

## FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD EDÁFICA PARA ARGIUDOLES DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO LUJÁN

ELIDA CRISTINA FAITA\*; MIGUEL ÁNGEL ROS & ALICIA ROSARIO GIORDANO BUIANI

Recibido: 05-12-14

Recibido con revisiones: 07-12-14

Aceptado: 09-12-14

### RESUMEN

Para formular un índice de calidad edáfica (ICE) aplicable a Argiudoles, en la cuenca media del Río Luján, se trabajó sobre seis tratamientos ubicados en establecimientos agropecuarios: campo natural con mínima perturbación (md), siembra directa (SD), siembra directa subsolada (SDS), labranza reducida subsolada (LRS), pastura (P) y labranza convencional con máxima perturbación (MD). En tres localizaciones por tratamiento se determinó: materia orgánica total (MO), biomasa microbiana (BM), densidad aparente (DAP), índice anisotrópico (IA), índice de inestabilidad de agregados (IS) e infiltración acumulada (INFAC). Sobre los datos obtenidos se aplicó: análisis de varianza (ANVA), análisis de componentes principales (ACP) y funciones discriminantes canónicas (FDC). Los criterios para seleccionar indicadores fueron: importancia estadística en explicación de variabilidad, correlación positiva o negativa entre variables y complejidad de medición. ANVA indicó que las propiedades biológicas generaron el máximo de diferencias significativas entre tratamientos. ACP determinó autovalores y autovectores y evaluó la relación entre propiedades y entre propiedades y tratamientos. Los autovalores de CP1 y CP2 (componentes principales) explicaron el 59% de variabilidad total. Los autovectores expresaron las mayores correlaciones positivas con CP1 para MO (0,57), BM (0,48), INFAC (0,48) e IA (0,41) y su mayor sensibilidad a cambios según uso y manejo. DAP e IS se desestimaron por valores bajos de autovectores y BM por medición compleja. Se seleccionaron MO (alta correlación positiva con BM), INFAC e IA. Aplicando análisis discriminante lineal (ADL) a las propiedades seleccionadas se obtuvo el  $ICE = -8,08 + 2,27 * MO + 0,16 * IA + 0,01 * INFAC$ . ICE para cada tratamiento determinó una secuencia decreciente ligada al grado de remoción del suelo (md, P, SDS, SD, LRS, MD), consistente con evidencia disponible y más allá de diferencias dentro de Argiudoles. La ubicación de tratamientos por ACP en diferentes cuadrantes generó tres grupos según intensidad de la labranza: SD y SDS, md y P y MD y LRS, compatible con el generado por FDC.

**Palabras clave.** Calidad de suelos, análisis de componentes principales, funciones discriminantes canónicas.

### ARGIUDOL QUALITY INDEX IN THE MIDDLE BASIN OF THE RÍO LUJÁN

#### ABSTRACT

In order to develop a soil quality index (ICE) applied to Argiudolls in the middle basin of Río Luján, six treatments were established at different sites: natural field with minimal disturbance (md), no-till (SD), no-till and deep plowing (SDS), reduced tillage and deep plowing (LRS), pasture (P) and conventional tillage with maximum disturbance (MD). The following soil properties were determined on three sites per treatment: total organic matter (MO), microbial biomass (BM), bulk density (DAP), anisotropic index (IA), aggregate instability index (IS) and cumulative infiltration (INFAC). The following statistical analyses were performed on the soil data: analysis of variance (ANVA), principal component analysis (ACP) and canonical discriminant function (FDC). The following criteria was used to select soil quality indicators: statistical importance in explaining the variability, positive or negative correlation between variables and measuring complexity. When performing an ANVA, the biological properties generated maximum significant differences among treatments. ACP eigenvalues and eigenvectors determined and assessed the relationships between properties and between properties and treatments. The eigenvalues of PC1 and PC2 (principal components) explained 59% of total variability. The eigenvectors expressed the highest positive correlations with PC1 for MO (0.57), BM (0.48), INFAC (0.48) and IA (0.41) and greater sensitivity to changes depending on use and handling. DAP and IS were dismissed due to low BM values for complex eigenvalues and measurement difficulty. MO (high positive correlation with BM), INFAC and IA were selected. When applying linear discriminant analysis (ADL) to the selected properties, the following index was obtained  $ICE = -8.08 + 2.27 * MO + 0.16 * IA + 0.01 * INFAC$ . ICE for each treatment determined a decreasing sequence linked to the degree of soil disturbance (md, P, SDS, SD, LRS, MD), consistent with available evidence and beyond differences within Argiudolls. The location of treatments for ACP in different quadrants generated three groups according to tillage intensity: SD and SDS, md and P, and MD and LRS, compatible with that generated by FDC.

**Key words.** Soil quality, principal component analysis, canonical discriminant functions.

Departamento de Tecnología - Universidad Nacional de Luján.

\* Autor de contacto: [introdogro@gmail.com](mailto:introdogro@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

Puede afirmarse que la región pampeana, donde se ubica el partido de Luján, presenta degradación física y química en diversos grados que se incrementan en tierras bajo agricultura continua. Diversos autores consideran que la expansión de la agricultura y sus modalidades de producción fueron favorecidas por factores económicos y ambientales, causando efectos negativos en los suelos pampeanos, pérdida de fertilidad, alteraciones en procesos biológicos, disminución del contenido de carbono orgánico y la disponibilidad de nutrientes y cambios en la estructura del suelo (Michelena *et al.*, 1989; Vázquez *et al.*, 1990; Senigagliesi, 1991; Hall *et al.*, 1992; Wilson *et al.*, 2000; Viglizzo *et al.*, 2001; Elissondo *et al.*, 2001; Teubal, 2003; Steinbach & Álvarez, 2007; Faita *et al.*, 2012; Colazo *et al.*, 2006; Paruelo *et al.*, 2006; Ferreras *et al.*, 2007).

A partir de 1980, la agriculturización determinó que la soja desplazara a otros cultivos presentes en las rotaciones como sorgo, trigo, maíz y girasol. Inicialmente este reemplazo se produjo en sistemas manejados con labranza convencional, con remoción del suelo y pocos rastros en superficie. A fines de esa década, los sistemas de labranza fueron cambiando hacia los llamados conservacionistas, entre los cuales adquirió predominancia el de siembra directa, caracterizado por la no labranza del suelo. No obstante los aspectos positivos de dicho cambio, la prevalencia de sistemas productivos altamente intensivos, determinaron diversas formas de degradación de los suelos como cambios en la estructura, disminución de infiltración, pérdida de materia orgánica y fertilidad y alteraciones de actividad de microorganismos (Steinbach & Alvarez, 2007, *op. cit.*).

La calidad del suelo es susceptible de ser afectada por procesos naturales y otros antropogénicos como el uso y manejo (Karlen *et al.*, 1997). En SQI-Soil Quality Index (1996) se señala que la intervención humana puede provocar o acelerar dichos procesos, vinculando directamente la disminución del contenido de carbono orgánico y actividad biológica con el deterioro del estado físico de los suelos. Harris & Bezdicek (1994) utilizan el término salud del suelo que integra indicadores de propiedades edáficas y no edáficas. Diversos investigadores han propuesto una variedad de parámetros para medir la calidad del suelo (Larson & Pierce, 1991; Doran & Parkin, 1994; Karlen & Stott, 1994).

Doran & Parkin (1996) al igual que Larson & Pierce (1994), consideran que la calidad agronómica de un suelo

refleja su capacidad para funcionar con efectividad tanto en el presente como en el futuro y que esa capacidad puede medirse a través de indicadores de calidad de suelo. Estos indicadores son propiedades físicas, químicas y biológicas capaces de expresar una condición edáfica de interés mediante la síntesis de información (Cantú *et al.*, 2007). La evaluación de propiedades del suelo mediante indicadores, resulta una tarea dificultosa debido a los múltiples factores que controlan los procesos edáficos y sus variaciones espacio-temporales. No obstante ello, resulta esencial dicha evaluación para comparar entre sí distintos sistemas de uso y manejo, así como dichos sistemas con condiciones con mínimo y máximo disturbio (Larson & Pierce, 1994, *op. cit.*), o bien la evolución de un mismo sistema a través del tiempo. Deviene entonces importante identificar indicadores de calidad de suelo capaces de integrar procesos y propiedades, utilizables en distintas condiciones de uso y manejo, incorporables a bases de datos existentes y, en lo posible, fáciles de medir (Doran & Parkin, 1996, *op. cit.*).

Dado que la sustentabilidad de los sistemas productivos agropecuarios, depende de la interacción entre calidad edáfica, manejo, factores ambientales y socioeconómicos, la posibilidad de predicción de la evolución de la calidad del suelo mediante indicadores confiables, constituye una herramienta esencial para decidir cambios en el uso y manejo que eviten deterioros irreversibles con efectos indeseables sobre la misma (Quiroga & Funaro, 2003).

Además, el seguimiento de indicadores de calidad, permite establecer si un sistema productivo agropecuario se encuentra estable o evoluciona positiva o negativamente (Shukla *et al.*, 2006).

Diversos autores proponen la selección de una cantidad mínima de propiedades del suelo, para determinar su calidad (Larson & Pierce, 1994, *op. cit.*; Govaerts *et al.*, 2006). Entre ellas se destacan materia orgánica, pH, nitrógeno, fósforo disponible, biomasa y respiración microbianas, salinidad, textura, estabilidad de agregados, porosidad, sellado superficial, resistencia a la penetración, capacidad de infiltración y almacenamiento de agua (Karlen & Stott, 1994, *op. cit.*; Doran & Parkin, 1996, *op. cit.*; Aparicio & Costa, 2007).

Esa multiplicidad de propiedades hace necesario identificar aquellas con mayor incidencia en la calidad del suelo (Quiroga & Funaro, 2003, *op. cit.*) y su posibilidad de integración en un índice de calidad. Respecto del consenso bastante amplio sobre que la materia orgánica constituye el indicador más sensible de la calidad y productividad del

suelo (Galantini & Rosell, 2006), debe señalarse que su capacidad predictiva se restringe a sitios con condiciones climáticas y edáficas similares debido a la influencia de la textura, capacidad de retención hídrica y promedio de precipitaciones sobre el contenido de materia orgánica y su evolución (Quiroga & Funaro, 2004).

La comprensión de los procesos edafo-ambientales requiere estudiar distintas propiedades e identificar aquellas con mayor incidencia en la calidad del suelo y por lo tanto en la obtención de un índice de calidad. Con ese objetivo los valores obtenidos para las distintas propiedades pueden analizarse por diferentes métodos entre los que se destacan aquellos no supervisados de estadística multivariada (Sena *et al.*, 2002) que posibilitan estudiar simultáneamente la información obtenida.

Dentro de ellos, el análisis de componentes principales (ACP) y los gráficos biplot, son técnicas multivariantes exploratorias capaces de examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión que el espacio original de las variables. Con ACP se construyen ejes artificiales que permiten obtener gráficos de dispersión de variables y observaciones con propiedades óptimas para interpretar la variabilidad. La información sobre variabilidad decrece, en forma sucesiva, desde la primera componente principal (CP) hasta aquella CP que no logra explicar más este aspecto.

Por su parte, los biplots (Gabriel, 1971) muestran las observaciones y variables en un mismo gráfico y permiten interpretar las relaciones conjuntas entre ellas, como cuando agrupan suelos e interpretan las causas probables de diferencias entre ellos.

En base a lo anterior, en esta investigación se utilizó el Análisis de Varianza por el Test de Tuckey y además, en una segunda etapa, se empleó ACP debido a las experiencias en las cuales este método permitió identificar propiedades capaces de discriminar uso y manejo de suelos (Quiroga *et al.*, 1998), determinar el efecto de labranzas sobre la calidad edáfica (Wander & Bollero, 1999), establecer el vínculo entre compactación y propiedades edáficas (Ball *et al.*, 2000) y relacionar propiedades con distintas condiciones de uso y manejo (Rodríguez *et al.*, 2009).

Este estudio tiene por objeto obtener un índice confiable para representar la calidad de Argiudoles presentes en la cuenca media del Río Luján.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Las mediciones y recolección de muestras se realizaron en establecimientos agropecuarios de la cuenca media del Río Luján. La zona se caracteriza por un clima templado-húmedo con temperatura y precipitaciones medias anuales de 15,6 °C y 934 mm, respectivamente. Se trabajó sobre cuatro Series de suelos pertenecientes al Gran Grupo de los Argiudoles cuyos horizontes presentan textura desde franca hasta arcillosa. Las Series Mercedes y Portela ubicadas en lomas de relieves suavemente ondulados y con buen drenaje corresponden al Subgrupo típico. Las Series Solís (Sub-grupo vértico) y Gouin (Sub-grupo ácuico) presentan drenaje de moderado a bueno; la primera se localiza en lomas y lomas planas y la segunda lo hace en áreas planas.

### Muestreo, mediciones y análisis de datos

Se definieron seis tratamientos cada uno de los cuales se correspondió con un uso y manejo de suelo con diferente grado de disturbio y aplicados por productores agropecuarios de la cuenca. El predominio del sistema de la siembra directa en la cuenca, semejante al de todo el país, tornó difícil encontrar los usos y manejos consistentes con los tratamientos restantes.

Los seis tratamientos estudiados fueron: suelo bajo monte con mínima disturbación (md), siembra directa durante 10 años (SD), siembra directa con subsolado durante 10 años (SDS); labranza reducida con subsolado (LRS) durante siete años, pastura durante 6 años (P) y labranza convencional durante 2 años con máxima disturbación (MD). El subsolado en SDS y LRS se realizó cada dos años con escarificador de arcos rígidos, en forma sesgada a la pendiente y a 35 cm de profundidad. En todos los usos y manejos de suelo con cultivos de cosecha, se utilizó la secuencia maíz-trigo-soja. Los usos y manejos de suelo SD y MD se ubicaron sobre la Serie Mercedes; SDS y LRS sobre Portela. P sobre Gouin y md sobre Serie Solís.

En cada tratamiento se hicieron tres muestreos para todas las propiedades. Para determinar materia orgánica total (MO) cada muestra se compuso por diez submuestras de 0 a 10 cm; para calcular densidad aparente (DAP) se recolectaron muestras de 0 a 10 cm de profundidad. Se tomaron muestras sin disturbar de 0 a 5 cm de profundidad para determinar índice de inestabilidad de agregados (IS) y de 0 a 10 cm de profundidad para calcular biomasa microbiana (BM). Se midió resistencia a la penetración (RP) cada 5 cm entre 5 y 40 cm de profundidad y velocidad de infiltración entre 0 y 65 minutos. Con los datos de RP se calculó el índice anisotrópico (IA) y a partir de la velocidad de infiltración se obtuvo el valor de infiltración acumulada (INFac).

Se empleó el método de Walkey & Black (1934) para determinar MO; DAP se obtuvo mediante el empleo del cilin-

dro (Black & Hartage, 1986); IS con el método de Hénin (1958) y BM por Jenkinson & Powlson (1976) modificado (Faita, *et al.*, 2012, op. cit.).

La modificación del método de Jenkinson & Powlson (1976, op. cit.) consistió en reemplazar jarras de incubación de 3600 mL por otras de 500 mL. En cada jarra, se colocó 100 g de suelo fresco; la mitad de las muestras se esterilizó con cloroformo por 24 horas y luego, los vapores remanentes se extrajeron por vacío. Cada muestra esterilizada, se inoculó con 1 g de suelo fresco. Durante los 20 días siguientes, cada 48 horas, en todas las jarras, se capturó la emisión de CO<sub>2</sub> sobre 10 mL de HONA 0,1 N, titulándose por retorno con HCL 0,1 N.

RP se midió con penetrómetro de golpe (cono, normas ISO) y, a partir de sus valores individuales se calculó el IA (Cisneros *et al.*, 1998). La INFac, se determinó a partir de la velocidad de infiltración, sobre suelo húmedo (30% de humedad gravimétrica), con dos mediciones por sitio de muestreo. Se empleó un infiltrómetro de anillo de Muntz (Burt, 1995). Antes de iniciar cada medición, se suprimió toda la cobertura del suelo sin disturbarlo. La carga inicial fue de 10 cm y fluctuó, a lo largo del ensayo, entre ese valor y 5 cm. Las lecturas se realizaron cada 5 minutos durante un tiempo total de 65 minutos, período dentro del cual se alcanzó la infiltración básica.

Sobre los valores obtenidos para las distintas propiedades se realizó un análisis de varianza (ANVA) por el Test de Tuckey con nivel de significancia del 5%. Además, en una segunda etapa, se aplicó estadística multivariada exploratoria de análisis de componentes principales (ACP) para obtener la relación existente entre propiedades edáficas y sus variaciones según tratamientos. Para ello, a partir de datos estandarizados, se empleó el software estadístico INFOSAT (2004). Dicha técnica permite analizar todos los datos en un espacio de menor dimensión que el espacio original de las propiedades, identifica aque-

llas más sensibles entre los tratamientos y genera además ejes artificiales o componentes principales (CP) a partir de los cuales se obtienen gráficos de dispersión de observaciones y propiedades (Hair *et al.*, 1995).

Estos gráficos construidos a partir de CP pueden usarse para visualizar la dispersión de las observaciones, pero no explicitan la influencia de las variables. Los gráficos biplot propuestos por Gabriel (op. cit., 1971) muestran simultáneamente las observaciones y variables de forma tal que se pueden hacer interpretaciones conjuntas entre ellas. Las direcciones desde el origen son interpretables a diferencia de las distancias entre símbolos. Los ángulos entre vectores que representan las variables pueden interpretarse en términos de correlaciones entre ellas: los de 90° indican ausencia de correlación, mientras que valores mayores o menores indican correlaciones positivas o negativas respectivamente.

Posteriormente, se realizó una selección y ponderación de indicadores mediante el empleo de funciones discriminantes canónicas (FDC). La FDC es una combinación lineal de las variables originales, en la cual la suma de cuadrados de las diferencias entre grupos sobre la varianza dentro de los grupos es máxima. Cuando hay dos grupos se genera una sola ecuación lineal discriminante (eje canónico). Si hay *k* grupos, habrá *k*-1 funciones discriminantes no correlacionadas (ejes canónicos).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los promedios de los valores registrados para cada uno de los tratamientos se presentan en la Tabla 1.

El ACP realizado mostró que los dos primeros CP explicaron el 59% de la variabilidad total de los datos (Tabla 2).

Tabla 1. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades estudiadas.

Table 1. Treatment effect over the properties studied.

TRATAMIENTOS	BM μgC g <sup>-1</sup>	IA Mpa	MO %	IS	DAP Mg m <sup>-3</sup>	INFac mm
md	1715,57 b	2,51 a	4,04 c	0,85 a	1,10 a	334,04 b
SD	1550,30 b	2,47 a	2,03 a	0,89 a	1,23 b	115,80 a
SDS	1180,04 b	2,13 a	1,89 a	0,90 a	1,18 ab	298,34 b
LRS	200,32 a	2,06 a	1,86 a	0,90 a	1,10 a	48,43 a
P	2011,40 b	2,66 a	2,93 b	0,83 a	1,13 ab	131,58 a
MD	964,23 b	1,80 a	1,85 a	0,80 a	1,08 a	35,50 a

Letras distintas representan diferencias significativas al 5%. **md**: mínima disturbación; **SD**: siembra directa; **SDS**: siembra directa con subsolado; **LRS**: labranza reducida con subsolado; **P**: pastura; **MD**: labranza convencional; **BM**: biomasa microbiana; **IA**: índice anisotrópico; **MO**: materia orgánica; **IS**: índice de inestabilidad de agregados; **DAP**: densidad aparente; **INFac**: infiltración acumulada.

Tabla 2. Autovalores de los parámetros analizados para las dos primeras componentes principales.

Table 2. Eigenvalues of the parameters analyzed for the first two principal components.

CP	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	1,98	0,33	0,33
2	1,54	0,26	0,59
3	1,06	0,18	0,76
4	0,67	0,11	0,87
5	0,43	0,07	0,95
6	0,32	0,05	1,00

A su vez, el ACP permite graficar todas las propiedades en un solo plano (Fig. 1) y representar los puntos de muestreo mediante círculos. Cada propiedad se representa con un auto-vector que indica la correlación entre ella y la CP considerada (Tabla 3).

La existencia de elevadas correlaciones entre BM y MO; IA e INFac y DAP e IS, junto con lo informado por Larson & Pierce (1994, op. cit.), respecto de la conveniencia de seleccionar aquellas propiedades con menor dificultad en su determinación para la elaboración de un índice de calidad edáfica, permite priorizar la utilización de MO, IA y DAP

Tabla 3. Autovectores de las propiedades estudiadas para las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).

Table 3. Eigenvectors of the properties studied for the first two principal components (CP1 and CP2).

Propiedad	CP1 (%)	CP2 (%)
<b>BM</b>	0,48	-0,07
<b>IA</b>	0,41	0,28
<b>MO</b>	0,57	-0,09
<b>IS</b>	-0,16	0,67
<b>DAP</b>	-0,16	0,58
<b>INFac</b>	0,48	0,34

**BM:** biomasa microbiana; **IA:** índice anisotrópico; **MO:** materia orgánica; **IS:** índice de inestabilidad de agregados; **DAP:** densidad aparente; **INFac:** infiltración acumulada.

en dicha confección. De este análisis se desprende que a lo largo del primer CP (CP1), las propiedades MO (0,57), BM (0,48), INFac (0,48) e IA (0,41) fueron las más sensibles a los cambios derivados del tratamiento. Esos resultados determinan que las diferencias en calidad de suelos se direccionaran en dos sentidos: uno referido a las propiedades biológicas y otro a las propiedades físicas de los suelos. Dentro de estas últimas, los resultados de INFac son los más susceptibles a las variaciones, tal como informa-

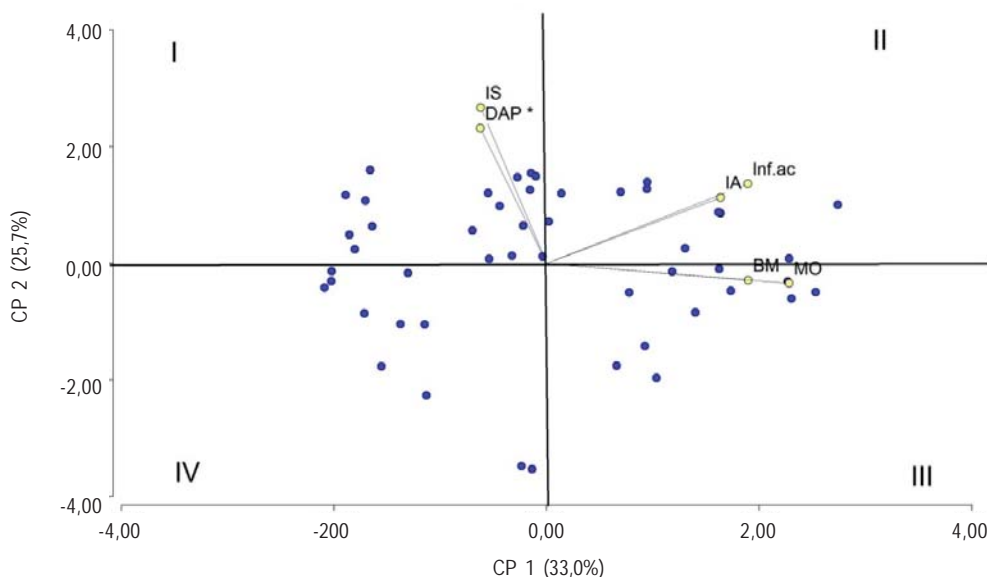


Fig. 1. Distribución en el plano de las propiedades estudiadas mediante el ACP.

Fig. 1. Distribution in terms of the properties studied by ACP.

**BM:** biomasa microbiana; **IA:** índice anisotrópico; **MO:** materia orgánica; **IS:** índice de inestabilidad de agregados - **DAP:** densidad aparente - **INFac:** infiltración acumulada.

ran Aoki & Sereno (2006) y Torres *et al.* (2006). Queda de manifiesto que CP1 se define por las variables BM, IA, MO e INFac (biológicas y físicas); mientras que IA, IS, DAP e INFac (físicas) definen a CP2.

Las propiedades con valor de correlación positiva con CP1 fueron a su vez los de mayores valores de correlación. Entre ellas, las propiedades biológicas, generaron además el mayor número de diferencias significativas entre tratamientos. También se constata la formación de tres grupos de variables, ubicados en los cuadrantes I, II y III respectivamente, mientras que en el cuadrante IV no aparece ninguna de las propiedades estudiadas.

Las propiedades físicas del suelo (IS, DAP, IA e INFac) se distribuyen en los cuadrantes I y II; mientras que las propiedades biológicas (BM y MO) se sitúan en el cuadrante III. Se verifica que las propiedades físicas del cuadrante I se correlacionan negativamente con las biológicas del cuadrante III, en concordancia con lo informado por Guérif (2001) y Ferreras *et al.*, op. cit. (2007) sobre que, mayores contenidos de MO y BM, se asocian con disminuciones de DAP e IS. A diferencia de ello, y en base al efecto beneficioso de MO y BM sobre IA e INFac, citado por Shukla *et al.*, op. cit., (2006) y Aparicio y Costa, op. cit. (2007), las propiedades físicas del

cuadrante II se correlacionan positivamente con las biológicas del III. El ACP además expresa el agrupamiento de los diferentes usos y manejos de suelo (Fig. 2).

En el cuadrante I se encuentran el 75% de casos de SD y el 78% de SDS. El cuadrante II no se asoció especialmente con ninguno de los tratamientos. En el cuadrante III se observan el 64% de md y el 50% de P. En el cuadrante IV se ubicó el 100% de los casos correspondientes a MD y el 66% de LRS.

Según Campitelli *et al.* (2010) el agrupamiento de tratamientos en distintos cuadrantes, señala similitudes de comportamiento respecto del conjunto de las propiedades analizadas. En el caso de este estudio, dichas similitudes generan tres grupos de tratamientos diferenciados entre sí por el grado de remoción del suelo: SD y SDS; md y P y MD y LRS.

Para seleccionar indicadores a partir del ACP, se emplearon los criterios mencionados por Campitelli *et al.*, op. cit. (2010): a) peso estadístico en la explicación de la variabilidad (valor del autovector); b) correlación positiva o negativa con otras variables y c) baja complejidad de la medición. Según el primer criterio, se seleccionaron aquellas propiedades con valores de autovectores superiores a 0,40:

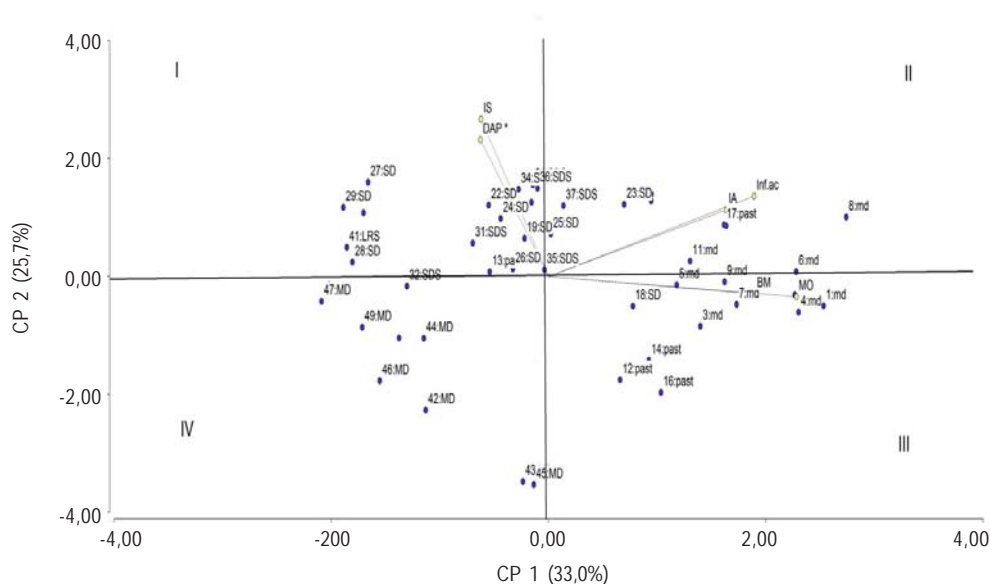


Fig. 2. Diagrama de dispersión de los tratamientos evaluados mediante el ACP

Fig. 2. Scatter plot of the treatments evaluated by ACP

**BM:** biomasa microbiana; **IA:** índice anisotrópico; **MO:** materia orgánica; **IS:** índice de inestabilidad de agregados; **DAP:** densidad aparente; **INFac:** infiltración acumulada **md:** mínima disturbación; **SD:** siembra directa; **SDS:** siembra directa con subsolado; **LRS:** labranza reducida con subsolado; **P:** pastura; **MD:** labranza convencional



MO, BM, IA e INFac. La inclusión de MO e INFac también resulta consistente con la importancia asignada a ellas por diferentes autores como indicadores de calidad de suelo (Galantini & Rosell, 2006, op. cit.; Quiroga & Funaro, 2003, op. cit.; Aoki & Sereno, 2006, op. cit.; Rodríguez *et al.*, 2009, op. cit.). Por otra parte, pese a que Apezteguía *et al.* (1987) consideran que IS permite inferir el estado de degradación de un suelo, tanto esta propiedad como DAP fueron desestimadas por no alcanzar el mínimo establecido en el primer criterio (Tabla 3).

Entre las propiedades seleccionadas, se observó la elevada correlación positiva verificada entre MO y BM (segundo criterio) que permitió seleccionar a MO dada la sencillez de la metodología para su determinación (tercer criterio). Del proceso de selección descripto surge que un índice de calidad para Argiudoles de la cuenca media del Río Luján, podría basarse en las siguientes propiedades edáficas: MO, IA e INFac. Posteriormente, se realizó una selección y ponderación de indicadores mediante el empleo de FDC (Tabla 4).

Tabla 4. Funciones discriminantes canónicas generadas para los seis tipos de uso y manejo del suelo.

Table 4. Canonical discriminant functions generated for the six types of soil use and management.

	1	2
<b>Constante</b>	-8,08	-3,65
<b>MO</b>	2,27	1,80
<b>IA</b>	0,16	0,95
<b>INFac</b>	0,01	-0,02

MO: materia orgánica; IA: índice anisotrópico; INFac: infiltración acumulada.

La aplicación de esta metodología redujo los indicadores a tres: MO, IA e INFac coincidentes por completo con los obtenidos por el ACP (Faita *et al.*, 2013a) y parcialmente con los derivados de la aplicación del ANVA (Faita *et al.*, 2013b) y permitió construir la siguiente ecuación para calcular el índice de calidad edáfica (ICE):

$$ICE = -8,08 + 2,27 MO + 0,16 IA + 0,01 INFac$$

Al aplicar esta ecuación a los valores promedio obtenidos de las propiedades seleccionadas en cada uno de los tratamientos, se obtienen los índices que aparecen en la Tabla 5.

Al ordenar los ICE de mayor a menor resulta la sucesión: md, P, SDS, SD, LRS y MD. La asociación entre md y MD con los valores máximo y mínimo, respectivamente, resulta una primera señal de la efectividad del índice obtenido, reafirmada al analizar toda la secuencia, ya que en términos generales se aprecia una disminución del índice a medida que aumenta el grado de remoción del suelo.

Tabla 5. Índice de calidad edáfica para los tratamientos estudiados.

Table 5. Soil quality index for the different treatments.

Tratamientos	ICE
<b>md</b>	4,8328
<b>SD</b>	-1,9187
<b>SDS</b>	-0,4655
<b>LRS</b>	-3,0439
<b>P</b>	0,3125
<b>MD</b>	-3,2375

md: mínima disturbación; SD: siembra directa; SDS: siembra directa con subsolado; LRS: labranza reducida con subsolado; P: pastura; MD: labranza convencional.

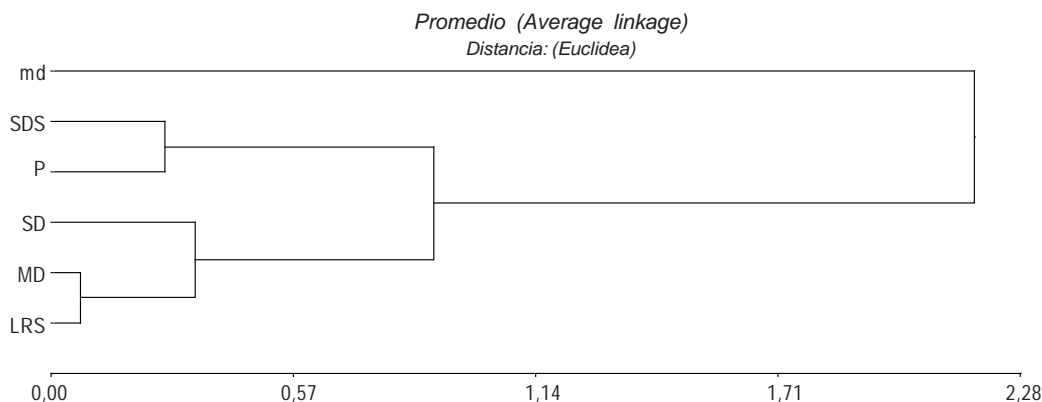


Fig. 3. Dendrograma del Análisis de Conglomerados aplicando el índice obtenido.

Fig. 3. Dendrogram of cluster analysis using the developed index.

md: mínima disturbación; SD: siembra directa; SDS: siembra directa con subsolado; LRS: labranza reducida con subsolado; P: pastura; MD: labranza convencional.

La evidencia disponible respecto a los beneficios de combinar labores profundas con SD sobre la calidad del suelo (Alzugaray, 2008; Faita, 2006), hace que la excepción a esta tendencia verificada para SDS y SD, contribuya a reafirmar la eficacia del índice.

El hecho de que la secuencia obtenida elude las diferencias de calidad edáfica existentes entre los Subgrupos a los que pertenecen las Series de Suelo sobre las que se localizaron los tratamientos, constituye un indicio adicional de la eficacia del ICE.

Finalmente, FDC posibilitó observar un agrupamiento por uso y manejo de la tierra: SD y SDS; md y P y MD y LRS (Fig. 3), similar al obtenido mediante el ACP que asocia tratamientos a distintos cuadrantes.

## CONCLUSIONES

El índice objeto de este estudio:  $ICE = -8,08 + 2,27 MO + 0,16 IA + 0,01 INF$  se obtuvo mediante ponderación por FDC de las propiedades seleccionadas.

Las propiedades que lo integran, se seleccionaron por su adecuada capacidad de explicación de la variabilidad de la calidad edáfica y baja complejidad de medición.

La aplicación de este ICE a los tratamientos estudiados determinó un ordenamiento descendente que expresa una relación negativa entre calidad edáfica y grado de remoción del suelo, consistente con la evidencia disponible.

## AGRADECIMIENTOS

Al M. Sc. R. Michelena por sus consideraciones críticas sobre esta producción.

Al M. Sc. A. Boyadjian por la revisión bibliográfica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alzugaray, C; MS Vilche & C Petenello. 2008. Labor profunda en siembra directa: Efecto sobre la condición biológica del suelo. *Cien. Inv. Agr.* 35(3): 265-276.
- Aoki, AM & R Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia* 23(1).
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155-165.
- Apezteguía, HP; H Amaya & L Crusta. 1987. Medición de pérdidas de suelo y disminución de los rendimientos de soja debidos a la erosión hídrica en la región semiárida central de Córdoba. *Ci. Suelo (Argentina)* 5(1): 51-55.
- Ball, BC; DJ Campbell & EA Hunter. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Till. Res* 57: 83-91.
- Black, GR & KH Hartage. 1986. Bulk Density. *En: A Klute (ed) Methods of soil analysis. Part. 1. 2da edn Pp 363-375.* American Society of Agronomy.
- Burt, CM. 1995 (ed). *The Surface Irrigation Manual. A Comprehensive Guide to Design and Operation of Surface Irrigation Systems.* Waterman Industries. Exeter, CA. 373 Pp.
- Campitelli, P; A Aoki; O Gudelj; A Rubenacker & R Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ci. Suelo (Argentina)* 28(2): 173-178.
- Cantú, MP; A Becker, JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ci. Suelo (Argentina)* 25(2): 173-178.
- Cisneros, JM; C Cholaky; O Giayetto; E Bricchi; J Marcos & G Cerioni. 1998. Homogeneidad física, resistencia a la penetración y humedad del suelo en sistemas de labranza para el área manisera de Córdoba. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Rural, La Plata, Argentina.
- Colazo, JC; P Blanco; A Becker; P Bouza; H Del Valle; C Quintero; G Boschetti; J De Dios Herrero; M Osterrieth; MF Álvarez; N Borrelli & DE Buschiazzo. 2006. Estabilidad estructural en suelos de la Argentina. Pp 120. *En: Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, Argentina.*
- Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: JW Doran, DC Coleman, DF Bezdicek & BA Stewart (eds) Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication N° 35.* Wisconsin, USA.
- Doran, JW & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. *En: Doran, JW & AJ Jones (eds) Methods for assessing soil quality. Pp 25-37. Soil Science Society of America Spec. Publ. N° 49, Madison, WI.*
- Elissondo, E; JL Costa; E Suero; LP Fabrizzi & F García. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Ci. Suelo (Argentina)* 19(1): II.
- Faita, EC; M Ros & A Giordano Buiani. 2013a. Selección de propiedades edáficas para formular un índice de calidad de Argiudoles. Actas Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos, 2-4 Julio, CABA, Argentina.
- Faita, EC; M. Ros & A. Giordano Buiani. 2013b. Comparación de métodos para seleccionar propiedades para un índice de calidad. Actas Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos, 2-4 Julio, CABA, Argentina.
- Faita, EC; JL Torella & JM Gueçaimburu. 2012. Detección del deterioro mediante algunas variables biológicas, químicas y físicas. Actas XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- Faita, E. 2006. Calidad del suelo en sistemas de laboreo bajo cubierta en argiudoles típicos representativos de la pampa ondulada. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Ferreras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & FGarcía. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ci. Suelo (Argentina)* 25(2): 159-172.



- Gabriel, K. 1971. Biplot display of multivariate matrices with application to principal components analysis. *Biometrika* 58: 453-467.
- Galantini, J & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamic ICE under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- Govaerts, B; KD Sayre & J Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till. Res.* 87: 163-174.
- Guérif, J; G Richard; C Dürr; JM Machet; S Recous & J Roger-Estrade. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61: 13-32.
- Hair, AJ; RE Anderson; RL Tatham & WC Black. 1995. Multivariate data analysis with readings. Pp 529. In: D Borkowsky (ed.) Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Hénin, S; G Monnier & A Combeau. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92.
- Hall, AJ; CM Rebella; CM Ghersa & J Cullot (eds). 1992. Field-cropsystem of Pampas. Pp. 413-450. In: CJ Pearson (ed) Ecosystem of the world. Field Crops Ecosystem. Elsevier Scientific, Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- Harris, RF; and DF. Bezdicek. 1994. Descriptive aspects of soil quality/health. In: J.W. Doran et al. (eds) Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Sci. Soc. Am. J. Special Publication* 35: 23-35.
- Infostat. 2004. Software Estadístico. Estadística y Biometría y Diseño de Experimentos. Fac. Ciencias Agropecuarias. UN Córdoba, Argentina. ISBN: 987-9449-65-7.
- Jenkinson, D & D Powlson. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: a method for measuring soil biomass. *Soil Biol. and Bioch.* 8(3): 209-213.
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RG Cline; RF Harris & GE Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Karlen, DL & D Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: JW Doran et al. (eds) Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Sci. Soc. Am. J. Special Publication* 35: 53-72.
- Larson, WE & FJ Pierce. 1991. Conservation and enhancement of Soil Quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2: Technical papers. Pp. 175-203. *International Board for Research and Management. IBSRAM Proceedings* 12 (2). Bangkok, Thailand.
- Larson, WE & FJ Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 677.
- Michelena, RO; CB Irurutia; FA Vavruska; R Mon & A Pitaluga. 1989. Degradación de suelos del Norte de la Región Pampeana. Proyecto de Agricultura Conservacionista. Publicación Técnica 6. INTA. Centros Regionales Buenos Aires Norte, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe, Argentina.
- Paruelo, JM; JP Guerchaman; G Piñeiro; EG Jobbáy; SR Verón; G Baldi & S Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia X* (2): 47-61.
- Quiroga, A & D Funaro. 2004. Materia orgánica, factores que condicionan su utilización como indicador de la calidad en molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. Pp 476. En: Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Argentina.
- Quiroga, A & D Funaro. 2003. Indicadores de calidad de suelos. [http://www.aacrea.org.ar/soft/nro\\_275.htm#notatapa](http://www.aacrea.org.ar/soft/nro_275.htm#notatapa).
- Quiroga, A; DE Buschiazzi & N Peinemann. 1998. Management discriminat properties in semiarid soils. *Soil Sci* 163: 591-597.
- Rodríguez, N; A Florentino; D Torres; H Yendis & F Zamora. 2009. Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro estado Falcón. *Rev. Fac. Agron.* 26(3). Versión impresa. ISSN 0378-7818.
- Roming, DE.; MJ. Garlynd, RF. Harris, and K McSweeney. 1995. How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conserv.* 50: 225-232
- SQL-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. Prepared by Soil Quality Institute, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service and National Soil Till Laboratory. *Agricultural Research Service, USA*.
- Sena, MM; RT Frighetto; PJ Vlarini; H Tokeshi & RJ Poppi. 2002. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. *Soil Till. Res.* 67: 171-181.
- Senigagliesi, C. 1991. Estado actual y manejo de los recursos naturales, particularmente el suelo, en el sector norte de la pampa húmeda. Seminario Juicio a nuestra agricultura. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.
- Shukla, MK; R Lal & M Ebinger. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till. Res.* 87: 194-204.
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.
- Teubal, M. 2003. Soja transgénica y crisis del modelo agroalimentario argentino. *Real. Econ.* 196: 52-74. Buenos Aires, Argentina. ISSN 0325-1926.
- Torres, D; A Florentino y M López. 2006. Indicadores e índices de calidad del suelo en un ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guarico Venezuela. *Bioagro* 18(2): 83-91. Revista del Decanato de Agronomía. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela. ISSN 1316-3361.
- Vázquez, ME; LA Berasategui; ER Chamorro; LA Taquini & LA Barberis. 1990. Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)* 8: 203-210.
- Viglizzo, EF; F. Lértora; AJ Pordomingo; JN Bernardos; ZE Roberto & H Del Valle. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agr. Ecosyst. Environ.* 83: 65-81.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wander, ED & GA Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- Wilson, MG; CE Quintero; NG Boschetti; RA Benavides & WA Mancuso. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Rev. Fac. Agr. UNER* 20(1): 23-30.

