

DETERMINING THE SOIL QUALITY INDEX IN THE BATUMI DELTA, GEORGIA

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO EN EL DELTA DE BATUMI, GEORGIA

Bülent Turgut^{1*}, Merve Ateş², Halil Akinci³

¹Karadeniz Technical University, Department of Soil and Ecology, 61080 Trabzon Türkiye. (bulentturgut@ktu.edu.tr). ²Artvin Çoruh University, Department of Soil and Ecology, 08000 Artvin Türkiye. (mrvates33@gmail.com). ³Artvin Çoruh University, Department of Geomatics Engineering, 08000 Artvin, Türkiye. (halil.akinci@artvin.edu.tr).

ABSTRACT

The soil quality index is a quantitative assessment concept and it is used in the evaluation of ecosystem components. Because of the high potential for agriculture and biodiversity, deltas are the most valuable parts of the ecosystem. This study aimed to determine the soil quality index (SQI) in the Batumi Delta, Georgia. For this purpose, the study area was divided into five plots due to their morphological positions (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , and L_5). A total of 125 soil samples were taken for analysis including clay content (CC), silt content (SC), sand content (SaC), mean weight diameter (MWD), aggregate stability (AS), amount of water retained under -33 kPa (FC) and -1500 kPa (WP) pressures and organic matter content (OM). These properties were used as the main criteria, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Factor Analysis were used for weighting them. Sub-criteria were scored using expert opinion and the linear score functions, such as “more is better” and “optimum value”. For determining SQI, the additive method (SQI_A), the weighted method with AHP (SQI_{AHP}), and the weighted method with factor analysis (SQI_{FA}) were used. The resulting SQI scores of the three methods were ordered as $SQI_{AHP} > SQI_A > SQI_{FA}$, but these differences were not significant. However, the SQI scores of the plots ($p \leq 0.01$) showed statistically significant differences and were ordered as $L_5 > L_4 > L_3 > L_2 > L_1$.

Key words: Factor analysis, scoring, alluvial, sedimentation

RESUMEN

El índice de calidad del suelo es un concepto de evaluación cuantitativa y se utiliza en la evaluación de los componentes del ecosistema. Debido a su potencial alto para la agricultura y la biodiversidad, los deltas son las partes más valiosas del ecosistema. Este estudio tuvo como objetivo determinar el índice de calidad del suelo (SQI) en el delta de Batumi, Georgia. Es por ello que el área de estudio se dividió en cinco parcelas con base en sus posiciones morfológicas (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 y L_5). Un total de 125 muestras de suelo se tomaron para su análisis, e incluyeron contenido de arcilla (CC), contenido de limo (SC), contenido de arena (SaC), diámetro medio ponderado (MWD), estabilidad de agregados (AS), cantidad de agua retenida de presiones por debajo de -33 kPa (FC) y -1500 kPa (WP) y contenido de materia orgánica (OM). Estas propiedades se utilizaron como criterios principales, y para ponderarlas usamos el Proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) y el Análisis de factores. Los subcriterios se calificaron de acuerdo con la opinión de expertos y con las funciones de calificación lineal, como “más es mejor” y “valor óptimo”. Para determinar el SQI, se utilizó el método aditivo (SQI_A), el método ponderado con AHP (SQI_{AHP}) y el método ponderado con análisis de factores (SQI_{FA}). Los valores resultantes de SQI de los tres métodos se ordenaron como $SQI_{AHP} > SQI_A > SQI_{FA}$, pero estas diferencias no fueron significativas. Sin embargo, los valores de SQI de las parcelas ($p \leq 0.01$) mostraron diferencias estadísticamente significativas y se ordenaron como $L_5 > L_4 > L_3 > L_2 > L_1$.

Palabras clave: análisis de factores, calificación, aluvial, sedimentación.

* Author for correspondence ♦ Autor para correspondencia.

Received: March, 2020. Approved: July, 2020.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 55: 1-18. 2021.

INTRODUCTION

Deltas are unique in terms of both their formation conditions and their high agricultural and biodiversity potential. Since the formation of the deltas is time-dependent, their morphology varies depending on the accumulation conditions. These differences in morphology cause variability in soil properties (Turgut and Ateş, 2017). The Batumi Delta with its high agricultural production potential, wetlands, and biodiversity is one of the most important areas in Georgia. Because of the great ecological and agricultural significance of the Batumi Delta, it is necessary to ensure the sustainability of this important area using the correct management practices. Therefore, the soil properties of this area should be known.

The concept of soil quality index is focused on determining the impact of land use and management practices effects on the soil quality index is accepted (de Paul Obade and Lal, 2016; Borrelli *et al.*, 2017; Leite Chaves *et al.*, 2017). However, the studies on the effects of the morphological position on the quality index of the delta are limited. Different methods are used to determine soil quality; however, no standard method is established. The model differences are mainly caused by the selection of indicators, soil properties that make up the dataset, the weighting methods of these properties, and the methods used to calculate the quality value.

Although there is no a standard model, three stages are followed in determining the soil quality index in all models (Karlen *et al.*, 2003): 1) selection of appropriate criteria, 2) scoring of the sub-criteria, and 3) development of the integrated quality index. Expert opinion and principal components analyse were used to select main criteria for a minimum data set (Sánchez-Navarro *et al.*, 2015; Vasu *et al.*, 2016); linear scoring methods were used to transform sub-criteria into unit-less scores (Nabiollahi *et al.*, 2018); and additive, weighted additive, and a hierarchical decision support systems were used for indexing.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) is a multicriteria decision-making approach introduced by Saaty (1994). Researchers preferred AHP because this method has effective mathematical properties and enables users to determine the weight of the parameters in the solution of a multi-criteria problem (Akinici *et al.*, 2013). The AHP method is

INTRODUCCIÓN

Los deltas son únicos, tanto por sus condiciones de formación como por su potencial agrícola alto y su biodiversidad. Debido a que la formación de los deltas depende del transcurso del tiempo, su morfología varía según las condiciones de acumulación. Estas diferencias morfológicas provocan variabilidad en las propiedades del suelo (Turgut y Ateş, 2017). El delta de Batumi, con su potencial de producción agrícola alto, humedales y biodiversidad, es una de las áreas más importantes de Georgia. Debido a la gran importancia ecológica y agrícola del delta de Batumi, es necesario asegurar la sostenibilidad de esta importante área utilizando las prácticas de manejo correctas. Por lo tanto, conviene conocer las propiedades del suelo de esta zona.

El concepto de índice de calidad del suelo se enfoca en determinar el impacto del uso de las tierras, y se aceptan los efectos de las prácticas de manejo sobre el índice de calidad del suelo (de Paul Obade y Lal, 2016; Borrelli *et al.*, 2017; Leite Chaves *et al.*, 2017). Sin embargo, los estudios de los efectos de la posición morfológica sobre el índice de calidad del delta son limitados. Diferentes métodos se utilizan para determinar la calidad del suelo; pero ningún método estándar está establecido. Las diferencias de modelo se deben principalmente a la selección de indicadores, las propiedades del suelo que componen el conjunto de datos, los métodos de ponderación de estas propiedades y los métodos utilizados para calcular el valor de calidad.

Aunque no existe un modelo estándar, se siguen tres etapas para determinar el índice de calidad del suelo en todos los modelos (Karlen *et al.*, 2003): 1) selección de criterios apropiados, 2) calificación de los subcriterios, y 3) desarrollo del índice de calidad integrado. Opiniones de expertos y análisis de componentes principales se utilizaron para seleccionar los criterios principales para un conjunto mínimo de datos (Sánchez-Navarro *et al.*, 2015; Vasu *et al.*, 2016); se utilizaron métodos de calificación lineal para transformar subcriterios en calificadores sin unidades (Nabiollahi *et al.*, 2018); y para la indexación se utilizaron sistemas aditivos, aditivos ponderados y de decisiones jerárquicas se utilizaron como apoyo para indexar.

El Proceso analítico jerárquico (AHP) es un enfoque multicriterio de toma de decisiones introducido por Saaty (1994). Los investigadores prefirieron el

a hierarchical model with objectives, criteria, and sub-criteria used for solving environmental problems (Akinci *et al.*, 2013; Kundu *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2017).

This study aimed to determine the soil quality index using three methods including the additive method, the weighted additive method with AHP and the weighted additive method with factor analysis, as well as to compare methods and plots within the Batumi Delta that are considered to be morphologically different. The main objective of selecting the Batumi Delta as the study area is the unique nature of this environment and its high agricultural and ecological potential.

MATERIAL AND METHODS

Description of the experimental site

The study was conducted at the Batumi Delta located in the south-western part of Georgia with an area of 3900 ha (Figure 1). The Batumi Delta has a humid subtropical climate with an annual rainfall of 2718 mm and a mean annual temperature of 14.4 °C. The elevation of the delta ranges from 0 to 50 m and the slope grade is flat. There are three mainland forms of agriculture in the delta: pasture, orchards, and truck gardens (Turgut and Ateş, 2017).

método AHP porque tiene propiedades matemáticas efectivas y permite a los usuarios determinar el peso de los parámetros en la solución de un problema multicriterio (Akinci *et al.*, 2013). El método AHP es un modelo jerárquico con objetivos, criterios y subcriterios que se utilizan para resolver problemas ambientales (Akinci *et al.*, 2013; Kundu *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2017).

Este estudio tuvo como objetivo determinar el índice de calidad del suelo utilizando tres métodos que incluyen: el método aditivo, el método aditivo ponderado con AHP y el método aditivo ponderado con análisis de factores; así como comparar métodos y parcelas dentro del delta de Batumi que se consideran morfológicamente diferentes. El objetivo principal de seleccionar el Delta de Batumi como área de estudio es la naturaleza única de este entorno y sus altos potenciales agrícola y ecológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio experimental

El estudio se realizó en el Delta de Batumi, ubicado en la parte suroeste de Georgia, en un área de 3900 ha (Figura 1). El delta de Batumi tiene un clima subtropical húmedo con una precipitación anual de 2718 mm y una temperatura media anual de

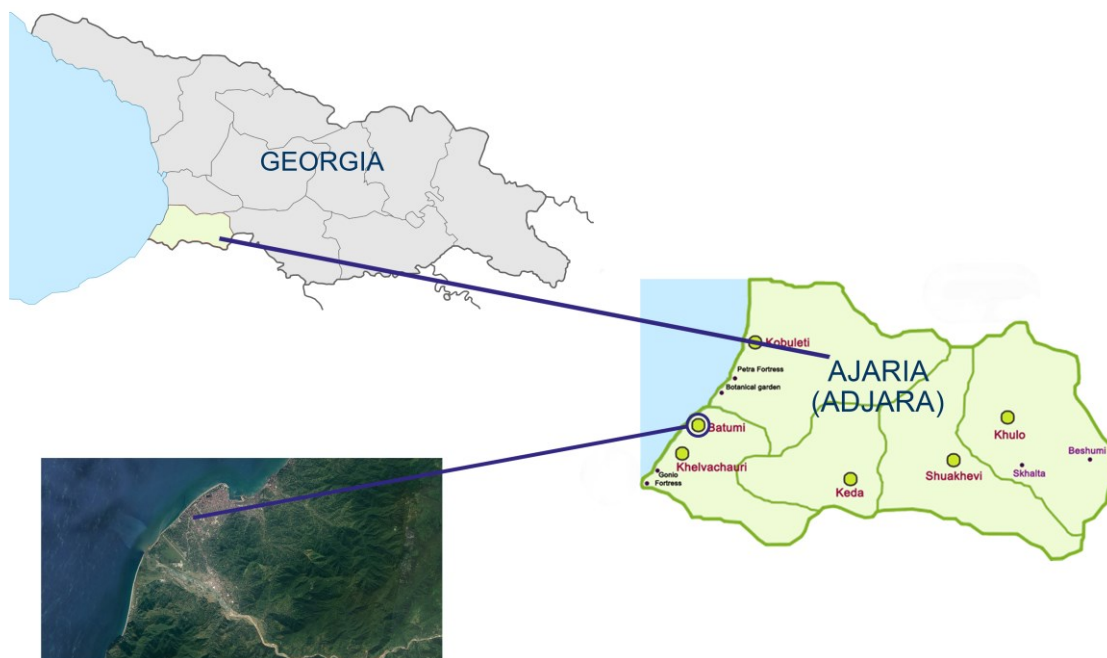


Figure 1. The geographic position of the Batumi Delta.
Figura 1. La ubicación geográfica del delta de Batumi.

Based on morphological differences, five plots were created in the Batumi Delta. The first one was located at the active delta area (L_1), the second (L_2) and third (L_3) at the lower deltaic plain, and the fourth (L_4) and fifth (L_5) plots at the upper deltaic plain (Figure 2). From each plot, 25 randomly selected soil samples were collected from the top layer (0-20 cm) using a soil auger in late spring. Since the sampling areas are homogeneous in terms of vegetation and micro-topography, an equal number of samples were taken from each area and 125 soil samples were transferred to the laboratory, air dried, and sieved with a 2 mm sieve for analysis.

In order to calculate the soil quality index (SQI), four steps were followed: 1) selection of main criteria, 2) weighting the main criteria, 3) scoring the sub-criteria, and 4) calculating SQI (Karlen *et al.*, 2003). These steps were also used in three different calculation methods: Additive Soil Quality Index (SCI_A) method, Weighted Additive Soil Quality Index Using AHP (SQI_{AHP}) method, and Weighted Additive Soil Quality Index Using Factor Analysis (SQI_{FA}) method.

Selection of the main criteria

Soil quality indicators should be sensitive to various management practices, climatic conditions, and external change (natural or anthropogenic) (Doran and Parkin, 1996). The variance analysis results of Turgut and Ateş (2017) were used to determine the main criteria that are sensitive properties to the

14.4 °C. La elevación del delta varía de 0 a 50 m, y la pendiente es plana. Hay tres formas de agricultura continental en el delta: pastos, huertos productivos y huertos pequeños para venta en mercados sobre ruedas (Turgut y Ateş, 2017).

Con base en diferencias morfológicas, se establecieron cinco parcelas en el Delta de Batumi. La primera se ubicó en el área activa del delta (L_1), la segunda (L_2) y la tercera (L_3) en la llanura deltaica inferior, y la cuarta (L_4) y quinta (L_5) en la llanura deltaica superior (Figura 2). De cada parcela, se recolectaron 25 muestras de suelo, seleccionadas al azar, de la capa superior (0-20 cm), con una barrena de suelo, a fines de la primavera. Porque las áreas de muestreo son homogéneas en cuanto a vegetación y microtopografía, se tomaron cantidades iguales de muestras de cada área y 125 muestras de suelo se llevaron al laboratorio, se secaron al aire y se pasaron por un tamiz de 2 mm para su análisis.

Métodos de evaluación de la calidad del suelo

Para calcular el índice de calidad del suelo (SQI), se siguieron cuatro pasos: 1) selección de los criterios principales, 2) ponderación de los criterios principales, 3) calificación de los subcriterios, y 4) cálculo del SQI (Karlen *et al.*, 2003). Estos pasos también se utilizaron en tres métodos de cálculo diferentes: método aditivo del índice de calidad del suelo (SCI_A), índice aditivo ponderado de calidad del suelo por el método AHP (SQI_{AHP}) e índice aditivo ponderado de calidad del suelo por el método de análisis de factores (SQI_{FA}).

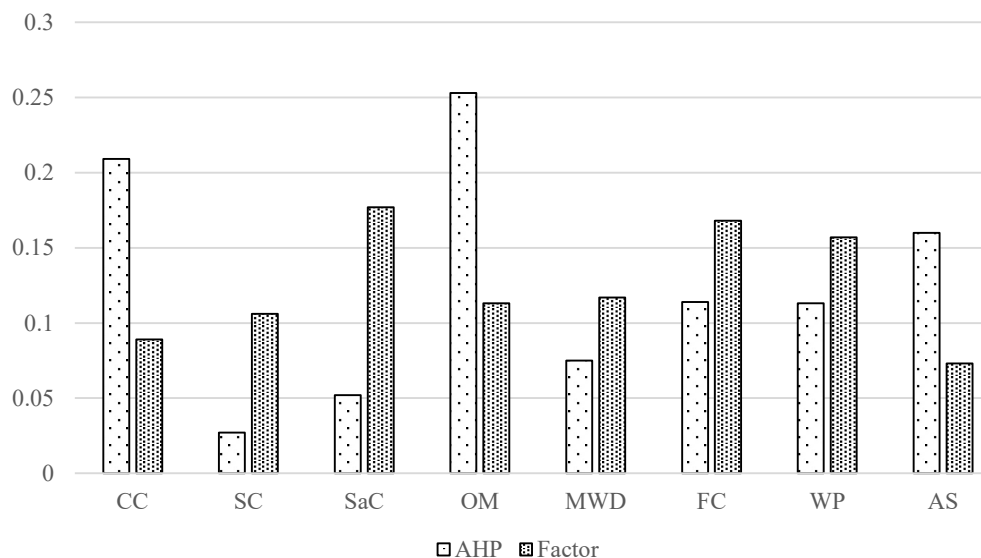


Figure 2. Weighting scores of main criteria obtained from AHP and Factor Analyse methods.

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point.

Figure 2. Ponderación de los criterios principales obtenidos con los métodos AHP y Análisis de factores.

CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

management practice and topographic position. According to the analysis results, the soil properties selected as main criteria are: clay content (CC), silt content (SC), sand content (SaC), mean weight diameter (MWD), aggregate stability (AS), field capacity (FC), wilting point (WP), and organic matter content (OM).

Weighting the main criteria

A pairwise comparison matrix was created to determine the weights of the main criteria according to the AHP methodology. The judgments in the pairwise comparison matrix (relative levels of importance of the parameters) were determined by consulting the opinions of agronomists and faculty members at the Departments of Soil Science and Plant Nutrition, Agriculture Faculties of Atatürk University, Ordu University, and Samsun 19 Mayıs University. The weight values for each main criterion were derived from the ratio of communality to the sum of communalities (Johnson and Wichern, 1992).

Scoring the sub-criteria

Sub-criteria were scored within the range of 0-1 according to an expert's opinion in the SQI_{AHP} method. In this scoring, the effect of sub-criteria on soil productivity was taken into consideration. Lower points were given to the sub-criteria that negatively affect soil productivity, while higher points were given to those that have a positive effect(s) on the soil productivity.

Sub-criteria were scored using the linear score functions "more is better" and "optimum value" in the SQI_{FA} . These scoring functions were obtained by modifying a standard function (Guo *et al.*, 2017). The "optimum value" function was used for scaling the particle size distribution, while the "more is better" function was used for MWD, OM, AS, FC, and WP. The 30% -35% range for each fraction was considered the optimum value (Table 1).

Calculating SQI

Selected criteria were combined in the SQI_A (Eq.2), SQI_{AHP} and SQI_{FA} methods (Eq. 3).

$$SQI_A = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k n_j \quad 2$$

where k is the number of criteria, j is criteria, and n is criteria scores.

$$SQI_{AHP\&FA} = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad 3$$

Selección de los criterios principales

Los indicadores de calidad del suelo deben ser sensibles a prácticas de manejo diversas, y a una variedad de condiciones climáticas y cambios externos (naturales o antropogénicos) (Doran y Parkin, 1996). Los resultados del análisis de varianza de Turgut y Ateş (2017) se utilizaron para determinar los criterios principales que derivan de las propiedades que son sensibles a la práctica de manejo y a la posición topográfica. De acuerdo con los resultados del análisis, las propiedades del suelo seleccionadas como criterios principales son: contenido de arcilla (CC), contenido de limo (SC), contenido de arena (SaC), diámetro medio ponderado (MWD), estabilidad de agregados (AS), capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (WP) y contenido de materia orgánica (OM).

Ponderación de los criterios principales

Una matriz de comparación por pares se creó para determinar los valores de ponderación de los criterios principales según la metodología AHP. Los juicios en la matriz de comparación por pares (niveles relativos de importancia de los parámetros) se determinaron consultando las opiniones de agrónomos y profesores de los Departments of Soil Science and Plant Nutrition, Agriculture Faculties of Atatürk University, Ordu University, and Samsun 19 Mayıs University. Los valores de ponderación para cada criterio principal se derivaron de la relación de comunalidad a la suma de comunalidades (Johnson y Wichern, 1992).

Calificación de los subcriterios

Los subcriterios se calificaron dentro del intervalo de 0-1 de acuerdo con la opinión de un experto en el método SQI_{AHP} . En esta calificación, se tomó en consideración el efecto de los subcriterios en la productividad del suelo. Valores más bajos se otorgaron a los subcriterios que afectan negativamente la productividad del suelo, mientras que los valores más altos se dieron a aquellos subcriterios que tienen un efecto(s) positivo en dicha productividad.

Los subcriterios se calificaron con las funciones de calificación lineales "más es mejor" y "valor óptimo" en el SQI_{FA} . Estas funciones de calificación se obtuvieron al modificar una función estándar (Guo *et al.*, 2017). La función "valor óptimo" se utilizó para aumentar la distribución del tamaño de partículas, mientras que la función "más es mejor" se usó para MWD, OM, AS, FC y WP. El intervalo de 30 - 35% para cada fracción se consideró el valor óptimo (Cuadro 1).

Table 1. The scoring functions and parameters for sub-criteria in the SQI_{FA} method.
Cuadro 1. Las funciones de calificación y los parámetros para los subcriterios en el método SQI_{FA}.

| Sub-criteria | Function type | x_1 | r_1 | r_2 | x_2 | |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|---|
| CC | Optimal range | 1.47 | 30.00 | 35.00 | 29.34 | $f(x) = \left\{ 0.9 \times \frac{x - x_1}{r_1 - x_1} + 0.1 \right\};$ |
| SC | | 4.90 | 30.00 | 35.00 | 53.41 | $x_1 \leq x \leq x_2$ |
| SaC | | 36.04 | 30.00 | 35.00 | 92.11 | $f(x) = \{1\}; r_1 \leq x \leq r_2$ |
| | | | | | | $f(x) = \left\{ 1 - 0.65 \times \frac{x - r_1}{x_2 - r_1} \right\};$ |
| | | | | | | $r_2 \leq x \leq x_2$ |
| MWD | More is better | 0.26 | | | 1.02 | $f(x) = \left\{ 0.9 \times \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + 0.1 \right\};$ |
| OM | | 0.37 | | | 5.63 | $x_1 \leq x \leq x_2$ |
| AS | | 32.88 | | | 95.46 | |
| FC | | 5.29 | | | 57.10 | |
| WP | | 2.92 | | | 49.32 | |

X: measured value of the sub-criteria; x_1 and x_2 : minimum and maximum values of the sub-criteria, respectively; r_1 and r_2 : lower and the upper values of the optimal range, respectively. CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point. ♦ X: Valor medido de los subcriterios; x_1 y x_2 : Valores mínimo y máximo de los subcriterios, respectivamente; r_1 y r_2 : Valores inferior y superior del intervalo óptimo, respectivamente. CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

where n is the number of the main criteria, W_i and S_i are, respectively, the weighting of main criteria and the score of the i^{th} sub-criterion.

Statistical analysis

The ArcGIS software was used to digitize the work area and create a digital elevation model. One-way analysis of variance with post hoc Tukey test was used to determine the effect of topographic position on soil properties. Correlation analysis was used to identify relationships between soil properties. Soil properties were evaluated by factor analysis to determine the weights. All data were analyzed using XLSTAT Ecology (22.1.1).

RESULTS AND DISCUSSION

Main criteria

The clay content (CC), silt content (SC), sand content (SaC), organic matter content (OM), mean weight diameter (MWD), aggregate stability (AS),

Cálculo del SQI

Los criterios seleccionados se combinaron en los métodos SQI_A (Ec. 2), SQI_{AHP} y SQI_{FA} (Ec. 3).

$$SQI_A = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k n_j \tag{2}$$

donde k es el número de criterios, j es el criterio y n es la calificación de los criterios.

$$SQI_{AHP\&FA} = \sum_{i=1}^n W_i S_i \tag{3}$$

donde n es el número de los criterios principales, W_i y S_i son la ponderación de los criterios principales y la calificación del i -ésimo subcriterio, respectivamente.

Análisis estadístico

El software ArcGIS se utilizó para digitalizar el área de trabajo y crear un modelo de elevación digital. Un análisis de varianza

field capacity (FC), and wilting point (WP) were used as main criteria to evaluate the soil quality in the Batumi Delta. Most of these criteria are sensitive to morphological positions studied by Turgut and Ateş (2017). In addition, they could reflect sustainable management goals and specific soil structural conditions and show differences due to land management (Doran and Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 2003). The soil properties selected as criteria in this study reflect the abovementioned conditions. The soil textures were sandy loam in the L₁, L₂, L₃, and L₄ plots, while it was a loam soil in L₅. The CC ranged from 5.07% for L₁ to 13.32% for L₅; SC ranged from 25.73% for L₂ to 34.91% for L₅; SaC ranged from 51.13% for L₅ to 67.91% for L₁. The maximum OM and AS were observed in L₂, the maximum MWD, FC, and WP were found in the L₅ plot. While, the minimum OM, MWD, AS, FC, and WP were found in L₁. The variation in the L₁ plot was higher than other plots for all main criteria, as reflected by the highest CV value (Table 2).

Weighting main criteria with AHP

The Pairwise comparison matrix, created for weighting each criterion, showed that OM had the highest weight value and SC had the lowest weight value (Table 3). The consistency ratio of the pairwise comparison judgments was calculated as 0.0242, which was below 0.10 and indicates that the judgment matrix had satisfactory consistency and could be used without any adjustment (Saaty, 1994). Equation 4 was used for the consistency ratio.

unidireccional se utilizó junto con la prueba de Tukey para determinar el efecto de la posición topográfica en las propiedades del suelo. Un análisis de correlación se utilizó para identificar las relaciones entre las propiedades del suelo. Las propiedades del suelo se evaluaron por medio de un análisis de factores para determinar los valores de ponderación. Todos los datos se analizaron con XLSTAT Ecology (22.1.1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Criterios principales

Como criterios principales para evaluar la calidad del suelo en el delta de Batumi, se utilizaron: el contenido de arcilla (CC), contenido de limo (SC), contenido de arena (SaC), contenido de materia orgánica (OM), diámetro medio ponderado (MWD), estabilidad de los agregados (AS), capacidad de campo (FC) y punto de marchitez permanente (WP). Casi todos estos criterios son sensibles a las posiciones morfológicas estudiadas por Turgut y Ateş (2017); Además, podían reflejar objetivos de manejo sostenible y condiciones estructurales específicas del suelo, como también mostrar diferencias debido al manejo de las tierras (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 2003). Las propiedades del suelo seleccionadas como criterios en este estudio reflejan las condiciones antes mencionadas.

Las texturas del suelo fueron franco arenoso en las parcelas L₁, L₂, L₃ y L₄, mientras que en L₅ fue franco. El CC osciló entre 5.07% para L₁ y 13.32% para L₅; SC varió de 25.73% para L₂ a 34.91% para L₅; el SaC osciló entre 51.13% para L₅ y 67.91% para

Table 2. Descriptive statistics of main criteria.
Cuadro 2. Estadística descriptiva de los criterios principales.

| Main criteria | Plots | | | | | CV (%) |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| | L ₁ | L ₂ | L ₃ | L ₄ | L ₅ | |
| CC (%) | 5.07± 2.80 | 6.58±3.09 | 9.37±4.14 | 10.27±5.03 | 13.32±4.27 | 53.01 |
| SC (%) | 27.00±14.93 | 25.73±4.88 | 31.18±6.63 | 26.79±5.90 | 34.91±6.12 | 28.36 |
| SaC (%) | 67.91±17.29 | 67.67±6.67 | 57.98±8.32 | 62.40±10.18 | 51.13±6.84 | 17.54 |
| OM (%) | 0.98± 0.39 | 3.31±1.02 | 2.59±0.99 | 3.10±1.25 | 2.64±0.89 | 36.96 |
| MWD (mm) | 0.35± 0.06 | 0.56±0.07 | 0.65±0.13 | 0.77±0.12 | 0.82±0.08 | 15.47 |
| AS (%) | 64.98±11.96 | 90.83±3.19 | 88.72±5.62 | 87.99±3.89 | 83.70±4.70 | 7.50 |
| FC (%) | 17.47±7.25 | 27.74±5.74 | 32.98±4.92 | 35.59±7.55 | 35.60±4.30 | 21.11 |
| WP (%) | 13.06±7.94 | 19.20±4.26 | 25.30±5.15 | 27.98±7.30 | 28.62±4.86 | 27.23 |

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point. ♦ CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

Table 3. Pairwise comparison matrix.
Cuadro 3. Matriz de comparación por pares.

| Criteria | CC | SC | SaC | MWD | AS | OM | WP | FC | Weights |
|----------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| CC | 1 | 7 | 4 | 3 | 2 | 1/2 | 2 | 2 | 0.209 |
| SC | 1/7 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/6 | 1/8 | 1/4 | 1/5 | 0.027 |
| SaC | 1/4 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/2 | 1/2 | 0.052 |
| MWD | 1/3 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 0.075 |
| AS | 1/2 | 6 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 2 | 2 | 0.160 |
| OM | 2 | 8 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.253 |
| WP | 1/2 | 4 | 2 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 0.113 |
| FC | 1/2 | 5 | 2 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 0.114 |

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC-Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point.
 ♦ CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad 4$$

where *CR* is consistency ratio, *CI* is consistency index and was calculated by Equation 5, and *RI* is the random index and was obtained from Saaty's random indexes as 1.41.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad 5$$

where λ_{max} is maximum eigenvalue, which was calculated with a pairwise comparison matrix as 0.0338, and *n* is the number of criteria (8).

Weighting criteria with Factor Analysis

According to the factor pattern of the criteria, the eigenvalue of the first two factors was higher than 1.0 and the cumulative variance proportion was 71.30%. The highly weighted variables of each factor were CC, SaC, MWD, FC and WP in F1; and SC, OM and AS in F2. Five highly weighted variables in F1 explained 51.23% of the variation and were strongly correlated with each other. In F2, three highly weighted variables explained 20.06% of the variation (Table 4).

The correlation analysis showed that the clay content (CC) was positively correlated with SC, MWD, FC, and WP but negatively correlated with

L_1 . Los valores máximos de OM y AS se observaron en L_2 ; los valores máximos de MWD, FC y WP se encontraron en L_5 . Mientras que los valores mínimos de OM, MWD, AS, FC y WP se encontraron en L_1 . La variación en la parcela L_1 fue mayor que en otras para todos los criterios principales, como se refleja en el valor más alto de CV (Cuadro 2).

Ponderación de los criterios principales con AHP

La matriz de comparación por pares, creada para ponderar cada criterio, mostró que OM tuvo el valor de ponderación más alto y SC tuvo el valor de ponderación más bajo (Cuadro 3). La razón de consistencia de las decisiones por comparación entre pares se calculó como 0.0242, lo cual estuvo por debajo de 0.10 e indicó que la matriz de juicio tuvo una consistencia satisfactoria y podía usarse sin ningún ajuste (Saaty, 1994). La ecuación 4 se utilizó para la relación de consistencia.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad 4$$

donde *CR* es la razón de consistencia, *CI* es el índice de consistencia, calculado con la Ecuación 5; y *RI* es el índice aleatorio y se obtuvo de los índices aleatorios de Saaty como 1.41.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad 5$$

Table 4. The factor pattern of the criteria.
Cuadro 4. El patrón de factores en los criterios.

| Criteria | F1 | F2 |
|-----------------|--------|--------|
| CC | 0.666 | -0.244 |
| SC | 0.519 | -0.574 |
| SaC | -0.749 | 0.663 |
| MWD | 0.784 | 0.214 |
| AS | 0.367 | 0.526 |
| OM | 0.516 | 0.609 |
| FC | 0.951 | 0.219 |
| WP | 0.935 | 0.107 |
| Eigenvalue | 4.099 | 1.605 |
| Variability (%) | 51.237 | 20.066 |
| Cumulative % | 51.237 | 71.303 |

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point. ♦ CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: Materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

SaC. There was a positive correlation of SC with FC and WP, but the correlation was negative between SC and SaC. The correlation was negative between SaC with MWD, FC, and WP. There was a positive correlation of OM with MWD, FC, WP, and AS, as well as of MWD with FC, WP, and AS. Finally, FC and WP were positively correlated with AS (Table 5).

Communalities estimate the proportion of the variance in each variable that is explained by the components, and a high communality value suggests that a high portion of variance is explained by the factor (Johnson and Wichern, 1992). Because eigenvalue of factor1 and factor2 were higher than 1 in principle component analysis, they were used to calculate the weight of criteria. Based on communality analysis (Table 6), SC had the highest weight (0.177) and AS the lowest (0.073).

The weights of criteria calculated with AHP and FA showed differences. The weights of CC, OM and AS in AHP were higher than those calculated by FA, while the weights of SC, SaC, MWD, FC and WP were higher in the FA (Figure 2). In other words, experts evaluated OM and CC as the most important criteria affecting the SQI, but FA evaluated SaC, FC, and WP as the most important criteria. The calculating process may explain the main reason

donde l_{max} es el vector propio (eigenvalor) máximo, el cual se calculó como 0.0338 con una matriz de comparación por pares, y n es el número de criterios (8).

Criterios de ponderación con análisis de factores

De acuerdo con el patrón de factores de los criterios, el vector propio de los dos primeros factores fue superior a 1.0 y la proporción de varianza acumulada fue de 71.30%. Las variables con valor ponderado alto de cada factor fueron CC, SaC, MWD, FC y WP en F_1 ; y SC, OM y AS en F_2 . Cinco variables con valor ponderado alto en F_1 explicaron el 51.23% de la variación y presentaron correlación fuerte entre sí. A su vez, tres variables con valores ponderados altos en F_2 explicaron el 20.06% de la variación (Cuadro 4).

El análisis de correlación mostró que el contenido de arcilla (CC) se correlacionó positivamente con SC, MWD, FC y WP, pero negativamente con SaC. Hubo una correlación positiva de SC con FC y WP, pero la correlación fue negativa entre SC y SaC. La correlación fue negativa entre SaC con MWD, FC y WP. Hubo una correlación positiva de OM con MWD, FC, WP y AS, así como de MWD con FC, WP y AS. Por último, FC y WP se correlacionaron positivamente con AS (Cuadro 5).

Las comunalidades estiman la proporción de la varianza en cada variable, lo cual se explica por los componentes, y un valor de comunalidad alto indica que una gran parte de la varianza se explica por el factor (Johnson y Wichern, 1992).

Debido a que los vectores propios del factor1 y el factor2 fueron superiores a 1 en el análisis de los componentes principales, se utilizaron para calcular el valor de ponderación de los criterios. Según el análisis de comunalidad (Cuadro 6), SC tuvo el valor mayor (0.177) y AS el valor más bajo (0.073).

Los valores de ponderación de los criterios calculados con AHP y FA mostraron diferencias. Los valores de ponderación de CC, OM y AS en AHP fueron superiores a los calculados por FA. Mientras que los de SC, SaC, MWD, FC y WP fueron mayores en FA (Figura 2). En otras palabras, los expertos evaluaron OM y CC como los criterios más importantes que afectan al SQI, pero con FA se evaluó a SaC, FC y WP como los criterios más importantes. El proceso de cálculo puede explicar la razón principal de esta diferencia. En forma similar a nuestros resulta-

Table 5. Pearson correlation coefficients for the main criteria.
Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson para los criterios principales.

| Variables | CC | SC | SaC | OM | MWD | FC | WP | AS |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----|
| CC | 1 | | | | | | | |
| SC | 0.3398 a 0.0001 b | 1 | | | | | | |
| SaC | -0.7163 a 0.0000 b | -0.8996 a 0.0000 b | 1 | | | | | |
| OM | 0.0789 a 0.3815 b | -0.0219 a 0.8087 b | -0.0205 a 0.8208b | 1 | | | | |
| MWD | 0.6979 a 0.0000 b | 0.1518 a 0.0910 b | -0.4366 a 0.0000 b | 0.4749 a 0.0000 b | 1 | | | |
| FC | 0.5444 a 0.0000 b | 0.4093 a 0.0000 b | -0.5564 a 0.0000 b | 0.6334 a 0.0000 b | 0.7573 a 0.0000 b | 1 | | |
| WP | 0.5730 a 0.0000 b | 0.4596 a 0.0000 b | -0.6070 a 0.0000 b | 0.5761 a 0.0000 b | 0.7460 a 0.0000 b | 0.9633 a 0.0000 b | 1 | |
| AS | 0.0664 a 0.4617 b | -0.0768 a 0.3946 b | 0.0261 a 0.7727 b | 0.5862 a 0.0000 b | 0.4215 a 0.0000 b | 0.4544 a 0.0000 b | 0.3268 a 0.0002 b | 1 |

Values in bold are different from 0 with (p=0.05); a: means correlation ecoefficiency; b: means significant probability. CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point. ♦ Los valores en negrita son diferentes de 0 con (p=0.05); a: coeficiente de correlación de los valores medios; b: probabilidad significativa de los valores medios. CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

for this difference. Similar to our results, Liu *et al.* (2017) found that weighting values produced different results between AHP and FA methods. The

Table 6. Estimated communality and weight values of each main criteria.

Cuadro 6. Valores de comunalidad y ponderación estimados para cada criterio principal.

| Criteria | Communality | Weight |
|----------|-------------|--------|
| CC | 0.503 | 0.089 |
| SC | 0.598 | 0.106 |
| SaC | 1.000 | 0.177 |
| MWD | 0.661 | 0.117 |
| AS | 0.411 | 0.073 |
| OM | 0.637 | 0.113 |
| FC | 0.952 | 0.168 |
| WP | 0.886 | 0.157 |

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC-Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point. ♦ CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

dos, Liu *et al.* (2017) descubrieron que los valores de ponderación producían resultados diferentes entre los métodos AHP y FA. La consistencia del valor de ponderación solo se puede probar con el método AHP. Por esta razón, esto debe tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el método.

Calificación de subcriterios con AHP

La calificación se realizó a través de las opiniones de los expertos que consideraron los efectos de los subcriterios, lo cual constituyó las unidades de medida de los criterios principales para la fertilidad del suelo. La escala 0-1 se utilizó para la calificación. El intervalo de 30-35% de CC, SC y SaC se consideró el intervalo óptimo para la productividad del suelo, y recibió un valor de 1. Mientras que los valores por debajo y por encima de este intervalo se calificaron gradualmente con valores más bajos, ya que podrían tener un efecto negativo en la fertilidad del suelo. Otros subcriterios se evaluaron al considerar los valores mínimos y máximos en el conjunto de datos.

La calificación mínima se otorgó al valor mínimo de los subcriterios, mientras que los valores restantes

consistency of the weighting value can be tested only in the AHP method. For this reason, this should be taken into account for selecting the method.

Scoring sub-criteria with AHP

Scoring was done by experts' opinion considering the effects of sub-criteria, which constitute the measurement units of the main-criteria for soil fertility. The 0-1 scale was used for scoring, the 30-35% range of CC, SC, and SaC that considered the optimum range for soil productivity was given a value of 1, whereas the values below and above of this range were scored gradually lower since it might have a negative effect on soil fertility. Other sub-criteria were scored considering the minimum and maximum values in the dataset. The minimum score was given to the minimum value of sub-criteria, while the remaining values were increased gradually with value ranges (Table 7).

Scoring sub-criteria with linear score functions

The "optimum value" function was used for the CC, SC, and SaC, where the value of 1 was given for the range of 30-35%. Since there is no value greater than 30% in the clay content, a linearly increasing plot is obtained in the range of 0-1. In contrast to the clay content, there is no value below 35% in the sand content, and a linearly decreasing graph is produced. In the silt content, the score increased to the optimum range (30-35%) and decreased afterwards. In this research, the "more is better" function was applied to OM, MWD, FC, WP, and AS (Figure 3).

Additive soil quality index (SQI_A)

The SQI_A increased in the order of L₁ (0.359) < L₂ (0.564) < L₃ (0.625) < L₄ (0.649) < L₅ (0.681) (Figure 4). The lowest SQI_A score was observed in the active delta wherein L₁ is the nearest plot to the sea. The SQI_A scores gradually increased as the plots' distance from the sea increased, reaching the delta's initial formation zone where the highest value was in the L₅ plots. The ANOVA test showed that the differences between the SQI_A of the plots were statistically significant (Table 8). The CC was the limiting criteria for all plots (Figure 5).

se incrementaron gradualmente con los intervalos de valores (Cuadro 7).

Calificación de los subcriterios con funciones de calificación lineal

La función de "valor óptimo" se utilizó para CC, SC y SaC, donde se dio el valor de 1 para el intervalo de 30-35%. Dado que no existe un valor superior a 30%, en el contenido de arcilla se obtuvo una gráfica de incremento lineal en el intervalo de 0-1. En contraste con el contenido de arcilla, no existe un valor por debajo del 35% en el contenido de arena; y se generó entonces una gráfica lineal decreciente. En el contenido de limo, la calificación aumentó hasta el intervalo óptimo (30-35%) y luego disminuyó. En esta investigación, la función "más es mejor" se aplicó para OM, MWD, FC, WP y AS (Figura 3).

Índice aditivo de calidad del suelo (SQI_A)

El SQI_A aumentó en el orden de L₁ (0.359) < L₂ (0.564) < L₃ (0.625) < L₄ (0.649) < L₅ (0.681) (Figura 4). La calificación más baja de SQI_A se observó en el delta activo, donde L₁ es la parcela más cercana al mar. Las calificaciones SQI_A aumentaron gradualmente a medida que aumentaba la distancia de las parcelas al mar, hasta la zona de formación inicial del delta donde el valor más alto se alcanzó en las parcelas L₅. La prueba de ANDEVA mostró que las diferencias entre los SQI_A de las parcelas fueron estadísticamente significativas (Cuadro 8). El CC fue el criterio limitante para todas las parcelas (Figura 5).

Índice ponderado de calidad del suelo por AHP (SQI_{AHP})

Los valores obtenidos del SQI_{AHP} en las parcelas fueron 0.312, 0.540, 0.576, 0.614 y 0.619 para L₁, L₂, L₃, L₄ y L₅, respectivamente (Figura 6). El SQI_{AHP} más bajo se calculó en el delta activo (L₁) y los valores aumentaron gradualmente hasta alcanzar el valor más alto en la parcela L₅. Los resultados del ANDEVA mostraron que las diferencias en los valores de SQI_{AHP} entre las parcelas fueron estadísticamente significativas (Cuadro 9). SaC y MWD fueron los criterios limitantes para el SQI_{AHP} en todas las parcelas (Figura 7).

Table 7. The scores of the sub-criteria.
Cuadro 7. Calificaciones de los subcriterios.

| Main criteria | Sub-criteria | Score | Main criteria | Sub-criteria | Score | |
|---------------|--------------|------------|---------------|---------------|------------|-----|
| CC | <10% | 0.1 | MWD | <0.125mm | 0.1 | |
| | 10-15% | 0.3 | | 0.125-0.250mm | 0.3 | |
| | 15-20% | 0.4 | | 0.25-0.50mm | 0.5 | |
| | 20-25% | 0.5 | | 0.50-0.75mm | 0.7 | |
| | 25-30% | 0.7 | | 0.75-1.00mm | 0.9 | |
| | 30-35% | 1 | | >1mm | 1 | |
| | 35-40% | 0.9 | | OM | 0.70-1.00% | 0.1 |
| | 40-45% | 0.7 | | | 1.00-1.70% | 0.3 |
| 45-50% | 0.3 | 1.70-3.00% | 0.5 | | | |
| >50% | 0.1 | 3.00-5.15% | 0.8 | | | |
| SC | <10% | 0.1 | AS | >5.15% | 1 | |
| | 10-15% | 0.3 | | <50% | 0.1 | |
| | 15-20% | 0.4 | | 50-60% | 0.3 | |
| | 20-25% | 0.5 | | 60-70% | 0.5 | |
| | 25-30% | 0.7 | | 70-80% | 0.7 | |
| | 30-35% | 1 | | 80-90% | 0.9 | |
| | 35-40% | 0.9 | | 90-100% | 1 | |
| | 40-45% | 0.7 | | <%2 | 0.1 | |
| 45-50% | 0.3 | %2-4 | 0.3 | | | |
| SaC | >50% | 0.1 | WP | %4-6 | 0.5 | |
| | <10% | 0.1 | | %6-8 | 0.8 | |
| | 10-15% | 0.3 | | >%8 | 1 | |
| | 15-20% | 0.4 | | <%5 | 0.1 | |
| | 20-25% | 0.5 | | %5-10 | 0.3 | |
| | 25-30% | 0.7 | | %10-15 | 0.5 | |
| | 30-35% | 1 | | %15-20 | 0.8 | |
| | 35-40% | 0.9 | | %20-25 | 0.9 | |
| 40-45% | 0.7 | >%25 | 1 | | | |
| 45-50% | 0.3 | | | | | |
| >50% | 0.1 | | | | | |

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point. ♦ CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

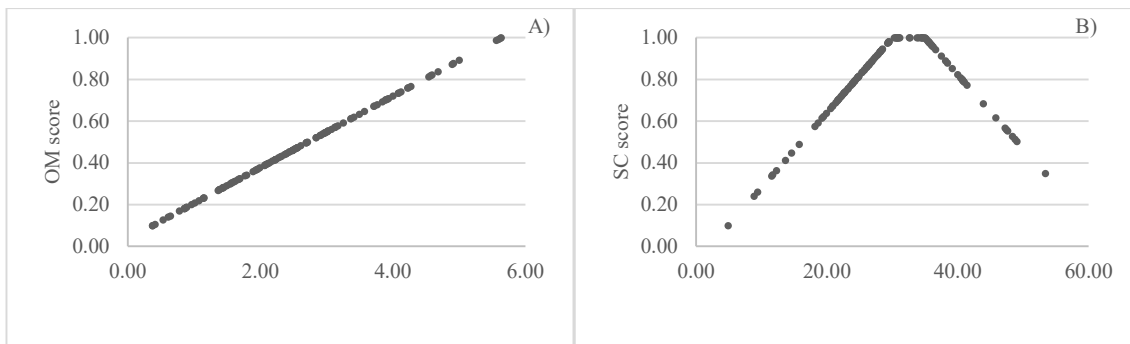


Figure 3. The score examples for “more is better” (organic matter content, A) and “optimum range” (silt content, B).
Figure 3. Los ejemplos de calificación para “más es mejor” (contenido de materia orgánica, A) e “intervalo óptimo” (contenido de limo, B).

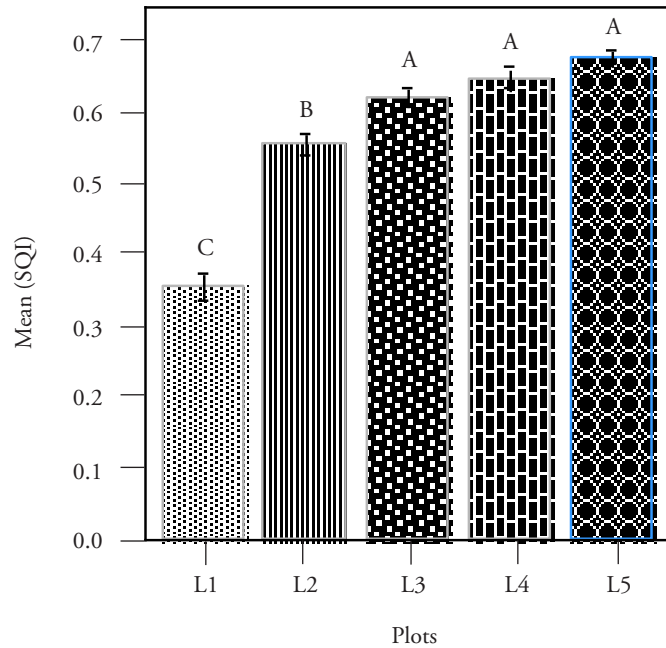


Figure 4. Mean value of SQI in five plots.

Columns with different letters are statistically different (Tukey; $p \leq 0.01$).

Figure 4. Valor medio de SQI en cinco parcelas.

Las columnas con letras diferentes indican diferencia significativa (Tukey; $p \leq 0.01$).

Table 8. Analysis of variance for SQI_A .
Cuadro 8. Análisis de varianza para SQI_A .

| Sources | Degree of freedom | Sum of squares | Mean squares | F ratio | Prob>F |
|---------|-------------------|----------------|--------------|---------|---------|
| Model | 4 | 1.65 | 0.41 | 75.96 | <0.0001 |
| Error | 120 | 0.65 | 0.01 | | |
| Total | 124 | 2.30 | | | |

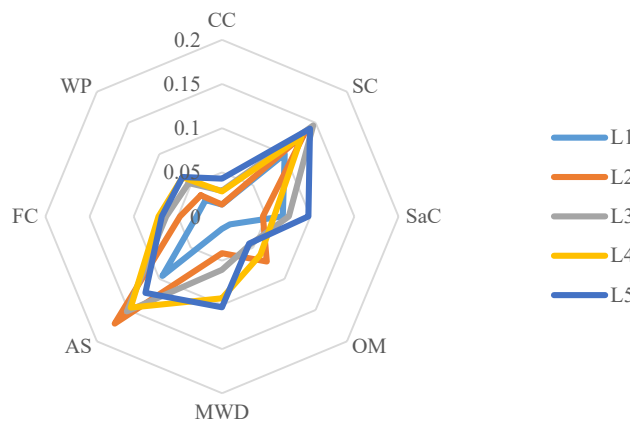


Figure 5. Radar plot of limiting criteria in SQI_A .

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point.

Figura 5. Gráfico de radar de los criterios limitantes en SQI_A .

CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

Weighted soil quality index using AHP (SQI_{AHP})

The calculated SQI_{AHP} scores across the plots were 0.312, 0.540, 0.576, 0.614 and 0.619 for L₁, L₂, L₃, L₄, and L₅, respectively (Figure 6). The lowest SQI_{AHP} was calculated in the active delta (L₁), and the values increased gradually until they reached the highest value in the L₅ plot. The results of ANOVA showed that the differences in SQI_{AHP} values across the plots were statistically significant (Table 9). SaC and MWD were the limiting criteria for the SQI_{AHP} in all plots (Figure 7).

Índice ponderado de calidad del suelo por medio de análisis de factores (SQI_{FA})

Los valores de SQI_{FA} difirieron significativamente entre las parcelas (Cuadro 10). Los resultados de SQI_{FA} en las parcelas L₃, L₄ y L₅ fueron significativamente mayores que en L₂ y L₁, mientras que el SQI_{FA} en la parcela L₁ fue significativamente menor que en L₂ (Figura 8). En forma similar a los SQI_{AHP} los valores de SQI_{FA} aumentaron gradualmente desde el mar hacia la montaña. Los criterios limitantes en este método fueron CC y OM (Figura 9).

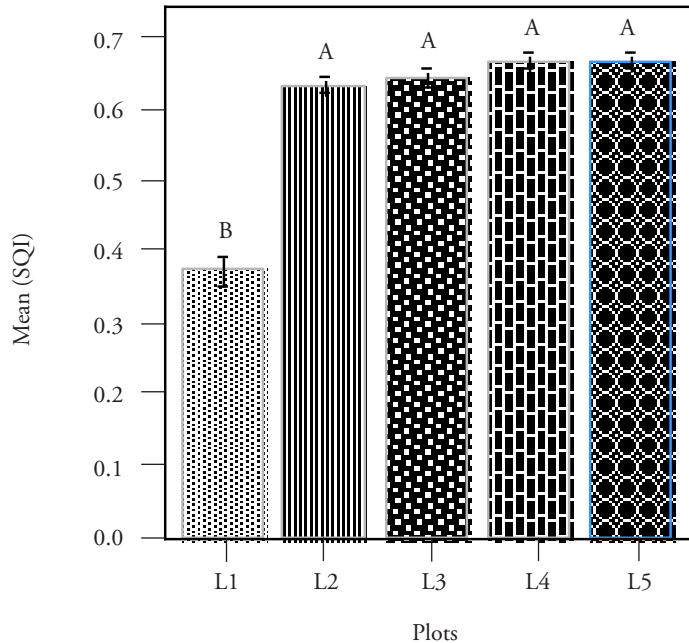


Figure 6. Mean values of SQI_{AHP} in five plots.

Columns with different letters are statistically significant (Tukey; p≤0.01).

Figure 6. Valores medios de SQI_{AHP} en cinco parcelas.

Las columnas con letras diferentes indican diferencia significativa (Tukey; p≤0.01).

Table 9. Analysis of variance for SQI_{AHP}
Cuadro 9. Análisis de varianza para SQI_{AHP}

| Sources | Degree of freedom | Sum of squares | Mean squares | F ratio | Prob>F |
|---------|-------------------|----------------|--------------|---------|---------|
| Model | 4 | 1.57 | 0.39 | 81.99 | <0.0001 |
| Error | 120 | 0.58 | 0.01 | | |
| Total | 124 | 2.15 | | | |

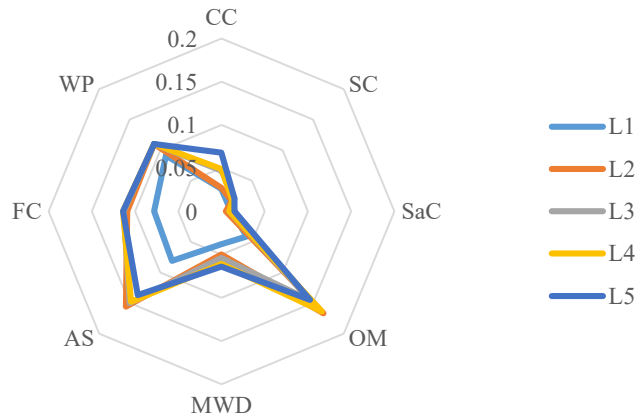


Figure 7. Radar plot of limiting criteria in SQI_{AHP}

CC: Clay content; SC: Silt content; SaC: Sand content; OM: Organic matter; MWD: Mean weight diameter; AS: Aggregate stability; FC: Field capacity; WP: Wilting point.

Figure 7. Gráfico de radar de los criterios limitantes en SQI_{AHP}

CC: contenido de arcilla; SC: contenido de limo; SaC: contenido de arena; OM: materia orgánica; MWD: diámetro medio ponderado; AS: estabilidad de los agregados; FC: capacidad de campo; WP: punto de marchitez permanente.

Weighted soil quality index using factor analysis (SQI_{FA})

The SQI_{FA} values differed significantly among the plots (Table 10). The results showed that the SQI_{FA} in the L₃, L₄, and L₅ plots were significantly higher than L₂ and L₁, while the SQI_{FA} in the L₁ plot was significantly lower than that in L₂ (Figure 8). Similar to the SQI_{AHP}, the SQI_{FA} score increased gradually from the sea toward the mountain. The limiting criteria in this method were CC and OM (Figure 9).

The evaluation methods showed that the SQI gradually increased from the coast to the inland. Because of the on-going accumulation and soil formation processes, and wave erosion in the active delta (Li *et al.*, 2015) the lowest sub-criteria scores and the SQI (L₁) were expected. The soil quality in this area was limited by low OM and CC. Low clay and organic matter contents affect soil physical properties such as the mean weight diameter, aggregate stability and water retention negatively (Yang *et al.*, 2014).

Los métodos de evaluación mostraron que el SQI aumentó gradualmente desde la costa hacia el interior. Debido a los procesos continuos de acumulación y formación del suelo, y la erosión de las olas en el delta activo (Li *et al.*, 2015), aquí se esperaban los niveles de más bajos de calificación de los subcriterios y del SQI (L₁). La calidad del suelo en esta área se vio afectada por los niveles bajos de MO y CC. Los contenidos bajos de arcilla y materia orgánica afectan las propiedades físicas del suelo tales como el diámetro medio ponderado, la estabilidad de los agregados y la retención de agua, en forma negativa (Yang *et al.*, 2014).

El SQI aumentó de manera gradual en la llanura deltaica inferior, en L₂ y L₃, cubiertas principalmente por una pradera natural. En estas áreas, la calidad del suelo tiene como limitante bajos CC; pero estuvo asegurada por una tasa máxima de contribución de OM. La principal razón para el contenido alto de materia orgánica en esta zona fue la cantidad elevada de biomasa (Carvalho-dos Santos *et al.*, 2012; Novara

Table 10 Analysis of variance for SQI_{FA}
Cuadro 10. Análisis de varianza para SQI_{FA}.

| Sources | Degree of freedom | Sum of squares | Mean squares | F ratio | Prob>F |
|---------|-------------------|----------------|--------------|---------|---------|
| Model | 4 | 1.61 | 0.40 | 60.75 | <0.0001 |
| Error | 120 | 0.80 | 0.01 | | |
| Total | 124 | 2.41 | | | |

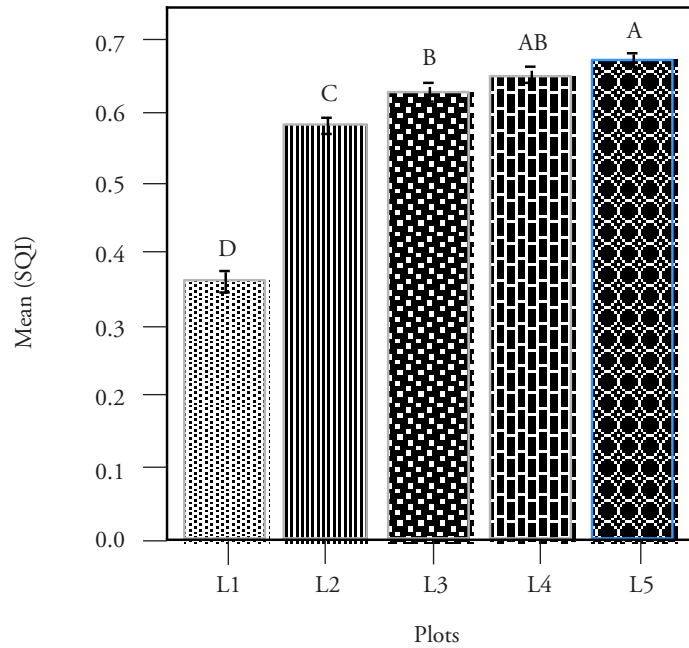


Figure 8. Mean values of SQI_{FA} in five plots. Columns with different letters are statistically different (Tukey; $p \leq 0.01$).

Figure 8. Valores medios de SQI_{FA} en cinco parcelas. Las columnas con letras diferentes indican diferencia significativa (Tukey; $p \leq 0.01$).

SQI increased gradually in the lower deltaic plain (L₂ and L₃), which were mainly covered by a natural meadow. In these areas, the soil quality is limited by low CC. Soil quality was ensured in these areas by the maximum rate of contribution of OM. The main reason for the high content of organic matter in this area was the high biomass (Carvalho-dos Santos *et al.*, 2012; Novara *et al.*, 2013). These plots are younger than the upper deltaic plains, thus the soil quality

et al., 2013). Estas parcelas son más jóvenes que las llanuras deltaicas superiores; por lo tanto, la calidad del suelo fue menor que las de la llanura deltaica superior debido a la distribución del tamaño de los agregados y a una estructura más débil.

El SQI mayor se obtuvo en las llanuras deltaicas superiores (L₄ y L₅), que estaban más alejadas del mar; por tanto, estas parcelas constituyeron la primera área de depósitos del delta. En estas parcelas, CC

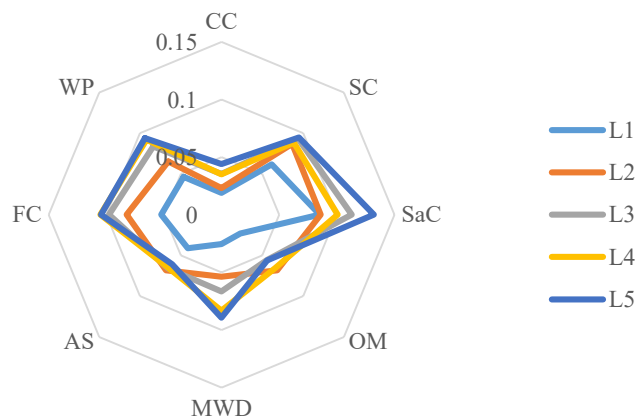


Figure 9. Radar plot of limiting criteria in SQI_{FA}.

Figure 9. Gráfico de radar de los criterios limitantes en SQI_{FA}.

was lower than those in the upper deltaic plain due to grain size distribution and weak structure.

The highest SQI was obtained in the upper deltaic plains (L_4 and L_5), which were farthest from the sea; thus, these plots were the first deposited area of the delta. In those plots, CC and OM limited the SQI. However, the strongest effects of the AS and MWD on the SQI were obtained in them. The main reason for the low OM content is cultivation. In the agricultural field, management practices, especially soil tillage, decrease organic matter content due to high mineralization rates (Cates *et al.*, 2016; Blanco-Moure *et al.*, 2016).

Comparison of methods

The variance analysis determined that the score obtained by the SQI_{AHP} method (0.602) was not different to SQI_A (0.575) and SQI_{FA} (0.564) (Figure 10) ($F=2.628$; $p > 0.05$). Vasu *et al.* (2016) and Nabiollahi *et al.* (2018) reported that SQI values were calculated in the following order: expert opinion>additive model>weighted model.

CONCLUSIONS

The three methods utilized to calculate the soil quality index (Additive Soil Quality Index, Weighted soil quality index using Analytic hierarchy process, and Weighted soil quality index using Factor Analysis) showed similar results. In the factor

and OM limited the SQI. Sin embargo, fue en ellas donde se obtuvieron los efectos mayores de la AS y MWD sobre el SQI. La razón principal del contenido bajo de OM es el cultivo. En el campo agrícola, las prácticas de manejo, especialmente la labranza del suelo, disminuyen el contenido de materia orgánica debido a las tasas altas de mineralización (Cates *et al.*, 2016; Blanco-Moure *et al.*, 2016).

Comparación de métodos

Con el análisis de la varianza, se determinó que los valores obtenidos por el método SQI_{AHP} (0.602) no fueron diferentes a SQI_A (0.575) y SQI_{FA} (0.564) (Figura 10) ($F = 2.628$; $p > 0.05$). Vasu *et al.* (2016) y Nabiollahi *et al.* (2018) informaron que los valores del SQI se calcularon en el siguiente orden: opinión de expertos> modelo aditivo> modelo ponderado.

CONCLUSIONES

Los tres métodos utilizados para calcular el índice de calidad del suelo (índice aditivo de calidad del suelo, índice ponderado de calidad del suelo por medio de el proceso analítico jerárquico y el índice ponderado de calidad del suelo por medio de el análisis de factores) mostraron resultados similares. En el análisis de factores, se eliminó la subjetividad dada por la opinión de expertos y se realizó la ponderación por medio de considerar las relaciones entre propiedades.

Con los métodos de proceso analítico jerárquico, se puede juzgar la coherencia del modelo por medio de un valor de índice de coherencia. Por lo tanto, estos análisis se pueden recomendar para evaluar la calidad del suelo de manera más consistente. El índice de calidad del suelo varió en el delta de Batumi, con valores entre 0.30 y 0.70. En los tres métodos, el índice de calidad del suelo aumentó gradualmente a partir del área del delta activo, con el proceso de acumulación continua, hacia las llanuras deltaicas inferior y superior, formadas en tiempos pasados.

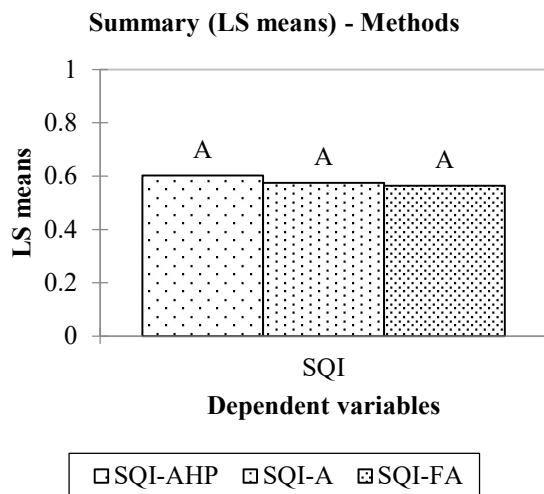


Figure 10. Least significant means of methods.
Figure 10. Valores medios significativos mínimos de los métodos.

—End of the English version—

-----*-----

analysis, the subjectivity due to expert opinion was eliminated and weighting was made by considering the relationships between properties.

In the Analytic hierarchy process methods, judgment can be made about the consistency of the model by using a consistency index value. Thus, these analyses can be recommended for assessing soil quality more consistently. Soil quality index varied in the Batumi Delta and ranged from 0.30 to 0.70. In all three methods, the soil quality index gradually increased from the active delta area where the accumulation process continues towards the lower and upper deltaic plain formed in earlier times.

LITERATURE CITED

- Akinci, H., A.Y. Ozalp, and B. Turgut. 2013. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Comput. Electron. Agr.* 97: 71–82.
- Blanco-Moure, N., R. Gracia, A.C. Bielsa, and M. V. López. 2016. Soil organic matter fractions as affected by tillage and soil texture under semiarid Mediterranean conditions. *Soil Tillage Res.* 155:381–389. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.08.011>.
- Borrelli, P., P. Panagos, M. Märker, and B. S. Modugno. 2017. Assessment of the impacts of clear-cutting on soil loss by water erosion in Italian forests: First comprehensive monitoring and modelling approach. *CATENA*, 149: 770–781.
- Carvalho-dos Santos, D., C. L. Rodrigues-de Lima, C. Naitlo-Pillon, J. M. Filippini-Alba, C. Machado-da Rosa, and M. Oliveira-Farias. 2012. Organic matter distribution in classes of aggregates of a red clay Latosol under forestry and pastures. *Agrociencia*. 46: 231–241.
- Cates, A. M., M. D. Ruark, and J. L. Hedtcke. 2016. Longterm tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 155:371–380. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.09.008>.
- de Paul Obade, V., and R. Lal. 2016. A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Sci. Total Environ.* 541: 424–434. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.096.
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. Doran, J. W. D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and A. B. Stewart (eds). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. Sp.Pub.35: 3–21.
- Guo, L., Z. Sun, Z. Ouyang, D. Han, and F. Li. 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *CATENA* 152: 135–143.
- Johnson, R. A., and D. W. Wichern. 1992. *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 513 p.
- Karlen, D. L., C. A. Ditzler, and S. S. Andrews. 2003. Soil quality: Why and how? *Geoderma*. 114: 3–4.
- Kundu, S., D. Khare, and A. Mondal. 2017. Landuse change impact on sub-watersheds prioritization by analytical hierarchy process (AHP). *Ecol. Inform.* 42: 100–113.
- Leite Chaves, H.M., C.M. Concha Lozada, and R.O. Gaspar. 2017. Soil quality index of an Oxisol under different land uses in the Brazilian savannah. *Geoderma Regional*. 10: 183–190.
- Li, Y., H. Zhang, C. Tu, F. Song, and Y. Luo. 2015. Occurrence of red clay horizon in soil profiles of the Yellow River Delta: Implications for accumulation of heavy metals. *J. Geochem. Explor.* 176: 120–127.
- Liu, J., L. Wu, D. Chen, M. Li, and C. Wei. 2017. Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China. *Appl. Soil Ecol.* 113: 29–35.
- Lu Y, H. Xu, Y. Wang, and Y. Yang. 2017. Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: A case in Huai'an City. *Water Resour. Ind.* 18: 71–77. doi: 10.1016/J.WRI.2017.10.001
- Nabiollahi, K., F. Golmohamadi, R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry, and M. Davari. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*. 318: 16–28. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2017.12.024
- Novara, A., L. Gristina, J. Rühl, S. Pasta, G. D. Angelo, T. La Mantia, and P. Pereira. 2013. Grassland fire effect on soil organic carbon reservoirs in semiarid environment. *Solid Earth Discuss.* 4: 381–385. doi: 10.5194/sed-5-883-2013
- Saaty, T.L., 1994. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP*. RWS Publications, Pittsburgh, PA, USA, 14 p.
- Sánchez-Navarro, A., J. M. Gil-Vázquez, M. J. Delgado-Iniesta, P. Marín-Sanleandro, A. Blanco-Bernardeau, and R. Ortiz-Silla. 2015. Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *Catena*. 131: 35–45
- Turgut, B., and M. Ateş. 2017. Factors of soil diversity in the Batumi delta (Georgia). *Solid Earth*. 8:1–12. doi: 10.5194/se-8-1-2017
- Vasu, D., S. K. Singh, S. K. Ray, V. P. Duraisami, P. Tiwary, P. Chandran, A. M. Nimkar, and S. G. Anantwar. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*. 282: 70–79. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2016.07.010
- Yang, F., G-L. Zhang, J-L. Yang, D-C. Li, Y-G. Zhao, F. Liu, R-M. Yang, and F. Yang. 2014. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *J. Hydrol.* 519: 3086–3093. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.054

Copyright of Agrocienza is the property of Colegio de Postgraduados and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.