tres métodos de estimación se muestra en la Fig. 1, en la cual se puede observar que el TDR2 tiende a subestimar el contenido de humedad para las tres profundidades.

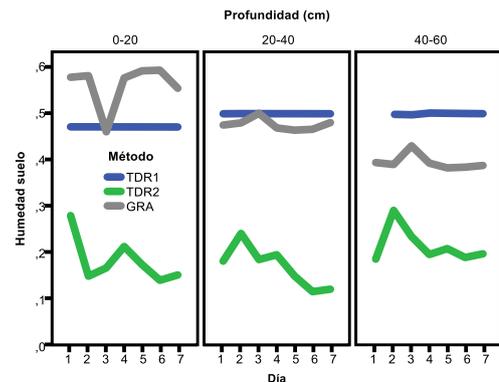


Fig. 1: Humedad del suelo (% de volumen) promedio para cada día, profundidad y método de medición.

La relación existente entre la humedad medida a través de los tres métodos para todas las profundidades se muestra en la Tabla 1, donde se observa una correlación negativa y significativa entre la humedad medida con el TDR1 y GRA, mientras que la humedad estimada con el TDR2 no se correlaciona ni con TDR1 ni con GRA. Sin embargo, en todos los casos los valores del análisis de correlación son bajos, lo que resalta la necesidad de una calibración específica de los TDR para mejorar las estimaciones, dado que las brindadas por la ecuación de Topp [8] implementada por defecto en los equipos TDR bajo estudio muestran relaciones débiles (Ver Tabla 1).

Tabla 1: Correlaciones entre los métodos de medición de la humedad del suelo.

| Humedad |   | (TDR1) | (TDR2) | (GRA) |
|---------|---|--------|--------|-------|
| (TDR1)  | r | 1      |        |       |
|         | p |        |        |       |
|         | N | 49     |        |       |
| (TDR2)  | r | 0,176  | 1      |       |
|         | p | 0,231  |        |       |
|         | N | 48     | 63     |       |
| (GRA)   | r | -0,364 | -0,141 | 1     |
|         | p | 0,010  | 0,272  |       |
|         | N | 49     | 63     | 63    |

r: coeficiente de correlación de Pearson; p: significación; N: número de observaciones.

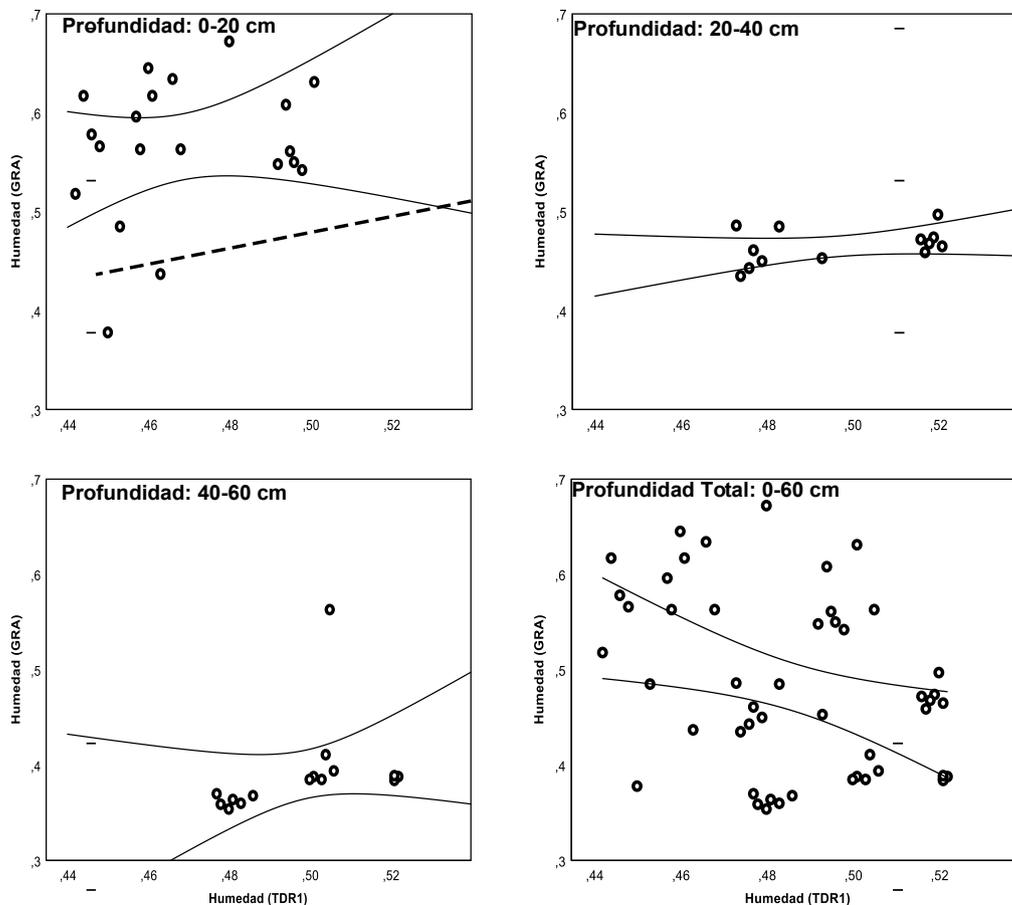
La humedad medida mediante el TDR2 resulta significativamente menor a la medida con el TDR1 y GRA. La humedad disminuye significativamente a partir de los 20 cm de profundidad (Tabla 2). La interacción entre el método y la profundidad resulta significativa ( $p < 0,001$ ). El modelo explica casi el 92% de la variabilidad observada. El mayor efecto sobre los valores de humedad es debido al método utilizado ( $\eta^2 = 0,120$ ), seguido de la interacción entre método y profundidad ( $\eta^2 = 0,010$ ), mientras que el efecto de la profundidad resulta irrelevante ( $\eta^2 < 0,001$ ).

La relación entre los valores de humedad obtenidos con el TDR1, que es el que presenta los mayores valores de correlación con la gravimetría (GRA) según las distintas profundidades, se muestra en la Fig. 2.

**Tabla 2:** Medias mínimo cuadráticas de la humedad del suelo según métodos de medición y profundidad

| Variables     | Método medida |        |        | Profundidad (cm) |        |        | Probabilidad |              |              |
|---------------|---------------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|
|               | TDR1          | TDR2   | GRA    | 0-20             | 20-40  | 40-60  | SED          | <i>p</i> -Me | <i>p</i> -Pr |
| Humedad suelo | 0,490b        | 0,186a | 0,474b | 0,403b           | 0,379a | 0,368a | 0,012        | < 0,001      | < 0,001      |

Método de medición (Me) y Profundidad (Pr). SED: error estándar de la diferencia de medias. *p*: valor de probabilidad. Letras distintas ponen en evidencia diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) tras la aplicación del test Post-Hoc.  $R^2A$  (coeficiente de determinación ajustado) = 0,919.



**Fig. 2:** Regresión lineal con intervalo de confianza para la media entre la humedad medida a través del TDR1 y GRA, según profundidades.

El ajuste estadístico entre los valores de humedad medidos con TDR1 y GRA sólo resulta significativo cuando se incluyen las tres profundidades. No obstante, nuestros resultados sólo ajustan el 11,4% de la variabilidad observada (Tabla 3). Estos resultados muestran que el uso de TDRs en suelos arcillosos, tienden a estimar valores imprecisos, al respecto en el año 2003 Robinson et al., en su artículo de revisión [11] menciona que las estimaciones dadas por los equipos TDR tienen que ser tomadas con precaución dependiendo del tipo de arcillas, presentándose mayores errores en los suelos que presentan arcillas expansivas, como es el caso de los suelos presentes en el área de estudio. Por lo tanto, conociendo la magnitud de las variaciones en las estimaciones del contenido de humedad para esos suelos dadas por los sensores, es fácil entender cual es el error en sus estimaciones previo a la recomendación de la calibración de los mismos, sin embargo hay que considerar también las limitaciones de este trabajo, ya que solo se está evaluando el contenido de humedad cercano al punto de capacidad de campo (sin embargo, investigaciones paralelas a este estudio están siendo ejecutadas en esta misma zona para cubrir estas limitaciones).

**Tabla 3:** Ecuación lineal entre la humedad medida a través del TDR1 Y GRA.

| Profundidad (cm) | Ecuación                | R <sup>2</sup> A | p     |
|------------------|-------------------------|------------------|-------|
| 0-20             | GRA=0,190+(0,801×TDR1)  | 0,053            | 0,329 |
| 20-40            | GRA=0,298+(0,337×TDR1)  | 0,080            | 0,180 |
| 40-60            | GRA=-0,074+(0,931×TDR1) | 0,038            | 0,228 |
| Todas            | GRA=1,161-(1,397×TDR1)  | 0,114            | 0,010 |

R<sup>2</sup>A = coeficiente de determinación ajustado; p = valor de significancia.

#### IV. CONCLUSIONES

Frente al método estándar de gravimetría para la estimación del contenido de humedad del suelo, los sensores TDR usados en este estudio mostraron valores diferentes, siendo los TDR de medición continua los que más se ajustaron a los valores dados por el método gravimetría. No obstante, de la evaluación realizada para los dos tipos de sensores usados en este estudio, las estimaciones en general son poco precisas ya que en unos casos tienden a subestimar o sobrestimar la cantidad de humedad

presente en el suelo, esto sugiere que en los suelos de textura fina el uso de esta tecnología tendría que ser recomendada o restringida tras una evaluación y calibración de los equipos, especialmente en el caso de suelos con arcillas expansibles. No obstante, este estudio estuvo restringido a estimaciones en un rango de contenido de humedad cercano al valor de capacidad de campo, sería recomendable realizar una evaluación en un rango más amplio de fuerza de retención, por ejemplo, en retenciones cercanas hasta el punto de marchitez.

#### AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado gracias al financiamiento brindado por el "Grupo de Investigación de Suelos" de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Cuenca. Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus comentarios constructivos y sus sugerencias que contribuyeron a mejorar este artículo.

#### REFERENCIAS

- [1] K. Noborio (2001) "Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review", *Comput. Electron. Agric.* 31(3), 213–237.
- [2] R. Černý (2009) "Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review", *Measurement*. 42(3), 329–336.
- [3] S. S. Zanetti, R. A. Cecílio, V. H. Silva, E. G. Alves (2015) "General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks", *J. Hydrol.* 530, 657–666.
- [4] S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or (2002) "Time domain reflectometry measurement principles and applications", *Hydrol. Process.* 16(1), 141–153.
- [5] Y. Zhao, D. Ling, Y. Wang, B. Huang, H. Wang (2016) "Study on a calibration equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry", *J. Zhejiang Univ. Sci. A.* 17(3), 240–252.
- [6] Campbell Scientific Inc. (2016) "CS650 and CS655 Water Content Reflectometers, Instruction Manual", Revision: 6/16. Utah, US. Campbell Scientific, Inc., 2012-2016.
- [7] J. L. Davis, W. J. Chudoviyak (1975) "In situ meter for measuring relative permittivity of soil", Geological Survey of Canada, Ottawa, ONT, Canada, Rep. Project 630049.

- [8] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan (1980) "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines", *Water Resour. Res.* 16(3), 574-582.
- [9] J. Ledieu, P. De Ridder, P. D. E. Clerck, S. Dautrebande (1989) "A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry", *J. Hydrol.* 88, 319-328.
- [10] D. C. Nielsen, H. J. Lagae, R. L. Anderson (1995) "Time-Domain Reflectometry Measurements of Surface Soil Water Content", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59(1), 103-105.
- [11] D. A. Robinson, S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or, S. P. Friedman (2003) "A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry", *Vadose Zo. J.* 2, 444-475.
- [12] K. Roth, R. Schulin, H. Flühler, W. Attinger (1990) "Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach", *Water Resources Research.* 26(10), 2267-2273.
- [13] W. Skierucha (2000) "Accuracy of soil moisture measurement by TDR technique", *Int. Agrophysics.* 14, 417-426.
- [14] S. H. Jackson (2004) "In situ calibration of time domain reflectometry sensors in multiple soils", *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35(5-6), 865-878.
- [15] M. A. J. Inzunza Ibarra, M. A. Inzunza Ibarra, E. A. Catalan Valencia, M. Villa Casorena, Ma, G. Delgado Ramirez (2012) "Calibración de TDR para estimar el contenido de humedad volumétrica en el suelo", *AGROFAZ.* 12(3), 59-65.
- [16] Instituto Espacial Ecuatoriano (2012) "Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional a escala 1:25000: información de Geopedología en formato shp", Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), Quito, EC.
- [17] S. Shapiro, M. Wilk (1964) "An analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika.* 52(3), 591-611.
- [18] M. S. Bartlett (1992) "Properties of Sufficiency and Statistical Tests", in *Breakthroughs in Statistics: Foundations and Basic Theory*, S. Kotz and N. L. Johnson, Eds. New York, NY: Springer New York, pp. 113-126.
- [19] R. D. Cook (2000) "Detection of Influential Observation in Linear Regression", *Technometrics.* 42(1), 65-68.
- [20] G. Box, D. Cox (1964) "An analysis of transformations", *J. R. Stat. Soc. Series B.* 26(2), 211-252.
- [21] R. Sakia (1992) "The Box-Cox transformation technique: a review", *J. R. Stat. Soc. Series D.* 41(2), 169-178.
- [22] O. J. Dunn (1961) "Multiple Comparisons Among Means", *J. Am. Stat. Assoc.* 56(293), 52-64.
- [23] R. Lal, M. Shukla (2004) "Principles of soil physics", 1st Edition. New York, US, Marcel Dekker, pp. 390-391.