

## ANÁLISIS MULTIVARIADO Y UNIVARIADO EN LA DISCRIMINACIÓN DE SISTEMAS DE USO DE SUELOS DEL CENTRO DE SANTA FE

A. PIRES DA SILVA, S. IMHOFF, N.F.B. GIAROLA y C.A. TORMENA\*

Dpto. de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11, C.P. 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: apisilva@carpa.ciagri.usp.br.

\*Dpto. de Agronomia, UEM, PR, Brasil. E-mail:catormen@uem.br.

**Abstract.** The quantification of the degradation processes requires the evaluation of soil properties that can be used as indicators of the modifications induced by the different land use systems. The objectives of this research were to: (i) evaluate the potential of the multivariate (canonical discriminant analysis, CDA) and univariate (analysis of variance, ANOVA) statistical techniques for discriminating the different land management systems in two Argiudolls and, (ii) identify the most sensible properties to the alterations induced by different management systems. In the soils Aquic Argiudoll and Typical Argiudoll, that have been used with continuous agriculture, extensive livestock, intensive livestock, and virgin vegetation, were evaluated pH, C, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H+Al, S-SO<sub>4</sub>, B, Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and %S/T. The results indicated that the CDA was more efficient than ANOVA to discriminate the land management systems as well as to identify the nutrients more sensitive to soil degradation.

**Key words:** canonical discriminant analysis, analysis of variance, land management systems, soil chemical properties.

**Resumen.** La cuantificación de la degradación de los suelos requiere la evaluación de propiedades que sean indicadoras de las alteraciones inducidas por diferentes sistemas de manejo. Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar el potencial de las técnicas estadísticas multivariada (análisis discriminante canónica, ADC) y univariada (análisis de varianza, ANOVA) para discriminar diferentes sistemas de manejo en dos Argiudoles y, ii) identificar las propiedades químicas más sensibles a las alteraciones inducidas por los sistemas de manejo en esos suelos. En los suelos Argiudoll áquico y Argiudoll Típico, sometidos a agricultura continua, ganadería extensiva, ganadería intensiva y vegetación virgen, fueron evaluados pH, C, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H+Al, S-SO<sub>4</sub>, B, Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> y %S/T. Los resultados indicaron que el ADC fue más eficiente que el ANOVA para discriminar los diferentes sistemas de manejo y para identificar los nutrientes más sensibles a las alteraciones inducidas por esos sistemas.

**Palabras clave:** análisis discriminante canónica, análisis de varianza, sistemas de uso de las tierras,

### INTRODUCCIÓN

La degradación del recurso suelo se manifiesta, principalmente, a través del agotamiento de los nutrientes y de modificacio-

nes de las características físicas y biológicas (Wit et al., 1995). La cuantificación de la degradación de los suelos requiere la evaluación de propiedades que sean indicadoras de las alteraciones inducidas por los sistemas de

manejo. Según Heil y Sposito (1997) es preciso identificar, entre los llamados atributos químicos indicadores de "calidad del suelo", como pH, materia orgánica, CIC, nutrientes, aquellos más sensibles a las prácticas de manejo.

En general, los trabajos analizan el efecto de los sistemas de uso de las tierras sobre diversas propiedades físico-químicas considerándolas separadamente. Ese procedimiento ignora el efecto de los tratamientos sobre las posibles interrelaciones entre las variables estudiadas, lo que reduce la comprensión de los efectos de las variables independientes sobre las variables dependientes (Cruz-Castillo et al., 1994). La evaluación conjunta de diferentes propiedades del suelo es un prerrequisito fundamental para la correcta interpretación del efecto de diferentes sistemas de uso de las tierras sobre la calidad del recurso suelo, tanto desde del punto de vista de la producción agropecuaria como de la protección del medio ambiente (Carter et al., 1997).

Considerando el suelo como una unidad natural en un continuo tridimensional dinámico, Nolin et al. (1989) mencionaron que, para determinar las interrelaciones entre varios atributos, son preferibles procedimientos estadísticos con enfoque multivariado. En ese contexto, el análisis multivariado es considerado más eficiente que el análisis univariado, en el que las correlaciones entre variables son ignoradas y la interpretación es limitada al análisis de las variables en forma independiente. Las técnicas estadísticas multivariadas permiten analizar simultáneamente múltiples características de los individuos estudiados, con la ventaja de que también es evaluada la existencia de correlación entre las variables estudiadas.

El análisis discriminante canónico (ADC) es una técnica estadística multivariada que permite la identificación de diferencias entre dos o más grupos (tratamientos) a

partir de medidas de características de los individuos pertenecientes a esos grupos, facilitando la comprensión de las relaciones entre las variables evaluadas dentro de esos grupos (Afifi y Clark, 1996). El ADC estima funciones lineales (funciones o variables canónicas) a partir de las variables cuantificadas, realizando la separación de los grupos de individuos al maximizar la varianza entre los grupos y minimizar la varianza dentro de los grupos (Cruz-Castillo et al., 1994). El fundamento teórico del ADC puede ser visto en varias publicaciones (Afifi y Clark, 1996; Manly, 1994; Webster y Oliver, 1990).

El ADC fue utilizado con el objetivo de separar grupos en diferentes áreas de investigación, por ejemplo identificación de pie de injertos más productivos (Cruz-Castillo et al., 1992), selección de ganado (Gilbert et al., 1993), detección de alteraciones en la composición botánica de comunidades de malezas (Derksen et al., 1993), identificación de diferentes especies de pinos (Donahue y Upton, 1996), demostrando inclusive su potencial en la ciencia del suelo, al ser exitosamente utilizado en clasificación de suelos (Vaselli et al., 1997), discriminación de sistemas de manejo (Quiroga et al., 1998) e identificación de las propiedades físico-químicas que más influenciaron la producción de maíz (Maddoni et al., 1999).

Pese a que los suelos del Centro de la provincia de Santa Fe son considerados naturalmente fértiles (Benites et al., 1994), la intensificación de las actividades agrícola-ganaderas está provocando una acelerada degradación del recurso suelo (Cursak de Castigniani et al., 1994; Orellana y Pilatti, 1994; Imhoff et al., 1996). Michelena et al. (1989) hicieron un seguimiento de varias propiedades físico-químicas, con el objetivo de identificar indicadores de calidad de suelos a escala regional, encontrando una correlación positiva entre intensidad de uso de las tierras y algunas propiedades, como carbono

orgánico, nitrógeno total, pH y estabilidad de agregados, entre otras. Maddonni et al. (1999) mencionaron que esos indicadores pueden variar localmente. Por lo tanto, estudios que consideren los sistemas de producción y los suelos más importantes a escala local, pueden ser de gran utilidad en la identificación de variables indicadoras del estado de degradación de los suelos.

El desarrollo de este trabajo se fundamentó en la hipótesis de que el análisis multivariado permite una mejor discriminación de los sistemas de uso de las tierras, a través de la evaluación de atributos químicos en la zona de enraizamiento de los suelos, que el análisis univariado. Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar el potencial de las técnicas estadísticas multivariada (análisis discriminante canónica, ADC) y univariada (análisis de varianza, ANOVA) para discriminar diferentes sistemas de uso de las tierras en dos Argiudoles y, ii) identificar las propiedades químicas más sensibles a las alteraciones inducidas por los diversos sistemas de manejo en esos dos suelos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### *Área de estudio*

Las áreas estudiadas están localizadas en la región central de la provincia de Santa Fe, en el Departamento Las Colonias. Esta región se caracteriza por presentar relieve normal-subnormal con gradiente menor a 1% (Mosconi et al., 1981). Según Thornthwaite el clima del departamento Las Colonias es subhúmedo-húmedo, mesotermal (C2B'3ra').

Utilizando como base cartas topográficas (1:50000), carta de suelos (1:50000) y fotografías aéreas pancromáticas (1:20000) fueron seleccionadas áreas con suelos clasificados como Argiudoles Ácucos (Serie Humboldt) y Argiudoles Típicos (Serie Rincón de Ávila). Esos suelos fueron sometidos, por lo menos en los 10 últimos años, a los siguientes sistemas de uso de las tierras:

agricultura continua (Ag), ganadería extensiva (Ge), ganadería intensiva (Gi) y vegetación virgen (Vn).

Los suelos fueron originados a partir de sedimentos eólicos (loess) y, en general, presentan bajo contenido de arena (menor a 5%), excepto en las áreas con influencia de ríos (INTA, 1991). Los suelos de la serie Humboldt son profundos, moderadamente bien drenados y están ubicados en sectores planos o ligeramente deprimidos. La presencia del horizonte Bt potente, que restringe su permeabilidad, constituye su limitación más importante. Sin embargo, esos suelos están bien provistos de materia orgánica y bien estructurados. Los suelos de la serie Rincón de Ávila están ubicados en áreas más elevadas del paisaje y próximos del río Salado y afluentes menores. En general, esos suelos presentan valores variables de sodio y sales y, también, mayor contenido de arena debido a la influencia de los ríos. Los suelos de esta serie son susceptibles de erosión hídrica, especialmente cuando están localizados en pendientes extensas con más de 1% de gradiente (INTA, 1991).

### *Muestreo y análisis de laboratorio*

En cada sistema de uso (Ag, Ge, Gi y Vn) fueron seleccionadas áreas, de aproximadamente 10 hectareas, localizadas en la misma posición topográfica. En cada área y en cada serie de suelos fueron extraídas, con un muestreador de 3 cm de diámetro, 200 muestras simples de la profundidad enraizable, siendo el límite inferior de muestreo el techo del horizonte Bt (Pilatti y Grenón, 1994). Las muestras simples fueron agrupadas, constituyendo 10 muestras compuestas (cada una formada por 20 muestras simples de suelo) de cada sistema. Las muestras fueron secadas al aire, pasadas por tamiz de malla de 2 mm y acondicionadas para la realización de los análisis químicos. En cada muestra fueron efectuadas las siguientes

determinaciones químicas: pH (en  $\text{Cl}_2\text{Ca}$  0,01M), carbono orgánico expresado como materia orgánica (MO) (a través de oxidación con solución de dicromato de potasio), fósforo disponible (P), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ) de intercambio (extraídos con resina de intercambio catiónica y aniónica), azufre expresado como sulfato ( $\text{S-SO}_4$ ) (determinado por turbidimetría),  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ , boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn) determinados según la metodología descrita por Rajj (1998). A partir de los resultados fue calculado el valor de saturación con bases (%S/T).

### *Análisis Estadísticos*

En una primera etapa fueron comparados los diferentes sistemas de uso, en cada serie de suelos, a través del análisis de varianza univariado (ANOVA). Para esto, fue utilizado el Modelo General Linear del Statistical Analysis System, procedimiento PROC GLM (SAS, 1991). Para verificar si los sistemas de uso de las tierras estudiados podían ser separados utilizando los atributos químicos evaluados, se utilizó la técnica de diferencias mínimas significativas (LSD) con un nivel de  $\alpha = 0,05$ .

En una segunda etapa, los datos fueron analizados con la técnica estadística multivariada denominada análisis discriminante canónico (ADC), utilizando el procedimiento PROC CANDISC (SAS 1991). Esta técnica permite el análisis de variables múltiples en un único test (Hatcher, Stepanski 1994) y, como en la primera etapa, fue usada para evaluar si los sistemas estudiados podían ser discriminados a través de las propiedades químicas medidas.

La lógica del ADC para la separación de los grupos se sustenta en la obtención de la combinación lineal (Z) de las variables independientes ( $Y_i$ ), de forma que la correlación entre Z y  $Y_i$  sea maximizada. La idea básica en el ADC es encontrar los valores de los coeficientes que maximicen la correlación entre Z y  $Y_i$ .

El ADC transforma las variables originales en un número pequeño de variables compuestas, denominadas funciones o variables canónicas, que maximizan la variación entre los grupos (tratamientos) y minimizan la variación dentro de ellos.

La combinación lineal para una función discriminante (Z) puede ser representada por la ecuación 1:

$$Z = \mu_1 Y_1 + \mu_2 Y_2 + \dots + \mu_i Y_i$$

Donde  $\mu_i$  es el coeficiente canónico e  $Y_i$  son las variables independientes medidas.

El número máximo de funciones discriminantes canónicas generadas es igual al número de tratamientos menos uno. En este trabajo, el número de funciones canónicas discriminantes resultante fue tres (3) en cada serie de suelo, debido a que fueron seleccionados cuatro tratamientos (4 sistemas de uso).

La distancia de Mahalanobis ( $D^2$ ), definida como el cuadrado de la distancia entre las medidas de los valores estandarizados de Z (centros), fue utilizada para verificar si existían diferencias significativas entre los tratamientos. De esa forma, cuanto mayor el valor de  $D^2$ , mayor la distancia entre las medias de los dos tratamientos considerados. El centro de cada tratamiento representa el valor medio discriminante de los individuos de cada tratamiento. El estadístico lambda de Wilk's fue usado para evaluar si las funciones discriminantes canónicas contribuyeron significativamente en la separación de los tratamientos.

El número de variables canónicas estadísticamente significativas, en cada serie de suelo, fue evaluado por medio del cociente de verosimilitud ("Likelihood Ratio Test", LRT), siendo que la contribución relativa de cada variable fue obtenida a partir de las raíces características.

Los coeficientes canónicos estandarizados fueron utilizados para evaluar la contribución de cada variable independiente en cada función canónica. El valor de cada coe-

ficiente indica el poder de separación (o discriminación) de los tratamientos de la variable que está siendo considerada. Cuando los coeficientes son graficados en un sistema de coordenadas cartesianas, la dirección y el sentido de esos coeficientes (vectores) indican el grado de asociación entre cada variable y los tratamientos.

Para evaluar el poder de discriminación de las funciones canónicas obtenidas, en lo que respecta a los sistemas de uso estudiados fue efectuado un análisis de varianza con los valores medios de las funciones canónicas obtenidas, para cada serie de suelos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Resultados del ANOVA*

Los valores obtenidos de cada una de las variables estudiadas, en las dos series de suelos, fueron sometidos a análisis exploratorios de datos siguiendo los procedimientos des-

criptos por Afifi y Clark (1996). Los resultados demostraron que ninguna variable presentó desvíos significativos con relación a los principios de normalidad y homocedasticidad, indicando ausencia de limitaciones para la realización del análisis de la varianza de los datos.

Los resultados del análisis de varianza de las variables estudiadas, las medias para cada sistema de uso y los valores de F, son mostrados en las Tablas 1 (Argiudol Ácuico) y 2 (Argiudol Típico). Los valores para la variable  $Al^{+3}$  no fueron incluidos debido a que los suelos estudiados presentaron ausencia de ese elemento. Los valores de F indican cuales fueron los atributos químicos más sensibles a los efectos de los sistemas de uso de la tierra. En el Argiudol Ácuico, las variables más sensibles a los efectos de manejo ( $p < 0,001$ ) fueron pH, MO, P, K, Cu, Mn, B y Na, mientras que en el Argiudol Típico fueron pH, P, K, H, S, %S/T, Cu, Mn, Fe y B.

TABLA 1. Resumen del análisis de varianza de las variables medidas en el Argiudol Ácuico.

Argiudol Ácuico						
Variable	Ag	Gi	Ge	Vn	F	p<F
pH	5,2 ab	5,0 b	5,3 a	5,6 c	26,29	0,0001
MO(g dm <sup>-3</sup> )	19,3 a	20,9 a	23,6 a	34,5 b	11,18	0,0001
P(mg dm <sup>-3</sup> )	19,2 a	15,7 a	13,7 a	89,7 b	51,30	0,0001
K(mmolc dm <sup>-3</sup> )	8,9 a	9,9 a	12,7 b	17,6 c	36,31	0,0001
Ca(mmolc dm <sup>-3</sup> )	93,8 a	97,8 a	104,7 a	105,8 a	1,01	0,4002
Mg(mmolc dm <sup>-3</sup> )	23,0 a	25,2 a	23,8 a	24,7 a	0,45	0,7196
H+Al(mmolc dm <sup>-3</sup> )	26,2 a	28,3 a	27,8 a	32,9 a	0,25	0,8633
S-SO <sub>4</sub> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	16,8 a	11,9 a	16,9 a	16,3 a	1,63	0,2033
%S/T	82,0 a	82,5 a	83,4 a	83,6 a	0,12	0,9452
Cu(mg dm <sup>-3</sup> )	2,4 a	2,4 a	2,0 b	1,6 c	20,38	0,0001
Zn(mg dm <sup>-3</sup> )	0,9 ab	0,7 b	0,7 b	1,2 a	3,13	0,0375
Mn(mg dm <sup>-3</sup> )	47,7 a	53,5 b	49,6 ab	29,1 c	31,17	0,0001
Fe(mg dm <sup>-3</sup> )	58,2 a	60,9 a	58,3 a	45,4 b	3,66	0,0213
B(mg dm <sup>-3</sup> )	0,6 a	0,7 ab	0,9 b	1,1 c	13,44	0,0001
Na(mg dm <sup>-3</sup> )	37,0 a	45,8 a	72,5 b	46,0 a	11,56	0,0001

Medias seguidas por la misma letra, en cada fila, no difieren significativamente a nivel de 5%, por el test LSD.

TABLA 2. Resumen del análisis de varianza de las variables medidas en el Argiudol Ácuico.

Variable	Argiudol Típico					
	Ag	Gi	Ge	Vn	F	p<F
pH	5,2 a	5,1 ab	5,0 b	4,7 c	21,05	0,0001
MO(g dm <sup>-3</sup> )	20,4 a	25,8 ab	23,9 a	30,2 b	4,62	0,0078
P(mg dm <sup>-3</sup> )	13,4 a	51,7 b	24,2 a	79,6 c	16,88	0,0001
K(mmolc dm <sup>-3</sup> )	7,8 a	13,7 b	10,9 c	12,1 ab	14,19	0,0001
Ca(mmolc dm <sup>-3</sup> )	76,0 a	84,1 ab	79,3 ab	87,9 b	2,18	0,1067
Mg(mmolc dm <sup>-3</sup> )	18,4 ab	20,8 a	18,3 ab	16,9 b	2,36	0,0873
H+Al(mmolc dm <sup>-3</sup> )	22,7 a	33,3 b	32,3 b	48,2 c	28,95	0,0001
S-SO <sup>4</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	10,3 a	18,0 b	15,9 b	28,7 c	17,92	0,0001
%S/T	81,6 a	77,8 b	77,0 b	70,8 c	14,61	0,0001
Cu(mg dm <sup>-3</sup> )	1,4 a	2,3 b	2,0 c	2,2 bc	25,45	0,0001
Zn(mg dm <sup>-3</sup> )	0,5 a	0,9 a	0,8 a	1,5 b	5,74	0,0026
Mn(mg dm <sup>-3</sup> )	37,1 a	46,1 bc	49,5 b	42,8 ac	6,90	0,0009
Fe(mg dm <sup>-3</sup> )	42,8 a	80,1 b	64,2 b	105,9 c	16,46	0,0001
B(mg dm <sup>-3</sup> )	0,5 a	0,8 b	0,7 ab	1,3 c	21,21	0,0001
Na(mg dm <sup>-3</sup> )	23,9 a	31,5 ab	34,0 bc	23,2 a	2,88	0,0491

Medias seguidas por la misma letra, en cada fila, no difieren significativamente a nivel de 5%, por el test LSD.

El análisis de varianza (Tabla 1 y 2) indicó que, en los dos suelos estudiados, ninguna de las variables seleccionadas consiguió, en forma independiente, discriminar los cuatro sistemas de uso. El test de comparación de medias discriminó, como máximo, tres sistemas de uso de las tierras. Eso ocurrió por medio de las variables pH, K, Cu, Mn y B para el Argiudol Ácuico y, a través del pH, H, S, %S/T, Cu, P, K, Fe y B para el Argiudol Típico.

Para el Argiudol Ácuico, el sistema de vegetación virgen (Vn) fue separado de los otros sistemas a través de las siguientes variables: pH, P, MO, K, Cu, Mn, Fe e B, mientras que para el Argiudol Típico, esa separación ocurrió por medio de las variables pH, P, H, S, %S/T, Zn, Fe e B. En el Argiudol Típico, los sistemas de uso Ag, Ge, y Gi fueron discriminados únicamente por el K, mientras que en el Argiudol Ácuico, ningún atributo químico fue eficiente para separar esos sistemas.

En los dos suelos estudiados, la actividad agropecuaria (Ag, Ge y Gi) provocó reduc-

ción significativa en los contenidos de P, MO y Zn, en relación con los valores encontrados en el sistema Vn. La disminución significativa del tenor de MO verificado en los sistemas Ag, Ge y Gi y, principalmente, en el Argiudol Ácuico es un indicador de degradación del suelo la que, aparentemente, fue inducida por la actividad agropecuaria. La reducción del contenido de nutrientes en los suelos y la degradación de los atributos físicos, generada por intensificación de los sistemas de uso, son mencionadas en varios trabajos (Constantini et al., 1996; Maddonni et al., 1999; Quiroga et al., 1998), inclusive en la área estudiada (Orellana y Pilatti, 1994; Orellana et al., 1997; Imhoff et al., 1996). Mayores contenidos de Cu y Mn pueden estar relacionados con los menores contenidos de MO, ya que la mineralización de la MO libera esos cationes metálicos, los que generalmente se encuentran adsorbidos en los sitios de intercambio catiónico (Marschner, 1995) o complejados. De forma semejante, los menores contenidos de S en el Argiudol Típico pueden estar rela-

cionados con la disminución de MO de ese suelo. La reducción de los valores de pH, verificada en el Argiudol Ácuico, puede estar asociada con la disminución del contenido de bases, posiblemente debido a la extracción realizada por los cultivos.

Los resultados indican que el ANOVA no permitió identificar atributos químicos que posibiliten una separación eficiente de los cuatro sistemas analizados, a pesar de haber detectado la ocurrencia de alteraciones en los niveles de algunos de ellos en las dos series de suelos estudiadas.

**Resultados del ADC**

El análisis discriminante canónico permitió definir funciones canónicas que posibi-

litaron la separación de los cuatro sistemas de uso de las tierras. Eso puede ser verificado por medio de las distancias de Mahalanobis ( $D^2$ ), mostradas en la Tabla 3.

Los valores de  $D^2$  indicaron que las mayores distancias ocurrieron entre Ge e Vn, para el Argiudol Ácuico y, entre Ag y Vn, para el Argiudol Típico. Considerando los sistemas agropecuarios, las mayores distancias fueron constatadas entre Ag y Ge y, entre Ag y Gi, para el Argiudol Ácuico y Típico, respectivamente. En la Tabla 4 los niveles de probabilidad para  $D^2$  demuestran que las medias multivariadas fueron diferentes entre los sistemas de manejo.

Las distancias entre los sistemas Ag y Gi y, entre Gi y Ge, para el Argiudol Ácuico,

TABLA 3. Valores de la distancia Mehalanobis ( $D^2$ ) entre los sistemas de uso de las tierras.

Argiudol Ácuico				
Uso	Ag	Gi	Ge	Vn
Ag	0	16,1449	54,3221	118,9014
Gi	16,1449	0	20,9481	116,3801
Ge	54,3221	20,9481	0	136,4869
Vn	118,9014	116,3801	136,4869	0
Argiudol Típico				
Uso	Ag	Gi	Ge	Vn
Ag	0	65,0529	38,7877	134,1986
Gi	65,0529	0	18,4041	44,6498
Ge	38,7877	18,4041	0	53,8367
Vn	134,1986	44,6498	53,8367	0

TABLA 4. Niveles de probabilidad para la distancia de Mahalanobis ( $D^2$ ).

Argiudol acuico				
Uso	Ag	Gi	Ge	Vn
Ag	1,0000	0,0057	0,0001	0,0001
Gi	0,0057	1,0000	0,0011	0,0001
Ge	0,0001	0,0011	1,0000	0,0001
Vn	0,0001	0,0001	0,0001	1,0000
Argiudol Típico				
Uso	Ag	Gi	Ge	Vn
Ag	1,0000	0,0001	0,0001	0,0001
Gi	0,0001	1,0000	0,0026	0,0001
Ge	0,0001	0,0026	1,0000	0,0001
Vn	0,0001	0,0001	0,0001	1,0000

fueron relativamente pequeñas, siendo significativas apenas a nivel de  $p < 0,001$  y  $p < 0,01$ , respectivamente. Para el Argiudol Típico, la menor distancia ocurrió entre Gi y Ge, que fue significativa apenas a nivel de 5% de probabilidad.

La discriminación de los sistemas de uso, comprobada por los valores de  $D^2$ , es consecuencia de los diferentes contenidos de nutrientes existentes en los diversos suelos. Los mayores valores de  $D^2$  entre los sistemas cultivados (Ag, Ge y Gi) y el sistema de vegetación virgen (Vn) sugieren que los tres sistemas de manejo provocaron degradación de las propiedades químicas de los suelos analizados, aunque con diferencias de magnitud entre ellos en lo que respecta a la pérdida de fertilidad.

En el Argiudol Ácuico, la mayor distancia entre Vn y Ge indica que este sistema provocó una degradación más intensa de los atributos químicos, cuando se compara con los sistemas Ag y Gi. Una posible explicación para esos resultados es que en el sistema Ge, por ser un sistema de pastoreo extensivo realizado sin aplicación de fertilizantes ni rotación de los animales, existe una gran exportación de nutrientes fuera de los potreros y/o, en algunos casos, concentración de nutrientes en ciertas áreas (por ejemplo cerca de bebederos) (Haynes y Willians, 1993). Los sistemas Ag y Pi provocaron menor degradación de las propiedades químicas debido, posiblemente, a un mayor reciclado de nutrientes vía residuos de cosecha, rotación de cultivos, pastoreo rotativo y deyecciones de los animales.

En el caso del Argiudol Típico, la pérdida de calidad del suelo, mayor en el sistema Ag, puede estar asociada a la realización prolongada de la secuencia de cultivos trigo / soja, sin fertilización. La proximidad de los sistemas Ge y Gi con el sistema Vn es un reflejo de la mejora en las propiedades químicas del suelo provocada por la incorporación de fertilizantes, la que fue mayor en el sistema Gi. Mayor degradación de la calidad

del recurso suelo con la intensificación de los sistemas fue mencionada por varios autores (Constantini et al., 1996; Imhoff et al., 1996; Maddoni et al., 1999; Michelena et al., 1989).

El estadístico lambda de Wilk's indicó que las funciones canónicas contribuyeron significativamente para la separación de los diversos sistemas de manejo, en los dos suelos (Argiudol Ácuico: Wilk's lambda = 0,0025,  $F = 9,554$ ,  $p > F = 0,001$ ; Argiudol Típico: Wilk's lambda = 0,0033,  $F = 8,6010$ ,  $p > F = 0,001$ ).

La correlación canónica al cuadrado demostró que, para los dos suelos, las dos primeras funciones (Can 1 y Can 2) están altamente correlacionadas con los atributos químicos analizados. Cuando se observó la proporción de las raíces características y la proporción acumulada de las raíces características (Tabla 5) se verificó que las dos primeras funciones representan 97% y 93% de la varianza total para el Argiudol Ácuico y el Argiudol Típico, respectivamente. La primera función canónica (Can 1) explicó 74% (Argiudol Ácuico) y 77% (Argiudol Típico) de esa varianza. Estos resultados coinciden con la premisa básica del ADC, que establece que las primeras funciones canónicas deben expresar la máxima variación entre los tratamientos (Afifi y Clark, 1994).

Los resultados del teste LRT (Tabla 5) demostraron que, para el Argiudol Ácuico, solamente las funciones Can 1 y Can 2 fueron significativas ( $p < 0,0001$ ). Sin embargo, para el Argiudol Típico la función Can 3 también fue significativa ( $p = 0,0052$ ). Como esa función explicó apenas 7% de la varianza de los datos, no fue incluida en este estudio. El análisis de varianza de las funciones canónicas Can 1 y Can 2 (Tabla 5) también demostró que sólo las dos primeras funciones canónicas realizaron una mejor separación de los sistemas de manejo. Para el Argiudol Ácuico, las funciones canónicas Can 1 y Can 2 separaron tres sistemas, siendo que la función Can

TABLA 5. Análisis discriminante canónico de los sistemas de uso en los dos suelos estudiados

Función Canónica	Eigenvalue	Proporción del autovalor	Proporción acumulada del autovalor	Cuadrado de la correlación canónica	Likelihood Ratio Test	p>F
Argiudol Ácuico						
Can 1	23,81	0,74	0,74	0,96	0,0025	0,0001
Can 2	7,45	0,23	0,97	0,88	0,0624	0,0001
Can 3	0,89	0,03	1,00	0,47	0,5273	0,1380
Argiudol Típico						
Can 1	19,02	0,77	0,77	0,95	0,0037	0,0001
Can 2	3,83	0,16	0,93	0,79	0,0739	0,0001
Can 3	1,81	0,07	1,00	0,64	0,3563	0,0052

3 discriminó apenas dos sistemas. Para el suelo Argiudol Típico, la Can 1 fue capaz de separar los cuatro sistemas de uso estudiados, mientras que la Can 2 diferenció tres sistemas y la Can 3 solamente dos.

La contribución de las variables (atributos químicos) a las dos primeras funciones canónicas (Can 1 y Can 2) es mostrada a través de los coeficientes canónicos estandarizados, presentados en la Tabla 7. Estos coeficientes reflejan la contribución conjunta de las variables analizadas para cada función canónica (Rencher, 1992) e, individualmente, indican la importancia relativa de cada variable.

La distribución espacial de los valores de Z para cada muestra analizada y la posición de los centros, establecidos a partir de las

propiedades químicas medidas, demuestran una diferente separación entre los sistemas de uso estudiados (Figuras 1 y 2).

La asociación entre los coeficientes canónicos estandarizados de las variables analizadas y los sistemas de uso de la tierra es mostrada en las Figuras 1 y 2. En esas Figuras, las variables estudiadas y los valores de los centros de cada sistema de uso fueron proyectados en un espacio definido por las funciones canónicas Can 1 y Can 2. La dirección de los vectores indica la asociación de cada variable con un sistema de manejo, o sea, cada vector apunta para el sistema que posee el mayor nivel medio para esa variable en dicho espacio. La magnitud de cada vector muestra la importancia de cada atributo químico

TABLA 6. Valores medios de las funciones canónicas para los cuatro sistemas de uso de las tierras.

Función Canónica	Argiudol Ácuico			
	Uso			
	Ag	Gi	Ge	Vn
Can 1	- 2,11 b	- 2,67 bc	- 3,20 c	7,99 a
Can 2	- 3,64 c	- 0,37 b	3,64 a	0,37 b
Can 3	- 0,81 b	1,46 a	- 0,66 b	0,01 b
Argiudol Típico				
Can 1	5,88 a	- 0,97 c	0,77 b	- 5,68 d
Can 2	- 1,44 c	2,79 a	0,55 b	- 1,89 c
Can 3	- 0,78 b	- 1,05 b	2,16 a	- 0,33 b

Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente a nivel de 5%, por el test LSD.

TABLA 7. Coeficientes canónicos estandarizados de los atributos químicos evaluados.

Variable	Argiudol Ácuico		Argiudol Típico	
	Can 1	Can 2	Can 1	Can 2
pH	-0,14	-0,02	0,95	-0,16
MO	1,16	1,30	0,23	0,46
P	3,86	-0,18	-1,13	0,76
K	2,08	0,67	-0,95	1,60
Ca	-0,84	0,22	-3,39	0,26
Mg	-0,34	-0,77	1,42	0,29
H+Al	1,13	1,10	6,46	-3,44
S-SO <sub>4</sub>	-0,06	-0,61	-2,01	0,10
%S/T	1,44	0,92	6,38	-2,11
Cu	2,50	-1,81	-2,21	1,05
Zn	-2,20	-1,61	2,24	-0,75
Mn	-1,93	1,34	0,45	-0,38
Fe	-0,14	1,17	1,06	0,24
B	-0,36	0,25	-0,87	-1,33
Na	-0,22	1,48	0,06	0,84

mico (variable) como factor de discriminación de los sistemas de uso.

En el Argiudol Ácuico (Fig.4), las propiedades químicas que más contribuyeron para la discriminación de Vn de los demás sistemas de manejo fueron P, Cu, K, %S/T, MO y H. Los atributos más relevantes en la separación de Ge de los sistemas Ag y Gi fueron Mn, Na y Fe, mientras que Ag y Gi fueron separados por el Zn. En el Argiudol Típico (Fig. 3), la

magnitud de los vectores %S/T, H y Zn indica que esas fueron las propiedades químicas más importantes para separar el sistema Ag de los demás, mientras que Mg y Na fueron efectivos para discriminar el sistema Ge del sistema Ag. Los sistemas Vn y Gi fueron separados de los otros sistemas por Ca, Cu, K, S, P y B. Entretanto, este último nutrimento fue la variable más importante para separar el sistema Vn de los demás.

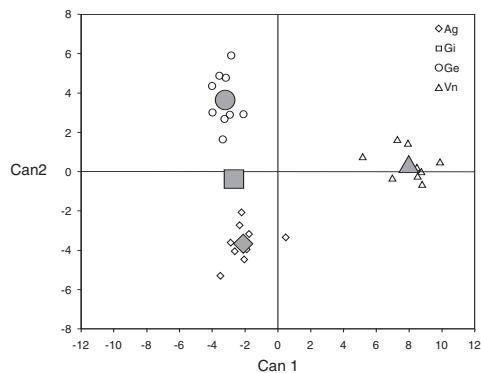


FIGURA 1. Observaciones individuales de las dos primeras funciones discriminantes canónicas y posición de los centros para cada sistema de uso de las tierras en el Argiudol Ácuico (Serie Humboldt).

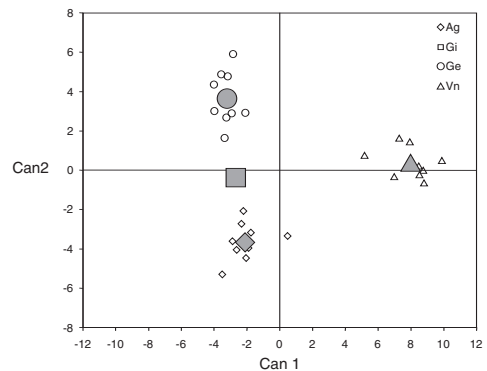


FIGURA 2. Observaciones individuales de las dos primeras funciones discriminantes canónicas y posición de los centros para cada sistema de uso de las tierras en el Argiudol Típico (Serie Rincón de Ávila).

En general, los resultados sugieren que P, K y Ca, y Zn y Cu fueron los macro y micro-nutrientes más sensibles a las condiciones de manejo. Estos resultados coinciden con los

encontrados por otros autores. Así, por ejemplo, la intensificación de los sistemas de manejo ocasionó mayor alteración del contenido de P (Vásquez et al., 1991) y, de P, K,

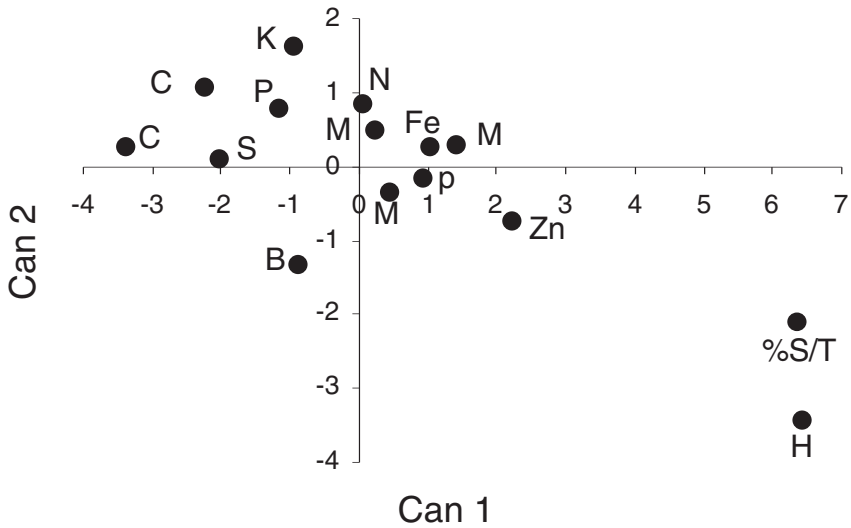


FIGURA 3. Contribución relativa de las variables estudiadas para la discriminación de los sistemas de uso de las tierras en el Argiudol Típico (Serie Rincón de Ávila).

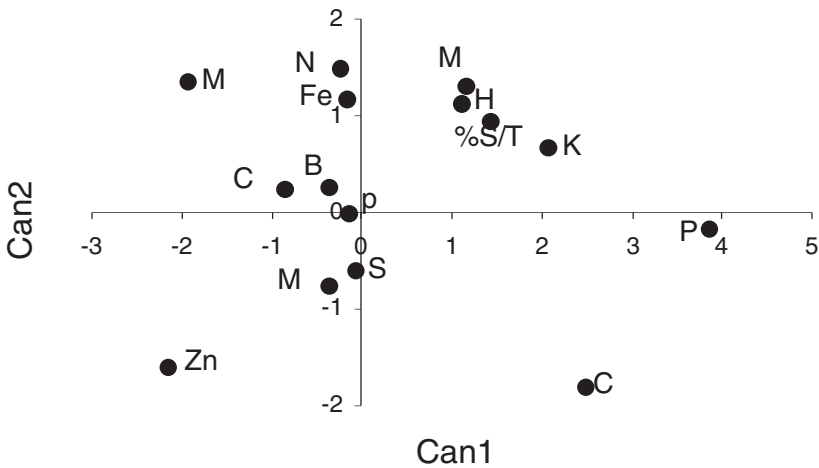


FIGURA 4. Contribución relativa de las variables estudiadas para la discriminación de los sistemas de uso de las tierras en el Argiudol Ácuico (Serie Humboldt).

Mg, B, Zn y nitrógeno total (Maddoni et al., 1999). Los resultados parecen indicar que P, K, Mg, Ca, Zn, Cu y B podrían ser utilizados como indicadores de calidad de suelo para Argiudoles.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio muestran que el ADC identificó mayor número de variables útiles para discriminar los sistemas Ag, Ge, Gi y Vn con relación al análisis ANOVA. Esto indica que este último tipo de análisis estadístico posee una capacidad limitada para separar diversos sistemas de uso de las tierras a partir de la información brindada por análisis de los atributos químicos del suelo. El ADC parece ser una técnica estadística más efectiva para el estudio de sistemas complejos, especialmente cuando utilizada en estudios similares al presentado en este trabajo, lo que ya fue señalado por otros autores (Cruz-Castillo et al., 1994; Maddoni et al., 1999; Ortega et al., 1998; Quiroga et al., 1998). El ADC puede ser aplicado, con ventajas sobre el ANOVA, para identificar los atributos más sensibles a las prácticas de manejo, facilitando la elección de indicadores de calidad de los suelos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Profesores de la Fac. de Ciencias Agrarias (UNL) Ghiberto, Orellana y Quaino por las sugerencias y correcciones realizadas.

## REFERENCIAS

Afifi, A.A. y Clark, V. (1996): *Computer-Aided Multivariate Analysis*. 3ed. Chapman & Hall, London, 455 p.  
Benites, J., Saintraint, D., Morimoto, K. (1994): Degradación de tierras y producción agrícola en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay. En <<Erosión

de suelos en América Latina>>, Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe (Eds.). Santiago, Chile, 219 p.

- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H., Pierce, F.J. (1997): Concepts of soil quality and their significance. En <<Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25>>, E.E. Gregorich and M.R. Carter (Eds), Amsterdam, 21-58.  
Costantini, A., Cosentino, D., Segat, A. (1996): Influence of tillage systems on biological properties of a Typic Argiudoll soil under continuous maize in central Argentina. *Soil Tillage Res.* 38, 265-271.  
Cursak de Castigniani, A.M., Guiguet, E., Bevilacqua, M., Giorgis, R., Correnti, M., Ramunno, J.N., Alesso, J.C. (1994): Caracterización del Departamento Las Colonias (Pcia de Santa Fe). Rafaela, Comisión de Desarrollo Tecnológico Agropecuario (CODETEA), 27 p.  
Cruz-Castillo, J.G., McKay, R., Lawes, G.S., Woolley, D.J. (1992): Canonical discriminant analysis in kiwifruit rootstock research. *Acta Horticulturae* 313, 143-148.  
Cruz-Castillo, J.G., Ganeshanandam, S., Mackay, B.R., Lawes, G.S., Lawoko, C.R.O., Woolley, D.J. (1994): Applications of Canonical Discriminant Analysis. *Hortscience* 29, 1115-1119.  
Derksen, D.A., Lafond, G.P., Thomas, A.G., Loeppky, H.A., Swanton, C.J. (1993): Impact of agronomic practices on weed communities: Tillage Systems. *Weed Sci.* 41, 409-417.  
Donahue, J.K. y Upton, J.L. (1996): Geographic variation in leaf, cone and seed morphology of *Pinus Greggii* in Native Forests. *For. Ecol. Manag.* 82, 145-157.

- Gilbert, R.P., Bailey, D.R.C., Shannon, N.H. (1993): Linear body measurements of cattle before and after 20 years of selection for postweaning gain when fed two different diets. *J. Anim. Sci.* 71, 1712-1720.
- Hatcher, L. y Stepanski, E.J. (1994): A step by step approach to using the SAS system for univariate and multivariate statistical analysis. SAS Institute Inc., Cary, NC, 552 p.
- Haynes, R.J. y Williams, P.H. (1993): Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv. Agronomy* 49, 119-199.
- Heil, D. y Sposito, G. (1997): Chemical attributes and processes affecting soil quality. In <<Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25>>, E.E. Gregorich and M.R. Carter (Eds), Amsterdam, 59-79.
- Imhoff, S., Pilatti, M.A., Sosa, M.E. (1996): Nitrógeno orgánico en Molisoles del centro de Santa Fe. *Rev. Fac. Agr. y Vet. Esperanza, UNL* 9, 10-18.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (1991): Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3160-25 y 26, Esperanza-Pilar. INTA, Rafaela, 135 p.
- Maddonni, G.A., Urricariet, S., Ghera, C., Lavado, R. (1999): Assessing soil quality in the rolling Pampa, using soil properties and maize characteristics. *Agron. J.* 91, 280-287.
- Manly, B.F.J. (1994): Multivariate Statistics Methods - A Primer. 2ed., Chapman & Hall, London, 226 p.
- Marschner, H. (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants. 2ed. Acad. Press Limited, London, 889 p.
- Michelena, R.O., Irurtia, C.B., Vavruska, F.A., Mon, R., Pittaluga, A. (1989): Degradación de suelos en el Norte de la Región Pampeana. En <<Proyecto de Agricultura Conservacionista. Centros Regionales de Buenos Aires Norte, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe>>. INTA (eds), *Publ. Técnica* 6.
- Mosconi, F., Priano, L., Hein, N., Moscatelli, G., Salazar, J.L., Gutierrez, T., Caceres, L. (1981): Mapa de Suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG, 246 p.
- Nolin, M.C., Wang, C., Caillier, M.J. (1989): Based on selected soil characteristics of the plow layer. *Can. J. Soil Sci.* 69, 525-541.
- Orellana, J. y Pilatti, M.A. (1994): La estabilidad de los agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Cía. Suelo* 12, 75-80.
- Orellana, J., Pilatti, M.A., Grenón, D.A. (1997): Soil quality: an approach to physical state assesment. *J. Sust. Agric.* 9, 91-108.
- Ortega, I.M., Soltero-Gardea, S., Bryant, F.C., Drawe, D.L. (1997): Evaluating grazing strategies for cattle: deer and cattle food partitioning. *J. Range Manag.* 50, 622-630.
- Pilatti, M.A. y Grenón, D.A. (1994). La profundidad enraizable de los suelos. Su estimación a partir de información edáfica. *Rev. Fac. Agr. y Vet. Esperanza, UNL*, C-003-AD-003, 29 p.
- Quiroga, A.R., Buschiazio, D.E., Peinemann, N. (1998): Management discriminat properties in semiarid soils. *Soil Sci.* 163, 591-597.
- Raij, B. van. (1998): Bioavailable test: alternatives to standardt soil extractions. *Commun. Soil Sci. Plan.* 29, 1553-1570.
- Rencher, A.C. (1992): Interpretation of canonical discriminat functions, canonical variates and principal components. *Am. Statistician* 46, 217-225.
- Statistical Analysis System Institute. (1991): Sas/Stat Procedure Guide for Personal Computers. Version 5 ed. Sas Inst., Cary, Nc., 1104 p.
- Vaselli, O., Buccianti, A., de Siena, C., Bini, C., Coradossi, N., Angelone, M. (1997):

- Geochemical characterization of ophiolitic soils in a temperate climate: a multivariate statistical approach. *Geoderma* 75, 117-133.
- Webster, R. y Oliver, M.A. (1990): Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press, New York, 316 p.
- Wit, J., Oldenbroek, H., Van Keulen, H., Zwart, D. (1995): Criteria for sustainable livestock production: a proposal form implementation. *Agric. Ecosyst. Env.* 53, 219-229.