

SOFTWARE Assofu TO ASSESS ENVIRONMENTAL SOIL FUNCTIONS

Ángeles Gallegos-Tavera^{1,2}; Francisco Bautista¹; Oscar Álvarez^{1,2}.¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, MÉXICO.

Correo-e: leptosol@ciga.unam.mx Tel.: 52 (443) 3223869 (*Autor para correspondencia).

²Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro. Av. Tecnológico núm. 201, zona El Gigante. C. P. 61650. Tacámbaro, Michoacán.

RESUMEN

El análisis interpretativo de las funciones del suelo es fundamental para su buen uso y manejo. La evaluación de las funciones ha transitado de la parte teórica a la práctica con los esquemas de los modelos de evaluación TUSEC (Técnicas para la evaluación de los suelos y categorización para suelos naturales y antropogénicos). Por otro lado, los modelos interpretativos de suelos orientados a la agricultura y con objetivos ambientales, como los del sistema informático MicroLEIS DSS (Sistema de apoyo a la decisión sobre evaluación de tierras para la protección de suelos agrícolas), han sido los más utilizados en el mundo. Sin embargo, pocos modelos sobre las funciones del suelo han sido incluidos en un software, por lo que la operación manual de éstos puede conducir a errores e imprecisiones. El objetivo de este trabajo fue la elaboración de un software que incluyera las ventajas del sistema MicroLEIS y del modelo TUSEC, considerando un uso más amigable para el usuario. El software Assessment Soil Functions (Assofu) almacena las propiedades de perfiles de suelo como datos de entrada y, con base en esta información, sistematiza la aplicación de evaluaciones de funciones de los suelos.

PALABRAS CLAVE: Análisis interpretativo de suelos, evaluación edafo-ecológica, perfil del suelo, base de datos.

ABSTRACT

The interpretive analysis of soil functions is essential for its proper use and handling. The evaluation of these soil functions evolved from the theoretical to the practical with the outlines of the method "Technique for soil evaluation and categorization for natural and anthropogenic soils". On other hand, the soil interpretive models oriented to agriculture and environmental objectives, such as MicroLEIS DSS (Land evaluation decision support system for agricultural soil protection) have been the most used in the world, however, few models of soil functions are included in software so its manual handling can lead to errors and inaccuracies. The aim of this work was the development of a software system includes the advantages and benefits of MicroLEIS DSS and TUSEC models considering a more user-friendly. Assofu software stored as input the properties of soil profiles, and based on this information systematized assessments applying soil functions.

KEYWORDS: Interpretative analysis of soils, soil-ecological assessment, soil profile, database.



Recibido: 09 de noviembre, 2012
Aceptado: 19 de junio, 2014
doi: 10.5154.r.chscfa.2012.11.060
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

El concepto de las funciones del suelo tiene sus inicios en el trabajo de Schlichting (1972) en el que se mencionan las funciones ecológicas y la multifuncionalidad del suelo. En 1977, Niemann identifica las funciones de producción forestal, las meteorológicas, hidrológicas, éticas, higiénicas, estéticas y de infraestructura. Después aparecen las funciones de seguridad alimentaria y amortiguadora de contaminantes (Brümmer, 1978; Larson & Pierce, 1994), la función del suelo como reactor ambiental (Bautista, Luna, & Durán, 1995; Blum & Santelises, 1994; Soil Science Society of America [SSSA], 1995; Richter, 1987) y como reserva genética por la biota que contiene (Blum & Santelises, 1994). Posteriormente se reportó que, en los ambientes urbanos, el suelo puede funcionar en la protección contra daños por tormentas, descomposición microbiana de contaminantes orgánicos, inmovilización de contaminantes inorgánicos, producción de recursos renovables como el aire y el agua, inmovilización del polvo, secuestro de carbono, soporte de vegetación exótica, lugar de esparcimiento y como archivo geológico e histórico (Bundesministerium der Justiz, 1998; Lehmann, 2006).

La evaluación de las funciones del suelo pasó de la parte teórica a la práctica con los esquemas de evaluación de los modelos denominados TUSEC (Técnicas para la evaluación de los suelos y categorización para suelos naturales y antropogénicos) (Lehmann, David, & Stahr, 2008). Estas técnicas de evaluación son una recopilación de la experiencia de un gran número de investigadores alemanes y han sido aplicadas con éxito en diversos estudios (Bedolla-Ochoa, Gallegos, Barajas, & Bautista, 2013; Lehmann & Stahr, 2010). A diferencia de otros esquemas interpretativos de suelo, como por ejemplo la clasificación de capacidad de uso (Klingebiel & Montgomery, 1961), TUSEC tiene en cuenta las propiedades del perfil del suelo y no únicamente las propiedades aisladas o de un solo horizonte.

Por otro lado, las técnicas interpretativas de suelos orientados a la agricultura y con objetivos ambientales han sido las más utilizadas en el mundo (Klingebiel & Montgomery, 1961; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1973, 1978; Sánchez, Couto, & Buol, 1982; United States Department of Agriculture [USDA], 1983; Ortiz-Solorio & Gutiérrez-Castorena, 2005); sin embargo, solo algunas están contempladas en un software especializado, por lo que se tienen las siguientes desventajas: a) introducción de errores en la captura de la información base (relieve, suelos, clima), b) pérdida potencial de los datos, c) mayor inversión de tiempo en consulta, d) errores en la aplicación de las técnicas de evaluación y e) manejo deficiente de la información emanada de la evaluación. El sistema de apoyo a la decisión sobre evaluación de tierras para la protección de suelos agrícolas MicroLEIS DSS es un modelo interpretativo que surgió en la década de los años 90. En el 2004, el sistema se modernizó constituyéndose en un conjunto amplio de herramientas informáticas de utilidad para la toma de decisiones en los ámbitos agrícola,

INTRODUCTION

The concept of soil functions has its beginnings in the work of Schlichting (1972) in which the ecological functions and multifunctional of the soil are mentioned. In 1977, Niemann identifies forestry, meteorological, hydrological, ethical, hygienic, aesthetic and infrastructure functions. Then, appear food safety functions and functions buffering contaminants (Brümmer, 1978; Larson & Pierce, 1994), soil function as environmental reactor (Bautista, Luna, & Durán, 1995; Blum & Santelises, 1994; Soil Science Society of America [SSSA], 1995; Richter, 1987) and as a gene reserve due to the biota it contains (Blum & Santelises, 1994). Later it was reported that, in urban environments, soil can function to protect against storm damage, microbial decomposition of organic pollutants, immobilization of inorganic contaminants, production of renewable resources such as air and water, dust immobilization, carbon sequestration, support of exotic vegetation, place of recreation and as geological and historical file (Bundesministerium der Justiz, 1998; Lehmann, 2006).

Soil function assessment moved from the theoretical to the practical part using the assessment schemes of the TUSEC models (techniques for soil assessment and categorization of natural and anthropogenic soils) (Lehmann, David, & Stahr, 2008). These assessment techniques are a compilation of experiences of a large number of German researchers and have been applied successfully in several studies (Bedolla-Ochoa, Gallegos, Barajas, & Bautista, 2013; Lehmann & Stahr, 2010). Unlike other soil interpretive schemes, such as the classification of usability (Klingebiel & Montgomery, 1961), TUSEC takes into account the properties of the soil profile and not only isolated properties of with a single horizon.

On the other hand, interpretative techniques of soils designed to agriculture and environmental objectives have been the most used in the world (Klingebiel & Montgomery, 1961; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1973, 1978; Sánchez, Couto, & Buol, 1982; United States Department of Agriculture [USDA], 1983; Ortiz-Solorio & Gutiérrez-Castorena, 2005); however, only some techniques are covered by a specialized software, so we have the following disadvantages: a) introduction of errors in the capture of the base information (topography, soils, climate), b) potential loss of data, c) greater investment of time in consultation, d) errors in the application of assessment techniques and e) poor management of information from the evaluation. The decision support system on land assessment for agricultural soil protection MicroLEIS DSS is an interpretive model that emerged in the early 90s. In 2004, the system was modernized constituting a broad set of useful software tools for decision-making in the agricultural, environmental and ecological areas (De la Rosa, Mayol, Díaz-Pereira, Fernández, & De la Rosa, 2004; De la Rosa, 2008; De la Rosa, Anaya-Romero, Díaz-Pereira, Heredia, & Shahbazi, 2009; Díaz-Pereira, Anaya-Romero, & De la Rosa, 2011).

ambiental y ecológico (De la Rosa, Mayol, Díaz-Pereira, Fernández, & De la Rosa, 2004; De la Rosa, 2008; De la Rosa, Anaya-Romero, Díaz-Pereira, Heredia, & Shahbazi, 2009; Díaz-Pereira, Anaya-Romero, & De la Rosa, 2011).

El análisis interpretativo de las funciones del suelo es fundamental para su buen uso y manejo; sin embargo, es necesario utilizar los sistemas informáticos para un manejo adecuado de la información edafológica tendiente a evaluar las funciones de los suelos de forma ágil y eficiente. El sistema MicroLEIS DSS incluye gran cantidad y variedad de modelos para la evaluación de tierras; sin embargo, no utiliza la información del perfil de suelo de manera integral y no cuenta con los métodos de evaluación de las funciones de los suelos. Por otra parte, los modelos de evaluación de las funciones del suelo TUSEC (Lehmann et al., 2008) incluyen el perfil de suelo completo en los métodos de evaluación de las funciones del suelo, pero tienen la desventaja de que no incorporan una base de datos de perfiles de suelos y el software no se encuentra disponible para todo público. En la última década, el discurso sobre la evaluación de los suelos se dirige hacia la restauración de los suelos degradados, al uso sustentable de las tierras y a la evaluación de las funciones de los suelos (Bouma, 2009); algunas de las cuales no habían sido contempladas en los modelos de evaluación preexistentes. En tal contexto, el objetivo de este trabajo fue la elaboración del software Assofu (Assessment Soil Functions) para la evaluación de las funciones de los suelos, que incluye las ventajas del sistema MicroLEIS (base de datos con las propiedades de los perfiles de los suelos, incluyendo fotografías del perfil y del sitio) y del modelo TUSEC (técnicas de evaluación de las funciones de los suelos), considerando un uso más amigable para el usuario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo del software

El software Assofu se diseñó y desarrolló con base en la norma mexicana de tecnologías de información y procesos de vida del software NMX-I-O45-NYCE-2005 (Normalización y Certificación Electrónica [NYCE], 2005) de la cual se tomaron las siguientes etapas:

- I. Instrumentación del proceso. El modelo de ciclo de vida 4+1 vistas, se utilizó para describir las funciones del software, la arquitectura del desarrollo y los módulos de procesos. El programa Visual Basic 2008 Express (Microsoft, 2008a) se seleccionó como entorno de desarrollo integrado y SQL Server 2008 Express (Microsoft, 2008b), como sistema de gestión de base de datos.
- II. Análisis de los requisitos. Los requerimientos de usuario, requerimientos funcionales y no funcionales, fueron descritos y evaluados.
- III. Diseño de la arquitectura. En esta etapa se definió la estructura de la base de datos y de la interfaz del software.

The interpretive analysis of soil functions is essential for its proper use and handling; however, it is necessary to use software systems for proper management of soil information aimed to quickly and efficiently assess soil functions. The MicroLEIS DSS system includes large number and variety of models for land assessment; however, it does not use soil profile integrally and does not have methods for evaluating soil functions. Moreover, assessment models of soil functions TUSEC (Lehmann et al., 2008) include the entire soil profile in the methods of assessment of soil functions, but the disadvantage is that they do not incorporate a database of soil profiles and the software is not available to everyone. In the last decade, the discourse on soil assessment is directed towards the restoration of degraded soils, sustainable land use and assessment of soil functions (Bouma, 2009); some of which had not been covered by existing evaluation models. In this context, the aim of this work was to develop the software Assofu (Assessment Soil Function) for the evaluation of soil functions, including the advantages of the MicroLEIS system (database with the properties of the soil profiles including profile and site images) and the TUSEC (evaluation techniques of soil functions) model, considering a user-friendly use.

MATERIALS AND METHODS

Software development

The Assofu software was designed and developed based on the Mexican Standard of information technology and software life processes NMX-I-O45-NYCE-2005 (Electronic Standardization and Certification [NYCE], 2005) from which the following stages were taken:

- I. Implementation of the process. The life cycle model 4 +1 views, was used to describe the functions of the software, development architecture and process modules. The Visual Basic program 2008 Express (Microsoft, 2008a) was selected as the integrated development environment and SQL Server 2008 Express (Microsoft, 2008b), as a management system database.
- II. Analysis of the requirements. User requirements, functional and non-functional requirements, were described and evaluated.
- III. Architecture design. At this stage the structure of the database and software interface were defined.
- IV. Coding and testing. Programming and testing processes were implemented to check the operation of the software modules.

Assessment models

The first evaluation is called soil-ecology (Lehmann et al., 2008; Siebe, Janh, & Stahr, 1996). This evaluation calculates the moisture retention capacity that represents water storage after rain, when the gravitational water leaves the ground; occurring evaporation losses, absorption by plants, etc. during this period. The following formulas were used to

IV. Codificación y pruebas. La programación y los procesos de prueba se ejecutaron para comprobar los módulos de funcionamiento del software.

Modelos de evaluación

La primera evaluación es la denominada edafo-ecológica (Lehmann et al., 2008; Siebe, Janh, & Stahr, 1996). En ésta se calcula la capacidad de retención de humedad que representa el almacenaje de agua logrado después de la lluvia cuando el agua gravitacional abandona el suelo; durante este periodo se producen pérdidas por evaporación, absorción de las plantas, etc. Para calcular la capacidad de retención de humedad se utilizan las siguientes fórmulas:

$$dcc \left[\frac{L}{m^2} \right] = dcc [Vol.\%] * (100 - piedras [Vol.\%] * espesor [dm])$$

Donde:

dcc = Capacidad de retención de agua por horizonte (litro·m⁻²)
 dcc vol. = Volumen de la capacidad de retención de agua (%)
 Piedras vol. = Volumen de piedras del horizonte (%)
 Espesor = Espesor del horizonte (dm)

La cantidad de humus se calcula con la siguiente fórmula:

$$CH (kg/m^2) = mo(\%) * da (kg/dm^3) * ((100 - \%piedras/100) * espesor (dm))$$

Donde:

CH = Cantidad de humus (kg·m⁻²)
 mo = Contenido de materia orgánica (%)
 da = Densidad aparente (kg·dm⁻³)
 piedras = Volumen de piedras del horizonte (%)
 espesor = Espesor del horizonte (dm)

La reserva de nitrógeno total se calcula con la siguiente fórmula:

$$RNT (kg/m^2) = humus (kg/m^2) * Tipo de humus$$

Donde:

RNT = Reserva de nitrógeno total (kg·m⁻²)
 humus = Cantidad de humus en 1 m² de suelo dentro del espacio radicular (kg·m⁻²)
 Tipo de humus = Acorde con la constante definida por el tipo de humus del horizonte: mull (0.050), moder (0.025) y mor o rohhumus (0.015).

La disponibilidad de nitrógeno se calcula:

$$Nd (g/m^2) = humus (kg/m^2) * tipo de humus$$

Donde:

Nd = Disponibilidad de nitrógeno (kg·m⁻²)

calculate the moisture retention capacity:

$$dcc \left[\frac{L}{m^2} \right] = dcc [Vol.\%] * (100 - stones [Vol.\%] * thickness [dm])$$

Where:

dcc = water retention capacity by horizon (liter·m⁻²)
 dcc vol. = Volume of water retention capacity (%)
 Stones vol. = Volume of horizon stones (%)
 Thickness = Horizon thickness (dm)

The amount of humus is calculated with the following formula:

$$NH (kg/m^2) = om(\%) * bd (kg/dm^3) * ((100 - \%stones/100) * thickness (dm))$$

Where:

NH = Number of humus (kg·m⁻²)
 om = Organic matter content (%)
 bd = Bulk density (kg·dm⁻³)
 stones = Volume of horizon stones (%)
 thickness = Horizon thickness (dm)

Total nitrogen reserve is calculated from the following formula:

$$TNR (kg/m^2) = humus (kg/m^2) * humustype$$

Where:

TNR = Total nitrogen reserve (kg·m⁻²)
 humus = Number of humus in 1 m² of soil within root space (kg·m⁻²)
 Humus type = According to the constant defined by the type of humus horizon: mull (0.050), moder (0.025) and mor o rohhumus (0.015).

The availability of nitrogen is calculated as follows:

$$Nd (g/m^2) = humus (kg/m^2) * humustype$$

Where:

Nd = Availability of nitrogen (kg·m⁻²)
 humus = Number of humus in 1 m² of soil within root space (kg·m⁻²)
 Humus type = Constant defined by the type of humus horizon: mull (0.25), moder (0.08) and mor or rohhumus (0.03).

The supply of phosphorus (SP) is measured or may be estimated as follows:

$$SP (g/m^2) = humus (kg/m^2) * Humustype$$

Where:

humus = Cantidad de humus en 1 m² de suelo dentro del espacio radicular (kg·m⁻²)
Tipo de humus = Constante definida según el tipo de humus del horizonte: mull (0.25) moder (0.08) y mor o rohhumus (0.03).

SP= Supply of phosphorus (g·m⁻²)
humus = Number of humus in 1m² of soil within root space (kg·m⁻²)
Humus type = Constant defined by the type of humus horizon: mull (10.0) moder (1.5) and mor or rohhumus (0.8).

El abastecimiento de fósforo (AF) se mide o se puede estimar de la siguiente manera:

The assessment models of soil functions used in Assofu are: a) habitat for human life, b) habitat for flora and fauna, c) component of the water cycle, d) environmental transformation, e) nutrient cycle, f) Natural file, g) food production and biomass, h) heavy metal filter and buffer (Lehmann et al, 2008), i) storage of organic carbon (Penman et al., 2003; Pérez-Ramírez, Ramírez, Jaramillo, & Bautista, 2013) and j) soil as reactor (retention and mineralization) of wastewater (Aguilar, Bautista, & Díaz-Pereira, 2011). The result of the evaluation is classified using the following reference tables: class 1 = very high level, class 2 = high level, class 3 = middle level, class 4 = low level and class 5 = very low level.

$$AF(g/m^2) = humus(kg/m^2) * Tipo de humus$$

Donde:

AF = Abastecimiento de fósforo (g·m⁻²)
humus = Cantidad de humus en 1m² de suelo dentro del espacio radicular (kg·m⁻²)
Tipo de humus = Constante definida según el tipo de humus del horizonte: mull (10.0) moder (1.5) y mor o rohhumus (0.8).

Los modelos de evaluación de las funciones del suelo implementados en Assofu son: a) hábitat para la vida humana, b) hábitat de la flora y la fauna, c) componente del ciclo del agua, d) transformación del medio, e) ciclo de nutrimentos, f) archivo natural, g) producción de alimentos y biomasa, h) filtro y regulador de metales (Lehmann et al., 2008), i) almacenaje de carbono orgánico (Penman et al., 2003; Pérez-Ramírez, Ramírez, Jaramillo, & Bautista, 2013) y j) suelo como reactor (retención y mineralización) de aguas residuales (Aguilar, Bautista, & Díaz-Pereira, 2011). El resultado de las evaluaciones se clasifica utilizando tablas de referencia donde: clase 1 = nivel muy alto, clase 2 = nivel alto, clase 3 = nivel medio, clase 4 = nivel bajo y clase 5 = nivel muy bajo.

To describe the operation of the software a case study was included with information on the profile of the site called 'El Cobano', located in Huacana, Michoacán. The profile was described according to Siebe et al. (1996) and indicated by the FAO (2009).

Evaluation of soil functions based on profiles

Soil assessment as a means of infiltration and seepage. This evaluation will consider the following properties:

Horizon hydraulic conductivity can be measured or estimated using Table 1. Another property is the relevant critical rainfall estimated as follows:

Para describir el funcionamiento del software se incluyó un estudio de caso con los datos del perfil del sitio denominado 'El Cobano', ubicado en el municipio de la Huacana, Michoacán. El perfil se describió de acuerdo con Siebe et al. (1996) y lo indicado por la FAO (2009).

$$RlvCritRain = CritRain * 1/HCritRain$$

Where:

RlvCritRain = Relevant critical rainfall (mm)
 CritRain = Number of rainfall (mm) according to the appropriate literature
 HCritRain = critical rainfall (mm) based on the time of decimal hours.

Evaluación de las funciones de los suelos con base en perfiles

Evaluación del suelo como medio de filtración e infiltración. En esta evaluación se estiman las siguientes propiedades:

The total aeration capacity is calculated using the following equation:

La conductividad hidráulica por horizonte que puede ser medida o en su defecto estimada con el Cuadro 1. Otra propiedad es la precipitación crítica relevante que se estima de la siguiente manera:

$$ACT = \sum_{i=1}^n (TH_i * 100) * \left(1 - \left(\frac{CR_i}{100} \right) \right) * \left(\frac{AC_i}{100} \right)$$

Where:

$$RlvCritRain = CritRain * 1/HCritRain$$

ACT: Total aeration capacity (liter·m⁻²)
 TH_i = Thickness of horizon *i* (dm)
 CR_i = Volume of coarse fragments of horizon *n* (%)
 AC_i = Available aeration capacity of horizon *i* (liter·m⁻²)

Donde:

RlvCritRain = Precipitación crítica relevante (mm)
 CritRain = Cantidad de precipitación crítica (mm) de

Evaluation of soil as a filter and buffer of heavy metals.

CUADRO 1. Guía para la determinación de límites de la conductividad hidráulica por horizonte de suelo.

Volumen de piedras $\geq 60\%$	→ Continúe con (i)
Compuesto por material de suelo en capas	
Densidad aparente debajo de $1.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	→ Continúe con (i)
Estructura granular o subangular en bloques	
Densidad aparente menor de $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	→ Continúe con (i)
Otros casos	→ Continúe con (ii)
(i) $k_f = 300$	
(ii) $k_f =$ Conductividad hidráulica del horizonte	

TABLE 1. Guide for determining hydraulic conductivity limits per soil horizon.

Volume of stones $\geq 60\%$	→ Continue with (i)
Composed by soil material in layers	
Bulk density below $1.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	→ Continue with (i)
Granular or subangular block structure	
Bulk density below $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	→ Continue with (i)
Other cases	→ Continue with (ii)
(i) $k_f = 300$	
(ii) $k_f =$ Hydraulic conductivity of the horizon	

acuerdo con la literatura pertinente

$H_{\text{CritRain}} =$ Precipitación crítica (mm) con base en el tiempo de horas decimales.

La capacidad de aireación total se calcula con la siguiente ecuación:

$$ACT = \sum_{i=1}^n (TH_i * 100) * \left(1 - \left(\frac{CR_i}{100}\right)\right) * \left(\frac{AC_i}{100}\right)$$

Donde:

ACT: Capacidad de aireación total (litro·m⁻²)

$TH_i =$ Espesor del horizonte i (dm)

$CR_i =$ Volumen de fragmentos gruesos del horizonte i (%)

$AC_i =$ Capacidad de aireación disponible del horizonte i (litro·m⁻²)

Evaluación del suelo como filtro y regulador de metales pesados. En esta evaluación se determina el nivel de arcilla y el humus del perfil completo, utilizando el espesor del horizonte, volumen de fragmentos gruesos, pH y los niveles de arcilla y humus por horizonte del perfil (Lehmann et al., 2008).

El factor arcilla por horizonte (CLY) se calcula con la siguiente ecuación:

$$CLY = (\text{Arcilla}/100) + AGG$$

Donde:

Arcilla = Arcilla por horizonte (%)

AGG = Agregación de la estructura de acuerdo con el tipo de estructura: angular en bloques (0.5); laminar, prismática o columnar (0.25) y otras (1).

El factor arcilla total (CLYt) para el perfil del suelo se calcula de la siguiente forma:

This evaluation determines the level of clay and humus of the whole profile, using the thickness of the horizon, volume of coarse fragments, pH and levels of clay and humus per horizon profile (Lehmann et al., 2008).

The factor clay per horizon (CLY) is calculated with the following equation:

$$CLY = (\text{Clay}/100) + AGG$$

Where:

Clay = Clay per horizon (%)

AGG = Aggregation of the structure according to the type of structure: angular in blocks (0.5); laminar, prismatic or columnar (0.25) and others (1).

The factor Total clay (CLYt) for the soil profile is calculated as follows:

$$CLYt = \sum_{i=1}^n TH_i * \left(1 - \left(\frac{CR_i}{100}\right)\right) * CLY_i * pH_i$$

Where:

$TH_i =$ Thickness of horizon i (dm)

$CR_i =$ Volume of coarse fragments of horizon i (%)

$CLY_i =$ Value of clay calculated from the horizon i (liter·m⁻²)

$pH_i =$ Factor pH of horizon i according to the following:

< 4.0 = 0.1; 4.0 a 4.9 = 0.3; 5.0 a 5.5 = 0.5; 5.6 a 6.4 = 0.8; $\geq 6.5 = 1$.

The values of CLYt received an evaluation value according to the following: < 1.0 = 5; 1.0 a 1.4 = 4; 1.5 a 1.9 = 3; 2.0 a 2.4 = 2; $\geq 2.5 = 1$.

The factor humus (FH) is calculated with the value of humus horizon:

$$FH = \text{Humus} / 100$$

$$CLY_t = \sum_{i=1}^n TH_i * \left(1 - \left(\frac{CR_i}{100}\right)\right) * CLY_i * pH_i$$

Donde:

TH_i = Espesor del horizonte *i* (dm)

CR_i = Volumen de fragmentos gruesos del horizonte *i* (%)

CLY_i = Valor de arcilla calculado del horizonte *i* (litro·m⁻²)

pH_i = Factor pH del horizonte *i* de acuerdo con lo siguiente:
 < 4.0 = 0.1; 4.0 a 4.9 = 0.3; 5.0 a 5.5 = 0.5; 5.6 a 6.4 = 0.8;
 ≥ 6.5 = 1.

A los valores de CLY_t se les asigna un valor de evaluación, de acuerdo con lo siguiente: < 1.0 = 5; 1.0 a 1.4 = 4; 1.5 a 1.9 = 3; 2.0 a 2.4 = 2; ≥ 2.5 = 1.

El factor humus (FH) se calcula con el valor del humus del horizonte:

$$FH = \text{Humus} / 100$$

El cálculo del factor humus total (FH_t) para el perfil completo se calcula así:

$$FH_t = \sum_{i=1}^n TH_i * 10 * \left(1 - \left(\frac{CR_i}{100}\right)\right) * HU_i * pH_i$$

Donde:

TH_i = Espesor del horizonte *i* (dm)

CR_i = Volumen de fragmentos gruesos del horizonte *i* (%)

HU_i = Contenido de humus del horizonte *i* (%)

pH_i = Factor pH del horizonte *i* de acuerdo con lo siguiente:
 < 4.0 = 0.1; 4.0 a 4.9 = 0.3; 5.0 a 5.5 = 0.5; 5.6 a 6.4 = 0.8;
 ≥ 6.5 = 1.

Al valor del FH_t se le asigna una evaluación intermedia de acuerdo con los siguientes valores: < 0.5 = 5; 0.5 a 1.0 = 4; 1.1 a 2.0 = 3; 2.1 a 3.0 = 2; > 3 = 1.

La evaluación final se deduce de la siguiente forma: Si la clasificación del valor de CLY_t es menor que la clasificación intermedia del FH_t, entonces el resultado es el valor de CLY_t. Si la clasificación intermedia del FH_t es menor que la clasificación intermedia del CLY_t, entonces el resultado es el valor de FH_t.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Assofu es un software de utilidad para instrumentar modelos de evaluación de las funciones de los suelos, brindando un ahorro considerable de tiempo al implementar las evaluaciones sistemáticamente.

Captura y almacenamiento de información

Los datos de entrada para el software Assofu son: a) información del sitio, b) propiedades de los horizontes del perfil y c) propiedades para la evaluación edafo-ecológica. Esta información es necesaria para la aplicación de las

The calculation of the factor total humus r (FtH) for the full profile is calculated as follows:

$$FH_t = \sum_{i=1}^n TH_i * 10 * \left(1 - \left(\frac{CR_i}{100}\right)\right) * HU_i * pH_i$$

Where:

TH_i = Thickness of horizon *i* (dm)

CR_i = Volume of coarse fragments of horizon *i* (%)

HU_i = Content of humus of horizon *i* (%)

pH_i = Factor pH of horizon *i* according to the following:

< 4.0 = 0.1; 4.0 a 4.9 = 0.3; 5.0 a 5.5 = 0.5; 5.6 a 6.4 = 0.8; ≥ 6.5 = 1.

The value of the FtH received an interim evaluation in accordance with the following values: < 0.5 = 5; 0.5 a 1.0 = 4; 1.1 a 2.0 = 3; 2.1 a 3.0 = 2; > 3 = 1.

The final evaluation is deduced as follows: If the classification of the value of CLY_t is lower than the intermediate classification of FtH, then the result is the value of CLY_t. If the intermediate classification of FtH is lower than the intermediate classification of CLY_t, then the result is the value of FtH.

RESULTS AND DISCUSSION

Assofu is a software to implement assessment models of soil functions, providing a considerable time savings by implementing systematic evaluations.

Capture and storage of information

The input data for the software Assofu are: a) information of the site, b) properties of the horizons of the profile and c) properties for soil-ecology assessment. This information is necessary for the implementation of evaluations. Figure 1 shows the information of the profile 'El Cobano' captured using data measured and introduced directly into the text boxes (with black background) and estimated data in which the user used reference forms to estimate properties (with blue background).

Soil-ecology assessment

This part of the process involves making estimates and assessments at profile level based on the horizons data, from field or laboratory measurements (Siebe et al., 1996). The software sorts the values at a level ranging from low to high; the rating scale depends on the property to be evaluated. To complete this evaluation, the software takes the sum of the properties per horizon and classifies them once again. The soil-ecology assessment of the soil profile of 'El Cobano' with its three horizons is shown in Figure 2. Once the profile information is captured, it is stored and can be found (Figure 3), modified, or exported to Microsoft Excel, as appropriate.

evaluaciones. En la Figura 1 se muestra la información del perfil 'El Cobano' que fue capturada utilizando datos medidos e introducidos directamente en las cajas de texto (identificadas con fondo negro) y datos estimados en los que el usuario utilizó formularios de referencias para la estimación de propiedades (identificados con fondo azul).

Evaluación edafo-ecológica

Esta parte del proceso consiste en realizar estimaciones y evaluaciones a nivel de perfil con base en los datos de los horizontes, provenientes de mediciones de campo o de laboratorio (Siebe et al., 1996). El software clasifica los valores en un nivel que va de bajo a alto; la escala de clasificación depende de la propiedad a evaluar. Para completar esta evaluación, el software realiza la sumatoria de las propiedades por horizonte y las clasifica una vez más. La evaluación edafo-ecológica del perfil de suelo de la localidad "El Cobano" con sus tres horizontes se presenta en la Figura 2. Una vez capturada la información del perfil, se almacena y puede ser consultada (Figura 3), modificada o exportada a Microsoft Excel, según convenga.

Evaluación de las funciones de los suelos con base en perfiles

La información de entrada para la evaluación de las funciones del suelo, en el software Assofu, es extraída de la base de datos de perfiles de suelo de manera automatizada, con lo cual disminuye la posibilidad de introducir errores durante la ejecución. A continuación se presentan dos evaluaciones para el perfil de suelo de la localidad El Cobano.

En la Figura 4 se muestra la evaluación del suelo como medio de filtración e infiltración. En esta evaluación, los horizontes del perfil se ordenan con base en el valor de conductividad hidráulica más bajo, para este caso el horizonte C. El valor de la capacidad del suelo para la infiltración con lluvias fuertes hace referencia a la sumatoria de la capacidad de aireación de los horizontes con mayor importancia para la infiltración. La clasificación resultante se calculó considerando el nivel de la infiltración con fuertes lluvias y el nivel de precipitación crítica del perfil de acuerdo con la localidad.

La Figura 5 muestra la evaluación del suelo como filtro y regulador de metales pesados. El factor pH y el factor de agregación fueron estimados en clase 1 (muy alto) con base en tablas. Dichas estimaciones son utilizadas para calcular el valor de arcilla y de humus para el perfil completo del suelo considerando también el espesor del horizonte y el volumen de fragmentos gruesos. La clase del resultado final se obtiene a partir de tablas con escalas del valor de las propiedades estimadas. Tanto la arcilla como el humus corresponden a la clase 5, por lo que sus valores para este perfil de suelo son muy bajos.

La clasificación resultante de las evaluaciones del método TUSEC (Lehmann et al., 2008) facilita la interpretación,

Evaluation of soil functions based on profiles

The input information for the assessment of soil functions in Assofu is extracted from the database of soil profiles in an automated manner, thereby decreasing the possibility of introducing errors during execution. Here are two assessments for the soil profile of El Cobano.

Figure 4 shows the evaluation of soil as means of infiltration and seepage. In this evaluation, the horizons of the profile are sorted based on the lower value of hydraulic conductivity, in this case the horizon C. The value of the ability of soil for infiltration with heavy rainfall refers to the sum of the capacity of aeration of horizons with greater importance for infiltration. The resulting classification was calculated according to the level of infiltration with heavy rainfall and the level of critical rainfall of the profile according to the locality.

Figure 5 shows the evaluation of soil and filter and buffer of heavy metals. pH and aggregation were estimated in Class 1 (very high) based on tables. These estimates are used to calculate the value of clay and humus for the whole soil profile also considering the thickness of the horizon and the volume of coarse fragments. The class of the final result is obtained from tables with value scales of properties estimated. Both clay and humus belong to class 5, so their values for this soil profile are very low.

The resulting classification of the assessments of the TUSEC method (Lehmann et al., 2008) facilitates the interpretation, allowing the user to easily set the result of the evaluation (Figure 6). To provide a high level of reliability in its execution and results, the software includes the following functions:

- (i) Control of characters. The type of data allowed in the capture of information depends on the profile property to insert. The information is controlled from conditions that validate each character typed by the user using the received event of characters from the forms.
- (ii) Inclusion of algorithms for evaluations. The results in each evaluation procedure are reliable thanks to its systematization. The input data for each evaluation are taken from the information stored in the database.
- (iii) Control of the database. The types of data stored are validated when they are captured allowing consistency in the information. The integrity of the database is controlled by implementing transactions to make changes and delete data in SQL.

Assofu is a software for the assessment of soil functions that can be useful in assessing land. However, and in order to improve it, it is necessary to incorporate other interpretive models of soil such as MicroLEIS DSS system (De la Rosa et al., 2004), the models of the support system for decision-making for nutrient management (Osmond et al., 2002) and environmental assessment models, using the ground as

The screenshot shows the 'Assessment Soil Functions' software interface. At the top, there are buttons for 'Continue', 'Save site information', and 'Close new entry'. The main window is titled 'Site info' and contains several input fields organized into columns:

- Left Column:** Locality (El cobano), Site (El cobano), Town (La Huacana), Date (12/05/2011), Author (Bedolla-Ochoa Culzi), Weather conditions present (SU), Precipitation (655 mm), Physiographic position (TS), Profile development depth (25 cm), Elevation (msnm) (501).
- Middle Column:** Profile key (006), Latitude (18° 56' 37" N), Longitude (101° 49' 42" W), Map No. (E14 A51), Weather (Aw0), Previous climate condition (ET1), Erosion types (WA), Geomorph (Plain), Medium piezometric level (0), Current piezometric level (0).
- Right Column:** Vegetation type (Secondary vegetation), Dry season (May to September), Humus type (Mull), Exposure (SE), Inclination (18), Microrelief (Slightly uneven), Parental material (Basalt), Maximum depth of roots (25 cm), Soil classification (Leptosol).

At the bottom, there is a section for 'Select the image and insert a description in the table' with a table header 'Description Image' and a photo of a soil profile. To the right, there are tabs for 'Land use and vegetation', 'Intensity of erosion', 'Landform', and 'Observations', with 'Land use and vegetation' selected and showing 'Rancher'.

FIGURA 1. Datos de entrada para el software Assofu. Información del perfil de la localidad El Cobano, municipio de La Huacana, Michoacán (estudio de caso).

FIGURE 1. Input data for Assofu. Profile Information of the locality El Cobano, La Huacana, Michoacán (case study).

The screenshot shows the 'Ecological assessment' software interface. It displays a table of soil parameters and their evaluations. The table has the following columns:

Thickness	Root penetration	BD	OM	VPT	AC	dCC	aFC	KI	CEC	cmol/kg	mol/m ²	Ahx1 otr x 0.5	Humus kg/m ²	Nt kg/m ²	Nd g/m ²	P om kg/m ²
2	Very good	medium	1.4	39.5, Low	7, Low	17.5, 24.5	26.5, 3.7	48, High	30.3, Medium	30.3	0.6	0.6	0.3	0.015	0.075	3
0.4	Good	medium	1.34	39.5, Low	7, Low	17.5, 4.9	26.5, 7.4	48, High	17.9, Regular	17.9	0.7	0.4	0.5	0.025	0.125	5
0.1	Good	high	1.3	35, Low	7.5, Medium	17.5, 1.225	27.5, 1.9	22, Medium	20, Regular	20	0.2	0.1	0.2	0.01	0.05	2

Below the table, there are several summary boxes for parameters like dCC, aFC, Erodibility, BI, Nt, Nd, P om, Physiological depth, Effective root space, Natural drainage, and Humus, each with its value and evaluation (e.g., 'very low', 'no', 'Good').

FIGURA 2. Datos de entrada para el software Assofu. Evaluación edafocológica del perfil de la localidad El Cobano, municipio de La Huacana, Michoacán (estudio de caso).

FIGURE 2. Pedo-ecological assessment of the profile from locality The Cobano.

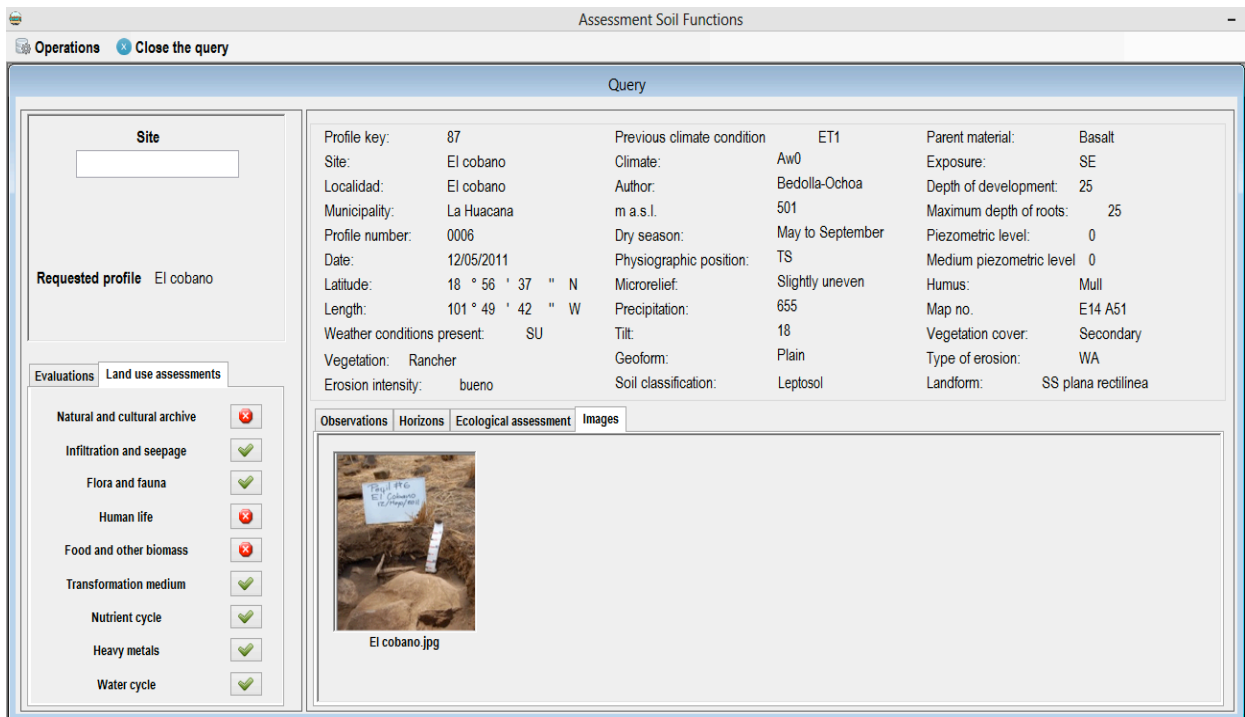


FIGURA 3. Consulta de información del perfil de suelo (El Cobano, La Huacana, Michoacán [estudio de caso]) en el software Assofu.

FIGURE 3. Query of soil profile from the locality The Cobano.

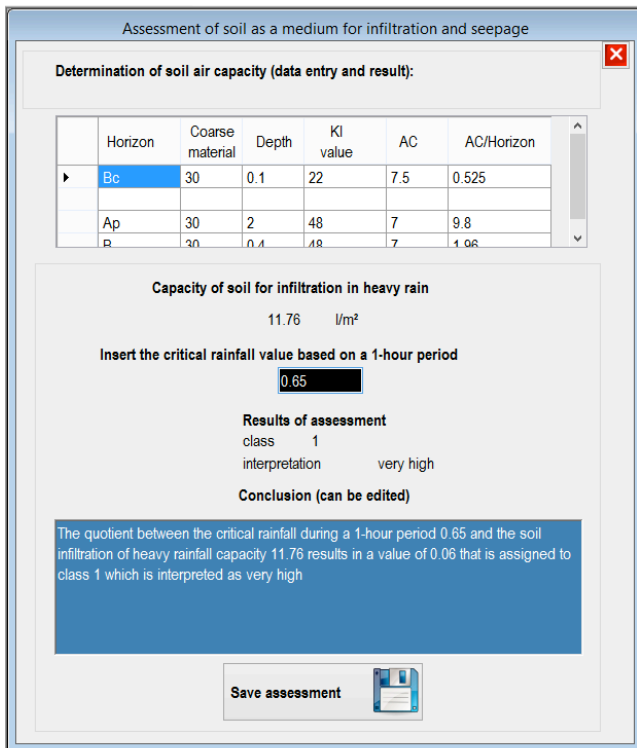


FIGURA 4. Evaluación de uso de suelo de la localidad El Cobano, La Huacana, Michoacán (estudio de caso) como medio de filtración e infiltración, utilizando el software Assofu.

FIGURE 4. Assessment of soil as médium for infiltration and seepage.

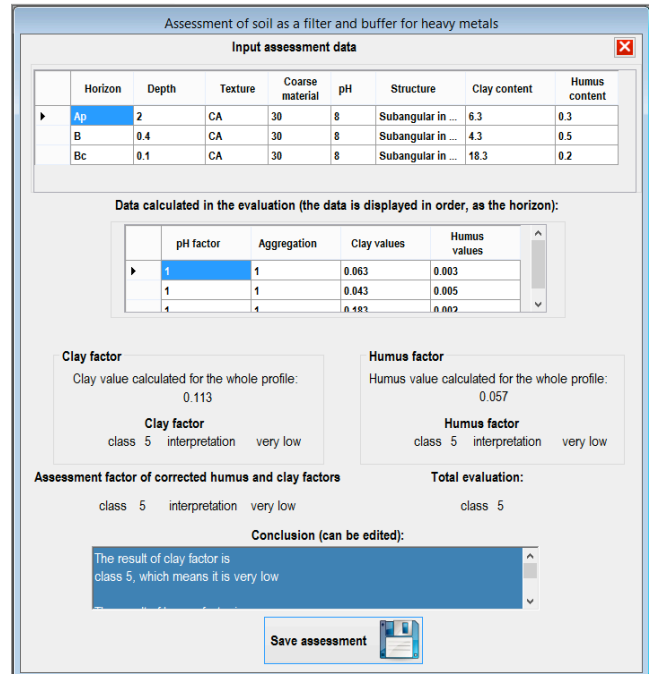


FIGURA 5. Evaluación del suelo de la localidad El Cobano, La Huacana, Michoacán (estudio de caso) como filtro y regulador de metales pesados, utilizando el software Assofu.

FIGURE 5. Assessment of soil as a filter and buffer for heavy metals.

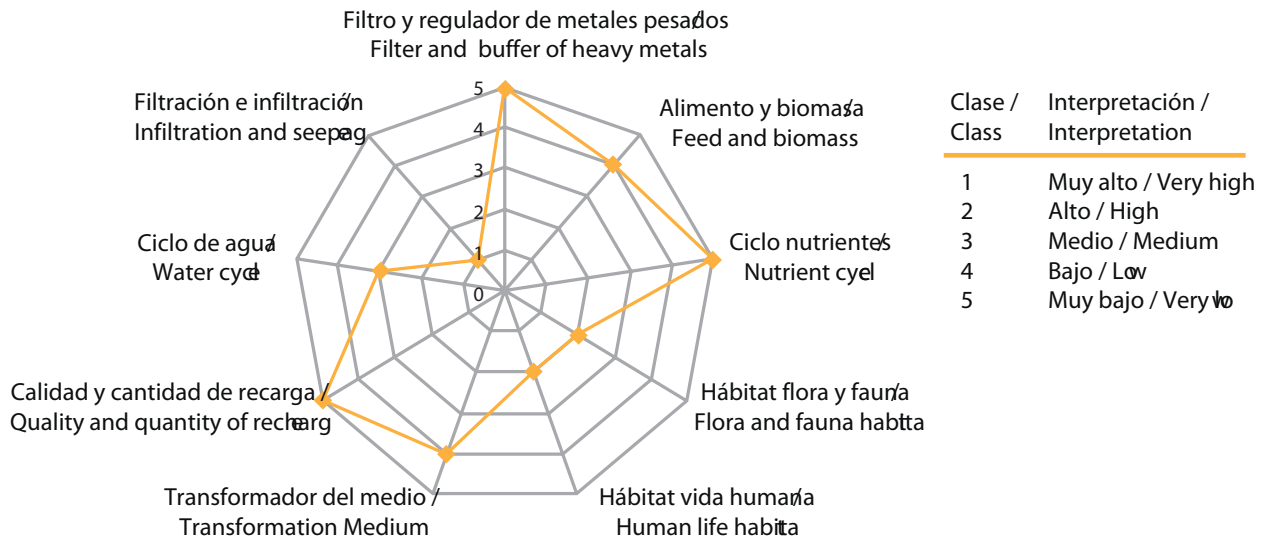


FIGURA 6. Evaluaciones del perfil de la localidad El Cobano, La Huacana, Michoacán (estudio de caso), con el software Assofu.

FIGURE 6. Profile evaluations of El Cobano, La Huacana, Michoacán (case study) using the software Assofu.

permitiendo que el usuario establezca fácilmente el resultado de la evaluación (Figura 6). Para proveer un alto nivel de confiabilidad en su ejecución y en los resultados, el software incluye las siguientes funciones:

- (i) Control de caracteres. Los tipos de datos permitidos en la captura de la información dependen de la propiedad del perfil a insertar. La información es controlada a partir de condiciones que validan cada carácter tecleado por el usuario mediante el evento de recepción de caracteres de los formularios.
- (ii) Inclusión de algoritmos para las evaluaciones. Los resultados en cada procedimiento de evaluación son confiables gracias a su sistematización. Los datos de entrada para cada evaluación se toman a partir de la información almacenada en la base de datos.
- (iii) Control de la base de datos. Los tipos de datos almacenados son validados durante su captura permitiendo la coherencia en la información. La integridad en la base de datos se controla mediante la implementación de transacciones al realizar modificaciones y eliminación en los datos con el lenguaje SQL.

Assofu es un software para la evaluación de funciones del suelo que puede ser útil en la evaluación de tierras. Sin embargo, y con el fin de mejorarlo, es necesaria la incorporación de otros modelos interpretativos de suelos como los del sistema MicroLEIS DSS (De la Rosa et al., 2004), los modelos del sistema de apoyo a la toma de decisiones para el manejo de nutrimentos (Osmond et al., 2002) y los modelos de evaluación ambientales, utilizando al suelo como reactor (Aguilar et al., 2011).

reactor (Aguilar et al., 2011).

Most evaluation techniques used in Assofu are a collection of the German School (Schlichting, 1972; Niemann, 1977; Brümmer, 1978; Bundesministerium der Justiz, 1998; Lehmann, 2006; Lehmann et al., 2008; Lehmann & Stahr, 2010). Such techniques have been successfully applied in Mexico (Siebe et al., 1996.) and in other parts of the world; however, it is required to assess soils such as Andosols and Leptosols.

CONCLUSIONS

Assofu works as a database but also supports and facilitates the evaluation of the environmental functions of soils, with versatile and easy software. The case study reveals that the Leptosol studied had lower classes (high values) on the evaluated functions, except for the filtering and infiltration capacity.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author thank the DGAPA-UNAM for financing the project IN223110 Diseño del mapa geopedológico de México a escala 1:500 000 con ventanas 1:250 000 en zonas volcánicas y de karst tropical”. AGT thanks the scholarship granted by the DGAPA of the Universidad Nacional Autónoma de México. The author thanks the anonymous reviewers for suggestions to improve the article.

End of English Version

La mayoría de las técnicas de evaluación utilizadas en Assofu son una recopilación de la escuela alemana (Schlichting, 1972; Niemann, 1977; Brümmer, 1978; Bundesministerium der Justiz, 1998; Lehmann, 2006; Lehmann et al., 2008; Lehmann & Stahr, 2010). Dichas técnicas han sido aplicadas con éxito en México (Siebe et al., 1996) y otras partes del mundo; sin embargo, se requiere la evaluación en suelos como los Andosoles y Leptosoles.

CONCLUSIONES

El software Assofu funciona como una base de datos pero además permite y facilita la evaluación de las funciones ambientales de los suelos, siendo un software versátil y de fácil manejo. El estudio de caso revela que el Leptosol estudiado presentó clases bajas (valores altos) en las funciones evaluadas, con excepción de la capacidad de filtración e infiltración.

AGRADECIMIENTOS

A la DGAPA-UNAM por el financiamiento al proyecto IN223110 "Diseño del mapa geopedológico de México a escala 1:500 000 con ventanas 1:250 000 en zonas volcánicas y de karst tropical". AGT agradece la beca otorgada por la DGAPA de la Universidad Nacional Autónoma de México. A los árbitros anónimos por las sugerencias para el mejoramiento del artículo.

REFERENCIAS

- Aguilar, Y., Bautista, F., & Díaz-Pereira, E. (2011). Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 13(2), 199–210. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93917767008>
- Bautista, F., Luna, P. V. M., & Durán, B. C. (1995). El suelo, un reactor químico muy interesante. *Educación química*, 6(4), 226–230.
- Bedolla-Ochoa, C., Gallegos, A., Barajas, A., & Bautista, F. (2013). Los suelos y sus funciones ambientales. *Gaceta de la Unión Geofísica Mexicana*, 3(10), 3–5. Obtenido de http://www.ugm.org.mx/docs/difusion/Gaceta_UGM_10_2013.pdf
- Blum, W. E. H., & Santelises, A. A. (1994). A concept of sustainability and resilience based on soil functions. In D. J. Greenland & I. Szabolcs (Eds.), *Soil resilience and sustainable land use* (pp. 535–542). Wallingford, UK: CAB International.
- Bouma, J. (2009). Soils are back on the global agenda: Now what? *Geoderma*, 150, 224–225. doi:10.1016/j.geoderma.2009.01.015
- Brümmer, G. (1978) Funktionen des Bodens im Stoffhaushalt der Ökosphäre. In G. Olschowy (Ed.), *Natur- und Umweltschutz in der Bundesrepublik Deutschland*, (pp. 111–124). Germany: Parey.
- Bundesministerium der Justiz (1998). Bundes-Bodenschutzgesetz—BBodSchG. Germany: Bundesgesetzblatt I. Bonn.
- De la Rosa, D., Mayol, F., Díaz-Pereira, E., Fernández, M., & De la Rosa, D., (2004). A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection. With special reference to the Mediterranean region. *Environmental Modeling & Software*, 19, 929–942. doi:10.1016/j.envsoft.2003.10.006
- De la Rosa, D. (2008). *Evaluación agroecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible*. Madrid, España: Mundi Prens.
- De la Rosa, D., Anaya-Romero, M., Díaz-Pereira, E., Heredia, N., & Shahbazi, F. (2009). Soil-specific agro-ecological strategies for sustainable land use – a case study by using MicroLEIS DSS in Sevilla Province (Spain). *Land Use Policy*, 26, 1055–1065. doi:10.1016/j.landusepol.2009.01.004
- Díaz-Pereira, E., Anaya-Romero, M., & De la Rosa, D. (2011). Modelos de evaluación agroecológica de tierras: Erosión y contaminación en el entorno MicroLEIS Evenor-Tech. *Teoría y Praxis*, 9, 91–107. Obtenido de <http://digital.csic.es/handle/10261/38727>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1973). *A framework for land evaluation*. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1978). *Report on the agro-ecological zones project. World soil resources report*. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma: Autor. Obtenido de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a0541s/a0541s00.pdf>
- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In D. C. Coleman, D. F. Bezdiceck, & B. A. Stewart (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 37-51). USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Lehmann, A. (2006). Technosols and other proposals on urban soils for the WRB (World reference base for soil resources). *International Agrophysics*, 20(2), 129–134. Obtenido de http://www.old.international-agrophysics.org/artykuly/international_agrophysics/IntAgr_2006_20_2_129.pdf
- Lehmann A., David, S., & Stahr, K. (2008). *TUSEC.-Technique for soil evaluation and categorization for natural and anthropogenic soils (English version)*. Alemania. Universitat Hohenheim Bodenkundliche Hefte.
- Lehmann, A., & Stahr, K. (2010). The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 1092–1102. doi:10.1007/s11368-010-0207-5
- Klingebiel, A. A., & Montgomery, P. H. (1961). Land-capability classification. Washington, DC: Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. Obtenido de http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052290.pdf
- Microsoft. (2008a). Visual Basic 2008 Express. Obtenido de <http://www.visualstudio.com/es-es/products/visual-studio-express-vs>
- Microsoft. (2008b). SQL Server 2008 Express. Obtenido de <http://www.microsoft.com/es-es/download/details.aspx?id=27597>
- Niemann, E. (1977). Eine Methode zur Erarbeitung der Funktionsleistung von Landschaftselementen. *Archiv Naturschutz und Landschaftsforschung*, 17, 119–157.
- Normalización y Certificación Electrónica (NYCE) A. C. (2005). *NMX-I045/NYCE 2005, Tecnología de la Información-*

- Software- Procesos del ciclo de vida del software.* México. Autor.
- Ortiz-Solorio, C. A., & Gutiérrez-Castorena, M. C. (2005). Contemporary influence of indigenous soil (Land) classification in Mexico. *Eurasian Soil Science*, 38, S 89 – S94.
- Osmond, D. L., Smyth, T. J., Yost, R. S., Reid, W. S., Hoag, D. L., Branch, W., Li, H. (2002). Nutrient Management Support System (NuMaSS) v. 2. Soil management collaborative research support program. USA: United States Agency for International Development, Soil Management Collaborative Research Support Program. Obtenido de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnada473.pdf
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., & Wagner, F. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Kanagawa, Japan: Intergovernmental Panel on Climate Change, Institute for Global Environment Strategies.
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, I., Jaramillo, P., & Bautista, F. (2013). Soil organic carbon content under different forest conditions: Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19, 157–173. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.06.042
- Richter, J. (1987). *The soil as a reactor : Modelling processes in the soil*. USA: Catena Verlag.
- Sánchez, P. A., Couto, W., & Buol, S. W. (1982). The fertility capability soil classification system. Interpretation, applicability and modifications. *Geoderma*, 27, 283–309. doi:10.1016/0016-7061(82)90019-2
- Siebe, C., Janh, R., & Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Estado de México, México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.
- Schlichting, E. (1972). Böden puffern Umwelteinflüsse. *Umsch Wiss Tech*, 72, 50–52.
- Soil Science Society of America (1995). *Statement on soil quality*. USA: Agronomy News.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1983). *National agricultural land evaluation and site assessment handbook*. Washington, DC: US. Government Printing Office.