

ECUACIONES ENTRE VARIABLES QUÍMICAS DEL SUELO Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A SATURACIÓN

EQUATIONS BETWEEN CHEMICAL SOIL VARIABLES AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY AT SATURATION

Finlandia Barbosa-Moreno¹; Ignacio Sánchez Cohen²; Gabriel Díaz Padilla³; Rafael Alberto Guajardo Panes³; Rafael Rodríguez Hernández¹

¹CEValles Centrales, Oaxaca, INIFAP. Correo-e: barbosa.finlandia@inifap.gob.mx

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA-INIFAP). km 6.5 Canal Sacramento, Las Huertas. Gómez Palacio, Durango, MÉXICO. C. P. 35140.

³CE Cotaxtla, Veracruz, INIFAP

RESUMEN

La conductividad hidráulica es una propiedad que se refiere al grado en que se mueve el agua en el suelo, su medición y estimación es un tema constante en la investigación. En los procedimientos para medirla se encuentran los modelos teóricos, donde por medio de relaciones matemáticas entre variables, se describe el comportamiento del parámetro en interés. El estudio se llevó a cabo en dos lugares representativos de los Valles Centrales de Oaxaca, el cual consistió en el análisis de las principales propiedades de fertilidad y salinidad del suelo, con el fin de conocer su relación respecto a la conductividad hidráulica saturada. Se tomaron 63 muestras compuestas de suelo y a la profundidad de 30 cm, en parcelas agrícolas; se analizaron en laboratorio y se determinaron 17 parámetros; los que se sometieron a un análisis de correlación múltiple, para ver su influencia con la conductividad. Los resultados de la correlación indicaron que el calcio, el magnesio y la CIC son los que determinan el 50 % del comportamiento de la conductividad. Con estas variables se hizo una regresión lineal múltiple para definir la ecuación polinomial de segundo grado, con la que se puede estimar la conductividad hidráulica saturada.

PALABRAS CLAVE: Regresión múltiple, calcio, magnesio, CIC, materia orgánica.

ABSTRACT

Hydraulic conductivity is a property that refers to the degree to which water moves in the soil; its measurement and estimation is a constant research topic. In the procedures for measuring it, there are theoretical models which describe the behavior of the parameter of interest through mathematical relationships between variables. This study was conducted in two sites representative of the Central Valleys of Oaxaca; it consisted of analyzing the main soil fertility and salinity properties, in order to determine their relationship to saturated hydraulic conductivity. A total of 63 composite soil samples were taken at a depth of 30 cm, in agricultural plots; they were analyzed at a laboratory and 17 parameters were identified. They were subjected to multiple correlation analysis to see their influence on conductivity. The correlation results showed that calcium, magnesium and CEC determine 50 % of the conductivity behavior. Using these variables, a multiple linear regression was performed to define the second-order polynomial equation with which the saturated hydraulic conductivity can be estimated.

KEYWORDS: Multiple regression, calcium, magnesium, CEC, organic matter.



Recibido: 18 de junio, 2012
Aceptado: 29 de mayo, 2013
doi: 10.5154/r.rchsza.2012.06.011
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

La conductividad hidráulica (CH) mide el tránsito o movimiento del agua en el suelo, es un parámetro que se utiliza para estudios de riego, drenaje, recuperación de suelos y en la modelación de flujo de agua a nivel subsuperficial (Alexander *et al.*, 2011). Los métodos de campo y de laboratorio que se utilizan para medirla, son tardados y de alguna manera de alto costo (Valiantzas, 2011).

El desarrollo de modelos predictivos permite la comparación entre variables a futuro con un ahorro de tiempo y costo acerca de los parámetros de estudio, lo cual mejora el proceso de investigación (Leimer *et al.*, 2011). En el caso del suelo se han estudiado muchas relaciones que suceden entre parámetros físicos y químicos con el objetivo de saber y estimar el comportamiento de uno respecto del otro, cuando alguno de ellos no se pueda medir de forma experimental (Rangel *et al.*, 2009).

La CH saturada es un buen indicador de la CH tomada bajo condiciones de campo (Mora, 2010), por lo tanto, la estimación de la primera en un modelo de predicción, ofrece un buen resultado con un ahorro en tiempo y costo.

Se han hecho varios estudios acerca de la predicción de la CH, todos ellos utilizan una serie de modelos y ecuaciones teóricas que estiman el movimiento del agua en el suelo (Fuentes *et al.*, 2003). Las ecuaciones más frecuentes son las de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980), Kostiakov-Lewis y las funciones de pedotransferencia de Saxton and Rawls.

En el estado de Oaxaca se han hecho pocos estudios acerca de la conductividad hidráulica de los suelos, de los cuales la mayoría se orientan al análisis de este parámetro para la caracterización de acuíferos (Belmonte *et al.*, 2005). La zona de riego en el estado se ubica de manera principal en la región de los Valles Centrales, donde se carece de información hidrológica útil para el establecimiento de sistemas de riego, sobre todo para el área aledaña al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Oaxaca (AICO). En esta zona se localiza una planta de tratamiento de aguas, que sirve como la principal fuente de abastecimiento de agua para riego agrícola.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar los principales parámetros de fertilidad y salinidad de suelos en dos municipios ubicados en el área aledaña al AICO, para determinar el mejor modelo de predicción de conductividad hidráulica saturada, parámetro que es importante en el establecimiento de un sistema de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en una microcuenca perteneciente a los municipios de San Juan Bautista la Raya y Ánimas Trujano, en la parte central del estado, en las coor-

INTRODUCTION

Hydraulic conductivity (HC) measures the movement of water in the soil; it is a parameter that is used for irrigation, drainage, and soil recovery studies, and in groundwater flow modeling (Alexander *et al.* 2011). Field and laboratory methods used to measure it are time-consuming and somewhat costly (Valiantzas, 2011).

The development of predictive models allows comparing variables related to the study parameters, with time and cost savings, thus improving the research process (Leimer *et al.*, 2011). In the case of soil, many relationships that occur between physical and chemical parameters have been studied in order to determine and estimate their behavior relative to one another, when one of them cannot be experimentally measured (Rangel *et al.*, 2009).

Saturated HC is a good indicator of HC taken under field conditions (Mora, 2010); therefore, estimating the former in a predictive model provides a good result with time and cost savings.

Several studies on HC prediction have been performed; all of them used a number of theoretical models and equations that estimate water movement in the soil (Fuentes *et al.*, 2003). The most common equations are those of Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) and Kostiakov-Lewis, and the pedotransfer functions of Saxton and Rawls.

In the state of Oaxaca, only a few studies have been conducted on the hydraulic conductivity of the soil, and most of them were oriented to the analysis of this parameter for aquifer characterization (Belmonte *et al.*, 2005). The irrigated area in the state is mainly located in the Central Valleys region, where there is a lack of useful hydrological data for establishing irrigation systems, especially for the area adjacent to the Oaxaca City International Airport (AICO). A water treatment plant is located within this area, serving as the main water source for agricultural irrigation.

The aim of this study was to evaluate the main soil fertility and salinity parameters in two municipalities located in the area adjacent to the airport, in order to determine the best model to predict saturated hydraulic conductivity, a parameter that is important in establishing an irrigation system.

MATERIALS AND METHODS

Study area

This study was conducted in a watershed located within the municipalities of San Juan Bautista la Raya and Ánimas Trujano, in the central part of the state, at coordinates 96° 43' west longitude, 16° 59' north latitude and at an elevation of 1,520 m; San Juan is located at coordinates 96° 43' 26'' west longitude, 16° 59' 21'' north latitude and at an elevation of 1,510 m.

denadas 96° 43' de longitud oeste, 16° 59' de latitud norte y a una altura de 1,520 m; y San Juan se localiza en las coordenadas 96° 43' 26'' de longitud oeste, 16° 59' 21'' de latitud norte y a una altura de 1,510 m.

Clima e hidrología

La zona de estudio tiene un clima semiseco semicálido BS₁hw (w), cuyas temperaturas medias anuales van de 18° a 22 °C, la precipitación total anual es baja, en un rango de 600 a 800 mm, mientras que la evaporación total anual es de 1,737.1 mm. El principal río que se ubica en la zona es el Atoyac (INEGI, 2010).

Fisiografía

Las altitudes varían, en la parte alta al norte desde 1,510 a 1,518 m y las partes bajas ubicadas de centro a sur, las alturas son de 1,499 a 508 m; el promedio de las pendientes es del 18 % y no hay elevaciones importantes, toda el área forma parte de un valle.

Suelo

En concordancia con las cartas de INEGI en escala 1:250,000 los suelos predominantes de la zona son: acrisol, feozem, luvisol, litosol, regosol, rendzina y vertisol, a nivel micro-cuenca destacan los vertisoles y regosoles. El uso de suelo predominante es la agricultura de temporal y de riego.

Geología

El área de estudio se encuentra dentro de la formación Cenozoico específicamente en los depósitos sedimentarios continentales del cuaternario, dentro de la unidad aluvión típico de los cauces y complejos deltaicos; es decir el tipo de geología predominante proviene de los depósitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundación de los valles fluviales (INEGI, 2009).

Toma de muestras

El proceso de muestreo fue aleatorio y se definió con ayuda de un mapa de la región de estudio; las áreas para la toma de muestras se delimitaron de forma digital con ayuda de los SIG (Sistemas de Información Geográficos) y por clase de suelo. Las muestras de suelo se tomaron en parcelas agrícolas y con ayuda de productores, la profundidad de muestreo fue de 30 cm, que es el volumen de suelo laborable. En cada parcela se tomó una muestra compuesta, la cual se formó de varias submuestras, porque las parcelas son de superficie variable (Contreras-Barbosa, 2009), en total se tomaron 63 muestras compuestas a nivel local.

Caracterización del suelo

Para la descripción de los suelos, las variables que se determinaron en laboratorio fueron: pH, conductividad eléctrica

Climate and hydrology

The study area has a semi-dry semi-warm BS₁hw (n w) climate, in which mean annual temperatures range from 18° to 22° C, total annual rainfall is low, in the range of 600-800 mm, and total annual evaporation is 1,737.1 mm. The main river in the area is the Atoyac (INEGI, 2010).

Physiography

Elevations range from 1,510 to 1,518 m in the highest areas in the north, while they range from 508 to 1,499 m in the lowest areas in the central and southern regions; the average slope is 18 % and there are no significant elevations. The entire area is part of a valley.

Soil

In accordance with INEGI 1:250,000 scale maps, the predominant soils in the area are: acrisol, feozem, luvisol, litosol, regosol, rendzina and vertisol; at the micro-watershed level, the main soils are vertisols and regosols. The predominant land use is rainfed and irrigation agriculture.

Geology

The study area is located within the Cenozoic formation, specifically in the continental sedimentary deposits from the Quaternary period, within the alluvium unit typical of channels and deltaic complexes; that is, the predominant geology type comes from the sedimentary deposits formed by streams in the channel and the floodplain of the fluvial valleys (INEGI, 2009).

Sampling

The sampling process was random and it was defined using a map of the study area; the sampling areas were digitally defined using GIS (Geographical Information Systems) and by soil type. The soil samples were taken in agricultural plots and with the producer's assistance using a 30 cm sampling depth, which is the arable soil layer. In each plot, a composite sample, which was formed from several subsamples because the plots are of variable surface, was taken (Contreras-Barbosa, 2009); in total, 63 composite samples were taken locally.

Soil characterization

For soils description, the variables determined in the laboratory were: pH, electrical conductivity, organic matter, phosphorus, nitrates, sodium, potassium, calcium, magnesium, cation exchange capacity, carbonates, bicarbonates, field capacity, permanent wilting percentage, porosity, hydraulic conductivity, bulk density and texture, using the different methods approved by the NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

ca, materia orgánica, fósforo, nitratos, sodio, potasio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, carbonatos, bicarbonatos, capacidad de campo, porcentaje de marchitez permanente, porosidad, conductividad hidráulica, densidad aparente y textura, con los diferentes métodos aprobados por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Análisis estadístico

Con el paquete de software Statistical Analysis Software 9.2 (SAS), se hizo un análisis de correlación múltiple en donde entraron todas las variables que influyen en mayor o menor grado en el comportamiento de la conductividad hidráulica, ésta correlación está definida por:

$$P_{xy} = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}}$$

Ecuación 1 (Hernández, 2006).

En total se analizaron 11 variables: pH, materia orgánica, nitratos, fósforo, potasio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, bicarbonatos y sodio.

En seguida se definió la correlación entre variables respecto de la conductividad hidráulica, la cual consistió en hacer la prueba de hipótesis (Quintana, 1996), para cada par de variables, el P-value,

Donde:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_a: \rho \neq 0$$

Se rechaza H_0 si el $P\text{-value} < \alpha$, si $\alpha = 0.05$.

Regresión lineal múltiple

Con base en el análisis anterior se descartaron aquellas variables en las que no existió correlación positiva o estadísticamente significativa, con un nivel de confianza del 95 %; y a las que resultaron positivas se les hizo un análisis de regresión lineal múltiple en SAS 9.2, con el modelo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

Ecuación 2 (Salinas-Silva, 2007).

Donde:

y = variable dependiente, $x_1, x_2, y x_3$ = variables independientes.

Ecuación de regresión

La ecuación se obtiene a partir del conocimiento específico del total de variables independientes y el comportamiento

Statistical analysis

Using the Statistical Analysis Software 9.2 (SAS), a multiple correlation analysis, including all of the variables influencing to a greater or lesser extent hydraulic conductivity behavior, was conducted. This correlation is defined by:

$$P_{xy} = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}}$$

Equation 1 (Hernández, 2006).

In total, 11 variables were analyzed: pH, organic matter, nitrates, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, cation exchange capacity, electrical conductivity, bicarbonates and sodium.

We then defined the correlation between variables for hydraulic conductivity, which consisted of hypothesis testing (Quintana, 1996) and determining the $P\text{-value}$, for each pair of variables,

Where:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_a: \rho \neq 0$$

H_0 is rejected if the $P\text{-value} < \alpha$, if $\alpha = 0.05$.

Multiple Linear Regression

Based on the above analysis we discarded those variables in which there was no positive or statistically significant correlation, with a 95 % confidence level, while for those testing positive, multiple linear regression analysis was performed in SAS 9.2, with the model:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

Equation 2 (Salinas-Silva, 2007).

Where:

y = dependent variable, = independent variables.

Regression equation

The equation is derived from the specific knowledge of all independent variables and their behavior with regard to the dependent variable; according to this, we identified the best equation type for facilitating the calculation of the dependent variable. The analysis for this study was performed in SAS 9.2, in which we used a second-order polynomial equation with one independent variable in the basic form.

(Alvarado-Obagi, 2008)

de éstas respecto a la variable dependiente, de acuerdo a esto se ubica el mejor tipo de ecuación que nos facilitará el cálculo de la dependiente. En SAS 9.2 se hizo un análisis para el presente estudio en el que se utilizó una ecuación polinomial de segundo grado con una variable independiente de la forma básica.

(Alvarado-Obagi, 2008)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Suelos

Los suelos del área en cuanto a propiedades químicas, son neutros a medianamente alcalinos, sin llegar a ser salinos, de CIC media a baja (18.89 a 12.87 meq 100·gr⁻¹) y con muy bajo contenido de materia orgánica (0.046 %). Destacan las altas concentraciones de sodio (1.771 meq 100·gr⁻¹), que se ubican en el nivel de “muy alto”, calcio y magnesio, estos últimos con niveles altos a medios (19.715 a 2.75 meq 100·gr⁻¹). La concentración de nitratos es variable, va desde alta a media y en algunos lugares, baja, lo mismo ocurre con la de fósforo; y en el caso del potasio los niveles son bajos, en la mayor parte del área.

Son suelos de textura arenosa (1.56 gr·cm⁻³) con 3.28 cm·hr⁻¹ de conductividad hidráulica, 0.41 cm⁻³ vacíos cm⁻³ suelo de porosidad y 0.11 cm⁻³ agua cm⁻³ suelo de humedad aprovechable, en promedio.

Análisis correlación múltiple

La correlación resultó positiva en 10 pares de variables, para Y₁-Y₁₁, para todos los parámetros de salinidad y fertilidad que entraron al análisis, como lo indica el Cuadro 1.

CUADRO 1. Correlación de variables respecto a la conductividad hidráulica saturada.

TABLE 1. Correlation of variables with respect to saturated hydraulic conductivity.

Número / Number	Variables
1	(y ₁ y y ₇), (y ₁ y y ₈), (y ₁ y y ₉)
2	(y ₂ y y ₅), (y ₂ y y ₇), (y ₂ y y ₉), (y ₂ y y ₁₁)
3	(y ₃ y y ₇), (y ₃ y y ₈), (y ₃ y y ₁₁), (y ₃ y y ₁₂)
4	(y ₄ y y ₁₀), (y ₄ y y ₁₁)
5	(y ₅ y y ₁₀), (y ₅ y y ₁₁)
6	(y ₆ y y ₁₁)
7	(y ₇ y y ₈), (y ₇ y y ₉), (y ₇ y y ₁₁)
8	(y ₈ y y ₉)
9	(y ₁₀ y y ₁₁)
10	(y ₁₁ y y ₁₂)

Donde: y₁= conductividad hidráulica (cm·hr⁻¹); y₂= pH; y₃= materia orgánica (MO) (%); y₄= nitratos (mg·kg⁻¹); y₅= fósforo (mg·kg⁻¹); y₆= potasio (mg·kg⁻¹); y₇= calcio (mg·kg⁻¹); y₈= magnesio (mg·kg⁻¹); y₉= capacidad de intercambio catiónico (CIC) (meq 100·gr⁻¹); y₁₀= conductividad eléctrica (dS·m⁻¹); y₁₁= bicarbonatos (meq·l⁻¹) y y₁₂= sodio (meq 100·gr⁻¹).

Where: y₁= hydraulic conductivity (cm·hr⁻¹); y₂= pH; y₃= organic matter (OM) (%); y₄= nitrates (mg·kg⁻¹); y₅= phosphorous (mg·kg⁻¹); y₆= potassium (mg·kg⁻¹); y₇= calcium (mg·kg⁻¹); y₈= magnesium (mg·kg⁻¹); y₉= cation exchange capacity (CEC) (meq 100·gr⁻¹); y₁₀= electrical conductivity (dS·m⁻¹); y₁₁= bicarbonates (meq·l⁻¹), and y₁₂= sodium (meq 100·gr⁻¹).

RESULTS AND DISCUSSION

Soils

Area soils are, in terms of chemical properties, neutral to moderately alkaline without being salty, of medium to low CEC (18.89 to 12.87 meq 100·gr⁻¹) and with very low organic matter content (0.046 %). High concentrations of sodium (1.771 meq 100·gr⁻¹), which are located at the level of “very high,” calcium and magnesium stand out; the latter two have high to medium levels, respectively (19.715 to 2.75 meq 100·gr⁻¹). The nitrate concentration is variable, ranging from high to medium and in some places low, as is also the case with phosphorous; as for potassium, levels are low in most of the area.

They are sandy soils (1.56 gr·cm⁻³) with 3.28 cm·hr⁻¹ hydraulic conductivity, 0.41 cm⁻³ empty cm⁻³ soil porosity and 0.11 cm⁻³ water cm⁻³ available soil moisture on average.

Multiple correlation analysis

The correlation was positive in 10 pairs of variables (for Y₁-Y₁₁) for all salinity and fertility parameters that entered the analysis, as shown in Table 1.

However, for hydraulic conductivity only calcium, magnesium and CEC have a statistically significant correlation at P ≤ 0.05.

Multiple Linear Regression

Multiple linear regression analysis was also performed on the positive correlations in order to visualize the best-fitting

Sin embargo, para conductividad hidráulica sólo el calcio, el magnesio y la CIC representan una correlación estadística significativa con un $P \leq 0.05$.

Regresión lineal múltiple

A las correlaciones positivas se les hizo también un análisis de regresión múltiple para visualizar los mejores modelos de ajuste, para cada variable y ver si podían entrar a la determinación del modelo o ecuación de predicción para conductividad hidráulica, como se muestra en el Cuadro 2.

En el Cuadro 2 se observa que los tres mejores modelos de ajuste son: el de materia orgánica en función de calcio y sodio, el de magnesio en función de la CIC y el de calcio en función del magnesio y la CIC. Los modelos son aceptables por el criterio de parsimonia (Camacho-Cantor, 2006), pero en términos prácticos no son viables y tampoco pueden entrar en la ecuación de predicción buscada.

CUADRO 2. Modelos de ajuste por parámetro.
TABLE 2. Adjustment models per parameter.

Parámetro / Parameter:	Modelo / Model	R ²	Variables
pH	$y = \beta_0 + \beta_2 x_2 + \beta_4 x_4$	0.1997	$x_2 = \text{calcio}; x_4 = \text{bicarbonatos}$ $x_2 = \text{calcium}; x_4 = \text{bicarbonates}$
MO / OM	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_4 x_4$	0.6959	$x_1 = \text{calcio}; x_4 = \text{sodio}$ $x_1 = \text{calcium}; x_4 = \text{sodium}$
Nitratos / Nitrates	$y = \beta_0 + \beta_2 x_2$	0.3016	$x_2 = \text{bicarbonato}$ $x_2 = \text{bicarbonates}$
Fósforo / Phosphorus	$y = \beta_0 + \beta_2 x_2$	0.3016	$x_2 = \text{bicarbonatos}$ $x_2 = \text{bicarbonates}$
Potasio / Potassium	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1$	0.170	$x_1 = \text{bicarbonatos}$ $x_1 = \text{bicarbonates}$
Magnesio / Magnesium	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1$	0.7879	$x_1 = \text{CIC}$ $x_1 = \text{CEC}$
Bicarbonatos / Bicarbonates	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1$	0.1915	$x_1 = \text{sodio}$ $x_1 = \text{sodium}$
Conductividad E. / E. Conductivity	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1$	0.3016	$x_1 = \text{bicarbonatos}$ $x_1 = \text{bicarbonates}$
Calcio / Calcium	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$	0.9573	$x_1 = \text{magnesio}; x_2 = \text{CIC}$ $x_1 = \text{magnesium}; x_2 = \text{CEC}$

models for each variable and to see if they could be included in the determination of the model or prediction equation for hydraulic conductivity, as shown in Table 2.

Table 2 shows that the three best-fitting models are: organic matter as a function of calcium and sodium, magnesium as a function of CEC, and calcium as a function of magnesium and CEC. The models are acceptable by parsimony criterion (Camacho-Cantor, 2006), but in practical terms they are not viable and nor can they be included in the prediction equation sought.

For hydraulic conductivity, we tested the different models based on the primary equation (number 2) to see which one of them was the best fit (Table 3).

Where:

$x_1 = \text{calcium (mg}\cdot\text{kg}^{-1})$; $x_2 = \text{magnesium (mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ and $x_3 = \text{CEC (meq } 100\cdot\text{gr}^{-1})$.

Para conductividad hidráulica se probaron los diferentes modelos con base en la principal (Ecuación 2) para ver cuál era la que mejor se ajustaba (Cuadro 3).

Donde:

x_1 =calcio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); x_2 = magnesio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y x_3 = CIC ($\text{meq } 100\cdot\text{gr}^{-1}$).

El modelo que mejor se ajusta por parsimonia y bajo un análisis de multicolinealidad es el dos, porque existe una fuerte correlación estadística entre las tres variables analizadas respecto a conductividad hidráulica, pero la mayor inflación de la varianza se obtuvo para la variable X_3 que es la CIC.

Ecuación

En un segundo análisis para determinar la ecuación de regresión, el R^2 fue de 0.5112, en éste se determinó que la ecuación de regresión polinomial de segundo grado es:

$$Y = 11.61531 + 0.00199x_1 + 0.01212x_2 - 0.99846x_3 - 0.00001250x_1^2 + 0.00002835x_2^2 - 0.21986x_3^2 - 0.00001325x_1x_2 + 0.00364x_1x_3 - 0.00069419x_2x_3$$

CUADRO 3. Modelos de ajuste con mayor coeficiente de determinación.

TABLE 3. Adjustment models with higher coefficient of determination.

Número Number	Modelo / Model	R^2
1	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$	0.4502
2	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$	0.4389
3	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_3 x_3$	0.4430
4	$y = \beta_0 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$	0.4497
5	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1$	0.4313
6	$y = \beta_0 + \beta_2 x_2$	0.1816
7	$y = \beta_0 + \beta_3 x_3$	0.3804

Donde:

x_1 = calcio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); x_2 = magnesio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y x_3 = CIC ($\text{meq } 100\cdot\text{gr}^{-1}$).

La resolución de esta ecuación permite tener datos más precisos de la conductividad hidráulica en el área de estudio, para la instalación y establecimiento de los futuros sistemas de riego, en beneficio de la producción agrícola local y regional.

The best-fitting model for parsimony and under multicollinearity analysis is the second one, because there is a strong statistical correlation among the three variables analyzed with respect to hydraulic conductivity, but the highest variance inflation was obtained for the variable X_3 , which is CEC.

Equation

In a second analysis to determine the regression equation, R^2 was 0.5112; in this analysis, it was found that the second-order polynomial regression equation is:

$$Y = 11.61531 + 0.00199x_1 + 0.01212x_2 - 0.99846x_3 - 0.00001250x_1^2 + 0.00002835x_2^2 - 0.21986x_3^2 - 0.00001325x_1x_2 + 0.00364x_1x_3 - 0.00069419x_2x_3$$

Where:

x_1 = calcium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); x_2 = magnesium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and x_3 = CEC ($\text{meq } 100\cdot\text{gr}^{-1}$).

The solving of this equation enables having more precise data on hydraulic conductivity in the study area for the installation of future irrigation systems, for the benefit of local and regional agricultural production.

CONCLUSIONS

In the analysis of all soil salinity and fertility variables, the most related were organic matter, CEC, calcium, magnesium and sodium; however, only calcium, magnesium and CEC significantly influenced hydraulic conductivity behavior.

The behavior pattern of saturated hydraulic conductivity in alkaline soils with low organic content, without the presence of salinity and at arable depth, is 50 % governed by cation exchange capacity, and calcium and magnesium concentrations.

In the positive correlations good-fitting models were not always obtained; the most influential variables the best-fitting models were calcium, CEC, and magnesium, while the least related were bicarbonates and sodium.

The model can be used as a tool to estimate hydraulic conductivity and as part of the operating criteria of an irrigation system or for determining the mobility of toxic elements in the soil, due to water contamination, which is a severe problem in the area.

End of english version

CONCLUSIONES

En el análisis de todas las variables de salinidad y fertilidad del suelo, las que más relacionaron fueron materia orgánica, CIC, calcio, magnesio y sodio, sin embargo, sólo el calcio, el magnesio y la CIC influyeron de manera importante en el comportamiento de la conductividad hidráulica.

El patrón de comportamiento de la conductividad hidráulica saturada en suelos alcalinos, con bajos contenidos en materia orgánica, sin presencia de salinidad y a la profundidad arable, se rige en un 50 % por la capacidad de intercambio catiónico y las concentraciones de calcio y magnesio.

En las correlaciones positivas no siempre se obtuvieron buenos modelos de ajuste, las variables que más influyeron en los modelos que mejor se ajustaron fueron calcio, CIC, y magnesio; y las de menor relación fueron bicarbonatos y sodio.

El modelo puede utilizarse como una herramienta para estimar la conductividad hidráulica y como parte de los criterios operativos de un sistema de riego o para determinar la movilidad de los elementos tóxicos en el suelo, por efecto de la contaminación del agua, el cual es un problema grave en la zona.

LITERATURA CITADA

- ALEXANDER, M.; BERG, S. J.; ILLMAN, W. A. 2011. Field Study of Hydrogeologic Characterization Methods in a Heterogeneous Aquifer. *GroundWater*, 49 (3): 365-382 p.
- ALVARADO V. J. A.; OBAGI A., J. J. 2008. Fundamentos de inferencia estadística. Editorial Pontificia Universidad JAVERIANA. 360 p.
- BELMONTE J. S. I.; CAMPOS E., J. O.; ALATORRE Z., M. A. 2005. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, México. *Geofísica Internacional*, 44(3): 283-300p.
- CAMACHO A., L.; CANTOR M., M. 2006. Calibración y análisis de la capacidad predictiva de modelos de transporte de solutos en un río de montaña colombiano. *Avances en recursos hidráulicos*, 14: 39-52 p.
- CONTRERAS H. J. R.; BARBOSA M., F. 2009. Toma de muestras de suelo para una análisis de fertilidad. Desplegable para productores. Campo experimental Valles Centrales de Oaxaca. CIRPAS, INIFAP. 2 p.
- FUENTES C.; ANTONINO C. D., A.; SEPÚLVEDA J.; ZATARAIN F.; DE LEÓN, B. 2003. Predicción de la conductividad hidráulica relativa de los suelos con modelos fractales. *Ingeniería Hidráulica en México*. 18(4): 31-40p.
- HERNÁNDEZ A., E. 2006. Manual de estadística. Editorial Universidad Cooperativa de Colombia. 389 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI). 2009. Anuario estadístico, Oaxaca. 26 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI). 2010. Anuario estadístico, Oaxaca. 26 p.
- LEIMER, S.; THORSTEN P.; STEPHAN P.; WOLFGANG W. 2011. Towards a new generation of high-resolution meteorological input data for small-scale hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 402 (3-4): 317-332 p.
- MORA, R. 2010. Predicción de las funciones de contenido volumétrico de humedad y conductividad hidráulica para algunos suelos de grano fino de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 42: 77-84p.
- QUINTANA R., C. 1996. Elementos de inferencia estadística. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 219 p.
- RANGEL, M. de O. L.; García, P. A.; Hernández, G. A. 2009. Estudio comparativo de modelos de predicción obtenidos para propiedades de calidad en suelo, frutas y vegetales utilizando las técnicas de análisis multivariantes PLS y PCR. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(1): 50-54p.
- SALINAS M.; SILVA C. 2007. Modelos de Regresión y Correlación II. *Regresión Lineal Múltiple. Ciencia & Trabajo*, 9 (23): 39-41 p.
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). 2002. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. 85 p.
- STATISTICAL ANALYSIS SOFTWARE. 9.2. 2011. Copyright (c) 2002-2008 by SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- VALIANTZAS J. D. 2011. Combined Brooks-Corey/Burdine and van Genuchten/ Mualem Closed-Form Model for Improving Prediction of Unsaturated Conductivity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* © ASCE, 137 (4): 223-233p.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44: 892-898 p.