



## Funciones hidráulicas en suelos loésicos no saturados en una parcela experimental

Reyna, Teresa <sup>1</sup> ✉ - Reyna, Santiago<sup>1</sup> - Lábaque, María <sup>1</sup> - Fulginiti, Fabián <sup>1</sup>

Recibido: 02 de mayo de 2011 • Aceptado: 01 de agosto de 2011

### Resumen

*Para determinar el flujo de agua en la zona vadosa es necesario resolver la ecuación de Richards y para ello se necesitan definir las funciones hidráulicas: humedad del suelo - succión y conductividad hidráulica - succión. Estas funciones requieren de la determinación de las propiedades hidráulicas que pueden obtenerse mediante la medición del contenido de agua (perfiles de humedad) en laboratorio o en campo.*

*El objetivo de este trabajo fue la verificación de las curvas de humedad de los suelos loésicos al sur de la ciudad de Córdoba determinadas teóricamente a través de estudios realizados en laboratorio, en otros suelos y curvas granulométricas. Para ello se realizaron modelaciones de infiltración utilizando las funciones hidráulicas determinadas y se contrastaron con las mediciones realizadas. Las mediciones se efectuaron utilizando tres sondas (una de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo y dos sólo de Humedad) que se instalaron a distintas profundidades. Este análisis muestran que las funciones hidráulicas determinadas precedentemente representan adecuadamente el comportamiento de humedecimiento y secado. Los resultados de la simulación justifican utilizar metodologías que permitan incorporar las propiedades hidráulicas de los suelos en las simulaciones hidrológicas para representar la respuesta del suelo frente a los eventos de precipitación y secado.*

**Palabras clave:** funciones hidráulicas, loess, zona vadosa.

### Abstract

*To determine the water flow in the vadose zone is necessary to solve the Richards equation and for this purpose it is needed to define the hydraulic functions: soil moisture - suction and hydraulic conductivity - suction. These functions require the determination of hydraulic properties. These properties can be obtained by measuring the water content (humidity profiles) in laboratory or field.*

*The aim of this study was the verification of soil moisture curves for loessic soil of the south of the city of Córdoba that were determined theoretically by laboratory studies in other soils and for other grading curves. This infiltration models were made using hydraulic functions determined and compared with instrumented measurements. The measurements were made using three probes (one for Humidity, Temperature and Electrical Conductivity, and two for Soil Moisture only) that were installed at different depths.*

**Keywords:** hydraulics functions, loess, vadose zone.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNC)  
Av. Vélez Sarsfield 1611 Córdoba, Córdoba, Argentina

✉ teresamaria.reyna@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

Cuando no es posible tener mediciones de las propiedades hidráulicas en todo el rango de succión, se pueden determinar las curvas de humedad-succión y conductividad hidráulica-succión del suelo combinando los conocimientos de las propiedades de otros suelos y el conocimiento de otros parámetros del suelo en estudio. Si los datos de campo o laboratorio son escasos se pueden utilizar otros parámetros del suelo para definir sus funciones hidráulicas.

*Bredden (1963)* planteó una clasificación gráfica que permite establecer la conductividad hidráulica saturada a través de las curvas granulométricas de suelos. En particular, el conocimiento de la distribución granulométrica y los parámetros de humedad natural, humedad saturada y conductividad hidráulica saturada (todos parámetros que se determinan de manera frecuentes con ensayos estándares en cualquier laboratorio de suelos) permiten obtener las funciones de conductividad hidráulica y humedad del suelo en forma aproximada (*Reyna, 2000*).

Los suelos loésicos de Argentina constituyen el principal depósito de su tipo en Sudamérica, cubriendo más de 600.000 km<sup>2</sup> de superficie. Son suelos de origen eólico, que pueden conservar su estructura generada al depositarse (loess primario) o sufrir transporte o alternación in-situ (loess secundario o loessoides) (*Rocca et al., 2006*)

Recientemente se han realizado avances en el conocimiento de los procesos de cementación, las propiedades dieléctricas y las variaciones mecánicas con distintos niveles de deformaciones,

en el empleo de nuevos métodos no destructivos, ensayos in-situ y variaciones areales de los parámetros más significativos (*Rocca et al., 2006*).

Sin embargo la información de sus propiedades hidráulicas es escasa o inexistente. Las funciones hidráulicas no estaban definidas; los valores existentes de humedad - succión en todo el rango eran escasos y el único dato sobre conductividad hidráulica era en estado saturado. Durante el año 2000, se propusieron funciones hidráulicas teóricas para el loess de la Ciudad de Córdoba (*Reyna, 2000*).

El objetivo de este trabajo fue la verificación de las curvas de humedad de suelos loésicos determinadas utilizando estas funciones hidráulicas teóricas en una parcela experimental de 5 x5 m, ubicada al sur de la ciudad de Córdoba (31°26'24.91"S; 64°10'44.51"O). Para ello se contrastaron estas curvas con los valores medidos obtenidos mediante sensores de humedad ante la ocurrencia de eventos de precipitación y de riego en la parcela experimental.

## SUELOS LOÉSICOS

Los estudios geotécnicos realizados en general en Córdoba sobre el loess son muy importantes desde el punto de vista de la geotecnia, pero no se adecuan a las necesidades hidrogeológicas. Por este motivo fue necesario determinar las funciones hidráulicas.

Unas de las principales dificultades que se encuentran para modelar los procesos de infiltración es la de conocer los



Figura 1. Ubicación Zona de estudio.

parámetros de los suelos para lograr una adecuada representación de la realidad.

En la ciudad de Córdoba no se conocen tareas sistemáticas de producción experimental de datos de mediciones de infiltración en áreas permeables urbanas (Weber et al., 2005).

Existen mediciones de conductividad saturada en loess y permeabilidad en función de la presión vertical efectiva para muestras compactadas y en estado natural permeadas con distintas soluciones para un estudio de la conductividad del loess natural y limo mejorado para el diseño de barreras. Es importante destacar que debido a las técnicas utilizadas en todas las mediciones realizadas, no se tienen valores de conductividad hidráulica para distintas succiones. Por este motivo, para determinar la conductividad hidráulica en función de la succión se realizó un estudio de las propiedades hidráulicas de los suelos finos.

El loess de Córdoba en general está compuesto por: Arena fina (>0,080 mm): 3,1%, Limo (0,080 a 0,002 mm): 84,4% y Arcilla (<0,002 mm): 12,5%. El Peso Unitario Seco promedio es ( $\gamma_d$ ): 13,14 kN/m<sup>3</sup> (1,34 g/cm<sup>3</sup>) y el grado de saturación varía entre el 27% y el 38% (Redolfi, 1993). En la tabla 1 se presentan valores orientativos de los loess locales.

Tabla 1. Valores orientativos del loess local.

PARÁMETRO	ENTORNO
Humedad Natural	
Gravimétrica (w %)	≈ 20
Densidad Seca (kN/m <sup>3</sup> )	12,5 - 15,3
Límite Líquido (%)	20 - 27
Índice Plástico (%)	2 - 6
Pasante Tamiz T 200 (%)	85 - 99

#### Propiedades Hidráulicas

Para determinar las funciones hidráulicas primero se procedió a comparar las propiedades hidráulicas de otros suelos con características físicas similares.

Los datos de los suelos y las mediciones se obtuvieron del programa UNSODA, el cual constituye una base de datos

elaborada por Leij et al (1996), pertenecientes al Laboratorio de Salinidad de los EEUU y por Joseph R. Williams de la División de Restauración y de Protección Subsuperficial.

La base de datos proporciona las propiedades hidráulicas de los suelos no saturados (contenido de humedad, conductividad hidráulica y difusividad del agua en el suelo), propiedades básicas del suelo (distribución del tamaño de partículas, densidad, contenido de materia orgánica, etc.) e información adicional sobre el suelo y los procedimientos experimentales (Leij et al., 1996).

De acuerdo a los datos de suelos se realizaron las curvas de las propiedades hidráulicas medidas (ver Figura 2), en las mismas se puede observar que los valores son similares. Se pueden definir entonces envolventes que marcan el rango de variación de los valores de humedad y conductividad para este tipo de suelos y para distintas succiones.

El rango de variación de las propiedades hidráulicas de distintos tipo de suelos finos permite establecer un marco para las propiedades y para los estudios de infiltración.

La curva correspondiente a la envolvente de las conductividades hidráulicas superior corresponde a un suelo hipotético con función de conductividad hidráulica - succión por encima de las conductividades de los suelos analizados, lo mismo se realizó para la función hidráulica límite inferior de las conductividades hidráulicas y de las curvas de humedad-succión.

Estas funciones hidráulicas se determinaron utilizando el modelo de van Genuchten-Mualem.

Los parámetros del suelo hipotético correspondiente a la función hidráulica conductividad superior son humedad de saturación 0,467 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> y conductividad saturada 2,92 cm/h; para el suelo hipotético límite conductividad inferior: humedad de saturación 0,30 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> y conductividad hidráulica saturada 0,004 cm/h.

Para los suelos hipotéticos límites de la humedad se obtuvieron los siguientes parámetros: superior, humedad de saturación 0,47 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> y conductividad saturada 2,91 cm/h y; para el suelo hipotético límite humedad inferior: humedad de saturación 0,30 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> y conductividad hidráulica saturada 0,006 cm/h (Reyna, 2000).

La determinación de estos parámetros es particularmente significativa en los suelos loésicos, en los que el agua tiene un

Tabla 2. Características de los suelos (Leij et al., 1996).

SUELO	WARDEN LIMO	OHLENDORF PARABRA UNERDE LOESS	CHERNOZEM LOESS	MOLDOVA CHERNOZEM I	MOLDOVA CHERNO-ZEM II
Textura	Limo	limo	limo, loam	limo arcilloso	limo arcilloso
Ubicación	Hanford, Richlan, WA, USA	Ohlendorf, Hannover, Alemania Occidental	Ucrania región DE Odessa Rusia	Moldova, región de Dnestr, Rusia	Moldova, región de Dnestr, Rusia
Densidad g/cm <sup>3</sup>	1,54	1,37	1,4	1,14	1,35
Porosidad	No Disponible	0,45	0,457	0,551	0,469
Ks (cm/día)	77,8	35	19,5	168	91

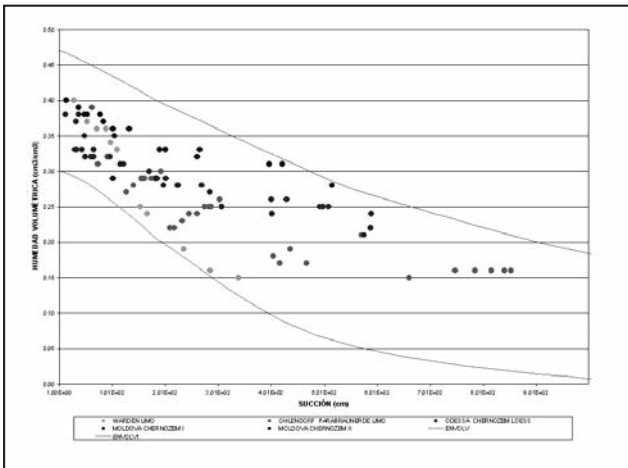


Figura 2. Curvas de humedad - succión, suelos; Warden Limo (Rockhold et al., 1987), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990), Moldova Chernozem I y II (Meschtankova, 1989).

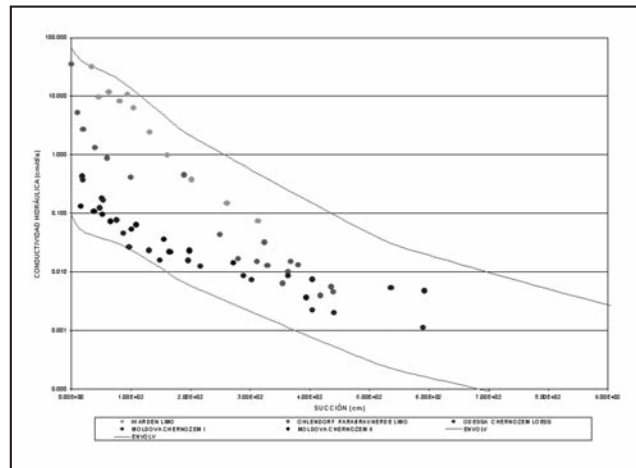


Figura 3. Curvas de Conductividad - succión, suelos; Warden Limo (Rockhold et al., 1987), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990), Moldova Chernozem I y II (Meschtankova, 1989).

rol muy importante en la formación y comportamiento posterior de los mismos (Rinaldi, 1994).

### Curvas Granulométricas

De acuerdo a lo planteado es recomendable comparar las curvas granulométricas para definir las funciones hidráulicas que mejor representen a un suelo.

En la Figura 4 se muestran las curvas granulométricas de los distintos suelos que se utilizaron, Warden Limo (Rockhold et al., 1988), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990), Moldova Chernozem I y II (Meschtankova, 1989) la curva de la muestra ensayada del loess local. La tabla 2 muestra las características de los suelos utilizados de base para la obtención de las funciones hidráulicas para el loess.

### ENSAYOS DE CAMPO

Según lo expresado por Robinson et al. (2008) quienes revisaron recientemente los métodos disponibles para medir la humedad del suelo en aplicaciones ecológicas e hidrológicas a

escala de cuenca, la medición en continuo con redes de sensores puede cubrir escalas espacio-temporales intermedias que ningún otro método puede abarcar.

Se planteó entonces, la necesidad de realizar mediciones de humedad en los suelos del sur de la Ciudad de Córdoba. Para ello se procedió a monitorear mediante sensores de humedad la respuesta de una parcela ante la ocurrencia de eventos de precipitación y de riego. Las dimensiones de la misma son de 5 m x 5 m con escasa pendiente hacia el centro donde un receptáculo conectado a un ducto enterrado conduce los excedentes hacia el exterior del predio.

La cubierta vegetal es césped gramillón, el cual es cortado semanalmente para mantener su altura entre 1,5 y 4 cm.

El tiempo total del período de monitoreo fue aproximadamente de 4 meses y se inició en el mes de diciembre, para poder considerar periodos de precipitación y secado. El intervalo de lectura en cada sensor fue seteado en 5 minutos.

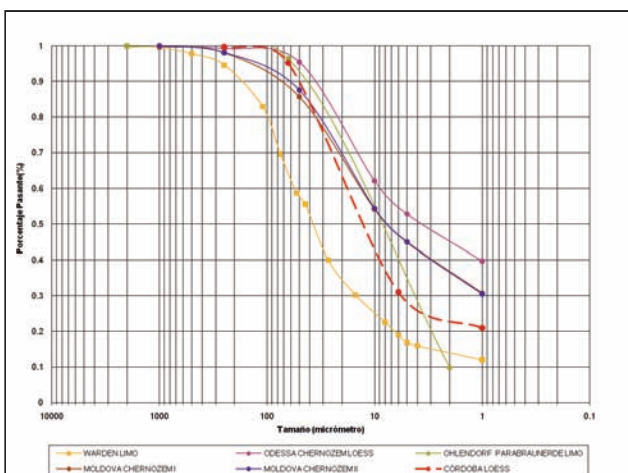


Figura 4. Curvas granulométricas Warden Limo (Rockhold et al., 1987), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990) y Córdoba Loess (Reyna, 2000),



Figura 5. Imágenes de los sensores 10-HS y 5-EC.

Los sensores utilizados son sensores de capacitancia que ofrecen una excelente alternativa al TDR (time domain reflectometer - reflectómetro de dominio del tiempo), por su bajo costo y bajo consumo energético (Bogena et al., 2007). Los sensores empleados fueron adquiridos a la empresa DECAGON y corresponden a los modelos (Figura 5):

- 10 - HS (Denominado a partir de este momento P1): Colocado a 10 cm bajo el nivel del terreno
- 5 - TE (P2): Colocado a 30 cm bajo el nivel del terreno
- 5 - EC (P3): Colocado a 80 cm bajo el nivel del terreno.

### ANÁLISIS

Los datos fueron recogidos mediante un datalogger modelo EM-50 y posteriormente procesados identificando y eliminando errores de muestreo.

Seguidamente se procedió a realizar el ajuste de las funciones de correlación entre los valores no procesados de conductividad eléctrica que arroja el sensor y la humedad del tipo de suelo de la parcela.

Para ello, sobre la serie de datos depurados, se generaron las siguientes funciones de correlación considerando la humedad de saturación registrada para este tipo de suelos y la humedad residual obtenida en ensayos sobre muestras análogas.

Luego se procedió a graficar las curvas de humedecimiento - secado en función del tiempo para los distintos sensores.

Para verificar las funciones hidráulicas determinadas anteriormente se procedió a modelar un evento empleando el mo-



Figura 6. Imagen Pluviógrafo ECHO Rain

delo NET-RAIN 3.0 (Reyna, T. 2008). A partir del 1° de marzo se colocó un pluviógrafo de una sola cuchara autodescargable marca Decagon Modelo ECHO - RAIN de exactitud +/- 2% (Figura 6).

El evento modelado corresponde a la precipitación de 1 mm ocurrida el 17 de marzo del 2010. En la modelación se consideró una humedad superficial inicial de 0,21. Este programa permite resolver la ecuación de Richards en diferencias finitas considerando las propiedades hidráulicas de los suelos

de la base de datos de UNSODA u otras funciones hidráulicas del suelo definidas por el usuario.

Al ser los datos de UNSODA (Leij et al., 1996) una base de datos discreta, obtenida de las mediciones realizadas en distintas partes del mundo, NETRAIN interpola entre los datos originales para obtener una curva continua de conductividad - succión y humedad-succión.

La salida de NETRAIN permite obtener el perfil de humedad para cada tiempo y la precipitación efectiva al descontar el agua que se infiltra en el suelo durante el proceso lo que caracteriza no sólo el escurrimiento superficial, sino también los estados de humedad del suelo en la zona vadosa durante y luego de estos eventos.

Este conocimiento permite determinar la capacidad disponible de humedad en el suelo para actividades agronómicas y es una herramienta importante en el estudio del transporte de contaminantes.

Las curvas de humedecimiento - secado en función del tiempo para los distintos sensores se presentan en la Figura 7.

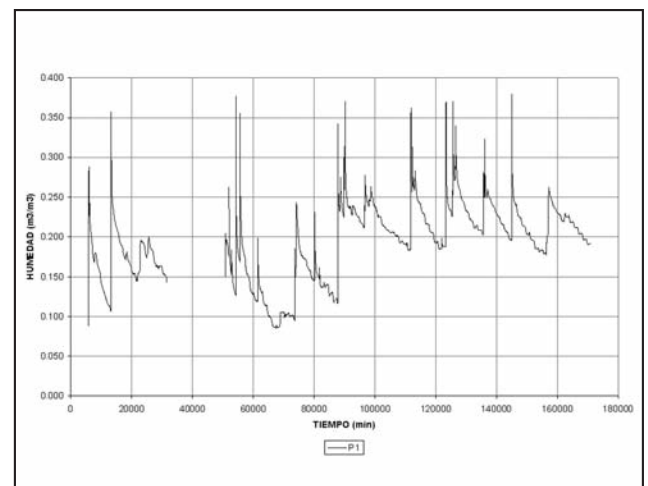


Figura 7. Curva de Humedecimiento - Secado - Sensor P1: h=10 cm

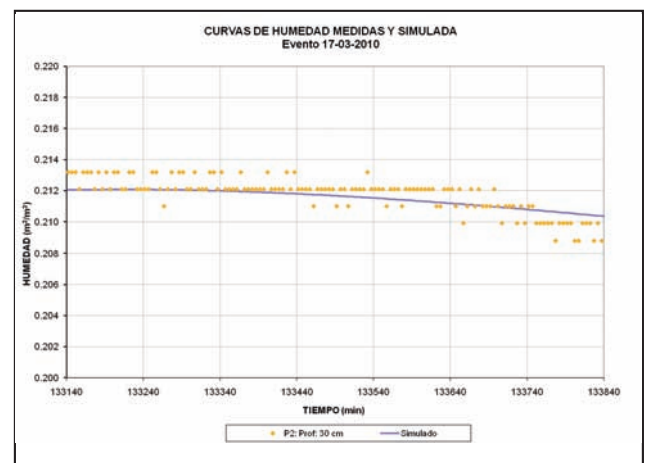


Figura 8. Curvas de humedad medidas y modelada.

Los resultados del perfil de humedad obtenido a 30 cm de profundidad modelados para el evento descripto junto con los datos medidos se presentan en la Figura 8.

Estos resultados muestran que las funciones hidráulicas determinadas precedentemente representan adecuadamente el comportamiento de humedecimiento y secado.

## CONCLUSIONES

De lo observado en las granulometrías, en las curvas de humedad-succión y en los parámetros físicos de los suelos analizados, se puede inferir, comparando con los datos del loess pampeano, que las propiedades hidráulicas del loess pampeano son semejantes a las del loess ruso Ohlendorf Parabraunerde.

Además el valor de conductividad saturada para el loess local es similar al del loess ruso.

Con respecto a la curva de humedad en función de la succión obtenida del ajuste de los datos de Redolfi (1993) se obtiene un valor de humedad saturada para el loess de 36,0%.

Este valor es compatible con los datos obtenidos de los ensayos existentes en loess y similares a los presentados por Zeballos y Terzariol (2002) para suelos loésicos en estado natural. Mustafaev y Khodzhabekov (1972), dieron valores de humedad saturada en suelos de Tadjikistan de 40%. (Reyna, T., 2008).

Los resultados presentados en este artículo muestran que las funciones hidráulicas determinadas teóricamente representan adecuadamente el comportamiento de humedecimiento y secado en la parcela experimental estudiada.

Los resultados de la simulación justifican utilizar metodologías que permitan incorporar las propiedades hidráulicas de los suelos en las simulaciones hidrológicas para representar la respuesta del suelo frente a los eventos de precipitación y secado.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BOGENA, H.R.; HUISMAN, J.A.; OBERDÖRSTER C. Y VEREECKEN, H. 2007  
Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications.  
*Journal Hyd.* 344, 32-42.
- BREDDIN, H. 1963  
Die Grundrißkarten des Hydrogeologischen Kartenwekes der Wasserwirtschaftsverwaltung von Nordrhein-Westfalen. Geologische Mitteilungen.  
*Aachen, Germany, Geologische Mitteilungen, v.2. p.393-416.*
- LEIJ, F. J.; ALVES, W. J.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Y WILLIAMS, J. R. 1996  
The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database - User's Manual version 1.0. National Risk Management Research Laboratory.  
*Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. U.S.A.*
- MESCHTANKOVA, L. 1989  
Ph.D. Thesis, Moscow State Univ.  
*Citado por The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database (Leij, F. J.; Alves, W. J.; Van Genuchten, M. Th. Y Williams, J. R.).*
- MUSTAFAEV, A.A. Y KHODZHABEKOV, V. S. 1972  
Approximate method of solving unsteady problems relating to wetting of layers of collapsible soils.  
*Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol 9, Number 3, p 145-150. U.S.A.*
- PLAGGE R., RENGER M., AND ROTH C., 1990  
A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures.  
*J. Plant Nutr. Soil Sci., 153, 39-45.*
- REDOLFI, E. 1993  
Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsables.  
*Tesis doctoral presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid de la Universidad Politécnica de Madrid, España.*
- REYNA, T. 2000  
Funciones Hidráulicas en Suelos No Saturados - Aplicación al Loess Pampeano.  
*Tesis de Maestría presentada en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. U.N.C. Córdoba. Argentina.*
- REYNA, T. 2008  
Acoplamiento de los proceso de Precipitación y escorrentía.  
*Tesis doctoral presentada en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. U.N.C. Córdoba. Argentina.*
- RINALDI, V. 1994  
Propiedades Dieléctricas del Loess del Centro de Argentina.  
*Tesis doctoral presentada en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.*

- ROBINSON, D.A.; CAMPBELL, C.; HOPMANS, J.W.; HORNBLUKLE, B.; JONES, S.B.; KNIGHT, R.; OGDEN, E.; SELKER, J. Y WENDROTH, O. 2008  
A review vision for soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observations.  
*Vadose Zone Journal*, Vol 7; 358–389.
- ROCCA R.J.; REDOLFI E.R.; TERZARIOL R.E. 2006  
Características Geotécnicas de los Loess de Argentina.  
*Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2) 149.
- ROCKHOLD M. L.; FAYER M. J. GEE C. W. 1988  
Characterization of Unsaturated Hydraulic Conductivity at the Hanford Site.  
*Publication, PNL-6488, Pac. NW Lab, Richland, WA. U.S.A.*
- SHEIN, 1990.  
Thesis, Moscow State Univ. U.R.S.S.  
*Citado por The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database (Leij, F. J.; Alves, W. J.; Van Genuchten, M. Th. Y Williams, J. R.)*.
- WEBER, J. F., URBANO, J. M., STUYCK, E. E., AZELART, D., MARTÍNEZ, N. B. 2005.  
Caracterización de los parámetros del Modelo de Infiltración de Horton en suelos de la Ciudad de Córdoba.  
*Cuadernos del Curiham*. Vol. 11 1er semestre. pag 29-38. Argentina.
- ZEBALLOS, M. Y TERZARIOL, R. 2002.  
Modelaciones de flujo unidimensional en suelos loésicos.  
*XVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sesión Técnica II, TPN°02. Trelew, Argentina.*

