



## ANÁLISIS MULTIVARIANTE EN LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA LA AGRICULTURA EN EL VALLE Y ALTIPLANO BOLIVIANO

Received 06 16 2021  
Accepted 08 24 2021  
Published 08 30 2021

Vol. 38, No.3, pp. 126-132, Jul./Aug.2021  
Revista Boliviana de Química

38(3), 126-132, Jul./Aug. 2021  
Bolivian Journal of Chemistry  
DOI: 10.34098/2078-3949.38.3.4



Full original article

Peer-reviewed

Rolando Mamani Quispe<sup>1</sup>, Oswaldo E. Ramos Ramos<sup>1,\*</sup>, Jorge Chungara Castro<sup>2</sup>; Leonardo Guzmán Alegría<sup>1</sup>

1. Hydrochemistry laboratory, Chemical Sciences Department, Instituto de Investigaciones Químicas IIQ, School of Pure and Natural Sciences FCPN, Universidad Mayor de San Andrés UMSA, P.O. Box 303, Calle Andrés Bello s/n Edificio IIQ, Campus Cota Cota, Phone +59122795878, La Paz, Bolivia, <http://cienciasquimicas.umsa.bo/>
2. Agencia Boliviana de Energía Nuclear ABEN, Centro de Investigación y Aplicaciones Nucleares CIAN, Calle Jaime Mendoza Nro. 987, Esq. Peñaranda, Edificio Torre Soleil (Calacoto), Phone 59122127178, fax 59122129754, <http://www.aben.gob.bo/es/contacto>, [comunicacion@aben.gob.bo](mailto:comunicacion@aben.gob.bo)

**Keywords:** *Statistical assessment, Soils, Discriminant and factorial analysis*

**Palabras clave:** *Evaluación estadística, Suelos, Análisis discriminante y factorial*

### ABSTRACT

The soil is one of the most important resources for life on the planet. In that sense, this study proposes a discriminant and factorial analysis of the chemical parameters in different soils. The assessment of eleven physicochemical parameters was carried out in soil samples from two communities: Yamora and Viacha, both located in La Paz (Bolivia), and both with different soils characteristics, as a basis for the classification of soils for its use in agriculture. It was found that the discriminant function is represented by five parameters: Nitrogen, Phosphorus, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> and Mg<sup>2+</sup> contents. The factorial analysis shows that the main components are functions of two groups of parameters, one with a positive correlation and the other with a negative correlation. These functions allow the characterization of the soils and their chemical fertility.

\*Correspondent autor: [oramos@fcpn.edu.bo](mailto:oramos@fcpn.edu.bo)



## RESUMEN

El suelo constituye uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. En ese sentido, este trabajo plantea un análisis discriminante y factorial de los parámetros químicos en diferentes suelos. Se realizó el análisis de 11 parámetros fisicoquímicos en muestras de suelos provenientes de dos comunidades: Yamora y Viacha, ambas localidades ubicadas en el Departamento de La Paz (Bolivia) y con características diferentes de suelos en base a su clasificación de suelos para uso en la agricultura. Se ha encontrado que la función discriminante está representada por cinco parámetros: Contenido de Nitrógeno, Fósforo,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . El análisis factorial muestra que los componentes principales son funciones de dos grupos de parámetros, uno con correlación positiva y otro con correlación negativa. Estas funciones permiten caracterizar los suelos y su fertilidad química.

## INTRODUCCIÓN

El suelo constituye uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta ya que es la base fundamental para las actividades agrícolas, pecuarias y forestales. La producción de alimentos depende en un alto porcentaje de la calidad de los suelos utilizados [1]. La calidad de los suelos está definida como la capacidad para funcionar dentro los límites de un ecosistema natural o intervenido, con el fin de sostener la productividad vegetal y animal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, preservando la salud humana [2].

El correcto manejo de suelos para propósitos de agricultura pasa por determinar y caracterizar correctamente los suelos, por lo cual se requiere tener una forma sistemática de clasificación y caracterización de éstos. Esta clasificación puede ser obtenida a partir de un análisis discriminante de los resultados de los parámetros analizados y un análisis factorial.

El análisis del suelo no solo busca cuantificar el contenido total del elemento y/o compuesto, sino también determinar el contenido asimilable para la planta en una gran variedad de tipos de suelos con características físicas y químicas diferentes. Una forma de evaluar los suelos es midiendo su calidad y para ello suelen utilizarse ciertas propiedades físicas, químicas y biológicas, que funcionan como indicadores [3].

El presente trabajo plantea un análisis discriminante y análisis factorial en los parámetros químicos: pH en  $\text{H}_2\text{O}$ , pH en solución de KCl, Conductividad Eléctrica (CE), Acidez de cambio, Nitrógeno Total, Materia Orgánica (MO), Fósforo Asimilable y Cationes Intercambiables ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) que nos ayudara a realizar un trabajo de evaluación con ayuda de parámetros estadísticos, con el propósito de encontrar una función discriminante de combinación lineal de los parámetros más adecuados para la clasificación de suelos y su fertilidad química.

## EXPERIMENTAL

### *Materiales y reactivos*

Los reactivos empleados en el estudio fueron de la más alta calidad para análisis (p.a.) utilizados por el CIAN en trabajos de análisis de suelos y los equipos e instrumentos usados para las determinaciones fueron calibrados adecuadamente siguiendo protocolos institucionales [4].

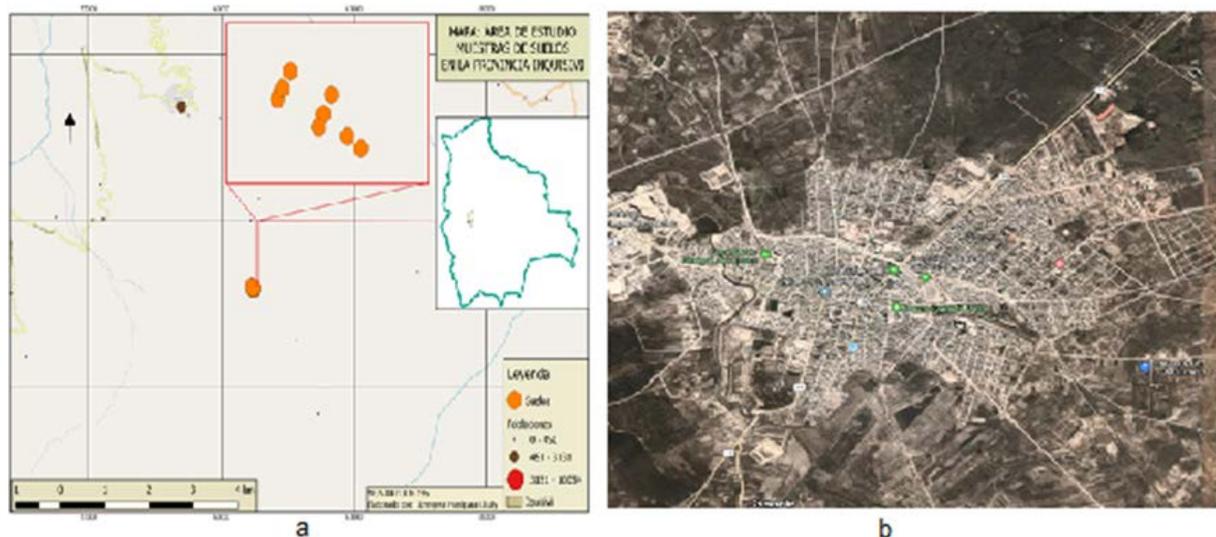
### *Área de Estudio*

Las muestras provienen del valle interandino (Inquisivi) y del Altiplano Norte (Viacha) del Departamento de La Paz (Bolivia). El primer muestreo se realizó en el Municipio de Inquisivi Ira. Sección. Se encuentra situada entre las coordenadas: 66°43'29'' y 67°17'58'' longitud Oeste, 15°47'34'' y 17°18'20'' latitud Sur y a una altura promedio de 2840 m sobre el nivel del mar (s. n. m.). El área de estudio está ubicado en la comunidad de Yamora. El segundo muestreo se realizó en el municipio de Viacha a 32 km de la ciudad de La Paz en el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN), situado entre las coordenadas: 68°16'56'' y 68°22'72'' de longitud Oeste y 16°32'39'' y 16°54'44'' latitud Sur localizado en el Altiplano Norte con una altitud promedio de 4070 m s. n. m. (Figura 1).

### *Muestreo y preparación de la muestra*



Se han tomado 10 muestras de suelos en la comunidad de Yamora (provincia Inquisivi) y otras 10 muestras de suelos de la comunidad de Viacha, ambos en el departamento de La Paz (Bolivia). Se han analizado 11 parámetros (pH en



**Figura 1.** Localización de los puntos de muestreo: a) comunidad de Yamora, Municipio de Inquisivi b) Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN-Viacha).

H<sub>2</sub>O, pH en solución 1 N de KCl, Conductividad Eléctrica (CE), Acidez de cambio (H + Al), Nitrógeno Total, Materia Orgánica (MO), Fósforo Asimilable y Cationes Intercambiables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>). Los resultados de estos análisis sirvieron como base para un análisis discriminante tomando como variable categórica dependiente “Comunidad” con dos grupos Yamora y Viacha, y como variables numéricas independientes los 11 parámetros químicos de los análisis de suelos. Además, los resultados sirvieron para el análisis factorial con rotación Varimax y normalización Kaiser con ayuda del programa estadístico SPSS (v. 22).

La toma de la muestra fue realizada de una porción de suelo de 1 m de ancho, 1 m de largo y una profundidad de 20 cm. Se tomó una cantidad de 1,5 kg de suelo de cada porción, eliminando la vegetación de cada muestra. Las muestras fueron secadas a una temperatura de 100°C. Luego, las muestras fueron tamizadas con una malla de 1 mm para el análisis de parámetros fisicoquímicos y fueron sometidos a un proceso de homogenización, de ésta manera se obtuvo la muestra para análisis.

### **Caracterización de las muestras**

Se realizó las determinaciones de: pH en solución de KCl [5], Conductividad eléctrica (CE) [5], Acidez de cambio [5,6], Nitrógeno total [7], Materia orgánica [8], Fósforo asimilable [9,10], y Cationes intercambiables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) [9]. La metodología de las determinaciones está descrita en detalle del artículo Mamani et al., 2019 [4].

### **Análisis estadístico multivariado**

El procesamiento de la información se realiza a través de técnicas de análisis estadístico multivariado. Escobar y Berdegué (1990) señalan a estas técnicas como herramientas idóneas para la determinación de sistemas de modelos productivos a nivel de predios, ya que el concepto de sistema de predio es multivariado porque su esencia está compuesta por varios componentes interactuando en el tiempo y en el espacio, así como en relación con suprasistemas de diversa naturaleza [11].

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La evaluación no toma en cuenta las condiciones ambientales de Yamora ni de Viacha, solo se realiza en función de los parámetros químicos para la evaluación de la fertilidad desde el punto de vista químico de los suelos (Tabla 1).



**Tabla 1.** Resultados de los análisis de parámetros en muestras de Yamora y Viacha.

Comunidad Yamora (provincia Inquisivi)											
Muestra	pH en H <sub>2</sub> O	pH en KCl	CE mS/cm	H-Al mEq/100 g	% MO	% N	Na mEq/100 g	K mEq/100 g	Ca mEq/100 g	Mg mEq/100 g	P /ppm
1	6.75	5.8	0.075	0.0329	3.4	0.28	0.128	0.688	17.761	2.548	273.916
2	6.76	4.98	0.075	0.0609	3.2	0.30	0.128	0.688	17.760	2.577	255.876
3	6.72	5.73	0.068	0.0339	3.3	0.31	0.134	0.688	18.331	2.636	250.994
4	6.76	5.89	0.074	0.0082	3.4	0.32	0.134	0.655	18.674	2.684	257.253
5	6.73	5.89	0.072	0.0329	3.2	0.30	0.134	0.655	17.455	2.518	246.810
6	6.79	5.92	0.068	0.0329	3.4	0.32	0.146	0.655	17.799	2.548	266.998
7	6.79	5.37	0.069	0.0391	3.4	0.30	0.128	0.688	17.874	2.587	253.086
8	6.8	5.84	0.073	0.0329	3.4	0.30	0.134	0.655	17.074	2.450	259.345
9	6.83	6.01	0.072	0.0349	3.4	0.30	0.134	0.655	18.027	2.606	261.420
10	6.82	5.95	0.072	0.0329	3.1	0.30	0.134	0.622	17.341	2.479	275.347

Comunidad de Viacha

Muestra	pH en H <sub>2</sub> O	pH en KCl	CE mS/cm	H-Al mEq/100 g	% MO	% N	Na mEq/100 g	K mEq/100 g	Ca mEq/100 g	Mg mEq/100 g	P ppm
1	8.54	7.13	0.727	0.0934	0.7	0.086	4.663	0.459	5.385	4.008	16.010
2	8.72	7.16	0.732	0.0934	0.7	0.096	5.012	0.491	5.155	4.066	15.870
3	8.78	7.12	0.736	0.1054	0.7	0.101	4.605	0.426	5.042	3.988	18.241
4	8.74	7.11	0.735	0.1054	0.5	0.093	4.605	0.426	5.080	3.988	19.287
5	8.81	7.16	0.737	0.0934	0.6	0.092	4.663	0.426	5.118	4.027	19.845
6	8.78	7.12	0.738	0.1054	0.7	0.091	4.663	0.459	5.118	4.027	20.612
7	8.94	7.01	0.731	0.1091	0.7	0.093	4.605	0.426	5.080	3.959	17.683
8	8.69	6.78	0.733	0.0813	0.6	0.093	4.663	0.426	5.309	3.802	18.241
9	8.49	7.14	0.732	0.0818	0.7	0.093	5.129	0.491	5.233	3.978	18.311
10	8.81	7.14	0.780	0.0813	0.5	0.093	5.246	0.491	4.889	3.939	16.010

**Tabla 2.** Prueba de igualdad de medias para las comunidades (Yamora y Viacha)  
 Prueba de igualdad de medias de grupos

	Lambda de Wilks	F	df1	df2	Sig.
pHenH <sub>2</sub> O	.009	2027.599	1	18	.000
pHenKCl	.103	156.944	1	18	.000
CE	.001	18949.970	1	18	.000
H_Al	.119	133.121	1	18	.000
MO	.005	3591.200	1	18	.000
N	.006	2965.982	1	18	.000
Na	.005	3611.072	1	18	.000
K	.052	325.892	1	18	.000
Ca	.003	6749.675	1	18	.000
Mg	.009	1971.414	1	18	.000
P	.003	6335.476	1	18	.000

La prueba de igualdad de medias (Tabla 2) de ambos grupos indica que existe diferencia significativa entre los valores medios de los parámetros entre las muestras de Yamora y Viacha. Corroborado con los valores bajos de la Lambda de Wilks para cada parámetro se demuestra que, en principio, cualquiera de los parámetros podría utilizarse para clasificar los suelos en ambos lugares. Sin embargo, el propósito es encontrar una función discriminante de combinación lineal de los parámetros más adecuados para la clasificación de suelos. Para esto, se ha realizado el análisis discriminante por etapas con el objetivo de encontrar la función sólo con los parámetros más adecuados.

Los coeficientes de la función discriminante canónica estandarizada nos indican que los parámetros más adecuados considerados en la función discriminante son el N, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y P. Los parámetros que son importantes para definir la fertilidad de los suelos son: pH y MO. Además, otros factores que intervienen en la formación del



suelo incluyen los minerales que contienen cationes de cambio ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ). Estos últimos disminuyen la acidificación del suelo y, con ello, el proceso de descomposición de los minerales [12].

La función discriminante general obtenida para los dos sitios es:

$$D = -18,418 + 118,391 * N - 8,267 * Na + 67,852 * K - 11,752 * Mg + 0,114 * P$$

Mientras que las funciones discriminantes por grupo son:

$$D_{Yamora} = -4971,556 + 10936,736 * N - 553,970 * Na + 5449,136 * K - 206,719 * Mg + 13,873 * P$$

$$D_{Viacha} = -2725,256 - 3502,174 * N + 454,280 * Na + 2826,109 * K + 1226,527 * Mg - 0,023 * P$$

Los resultados de la aplicación de la función discriminante en la clasificación de las muestras en ambos lugares indican que se puede clasificar correctamente las 20 muestras al 100%. Por lo que, la aplicación de estas funciones en la clasificación de nuevas muestras de suelos tiene una alta probabilidad de clasificarlas correctamente. De este modo es posible clasificar los suelos a través de cinco parámetros y la función discriminante, y determinar su fertilidad química.

Por otra parte, se realizó un análisis factorial; en la matriz de covarianza. Se observa altas correlaciones entre las variables, por lo que se procedió a obtener dos factores por el método de extracción de Componentes principales con aplicación de rotación Varimax y normalización Kaiser (Tabla 3), para buscar posibles estructuras de variables o parámetros. La matriz de componente rotado (Tabla 3a), nos muestra que evidentemente existe en esta estructura, un grupo de parámetros que tienen una correlación positiva con los componentes principales, Grupo 1 (CP1) de correlación positiva: pH en KCl,  $\text{Na}^+$ , CE,  $\text{Mg}^{2+}$ , pH en  $\text{H}_2\text{O}$  y H+Al, y otro grupo de parámetros que tienen una correlación negativa Grupo 2 (CP2): N, MO, P,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . Esto lleva a una competencia entre estos grupos de parámetros en el suelo. Si el Grupo 1 se sobrepone al Grupo 2, el suelo tendría altos valores de pH y CE, altos contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y valores positivos de los componentes principales. En cambio, pobre contenido en MO, P y N sería característico de un terreno poco favorable para la agricultura. Sin embargo, si el Grupo 2 de parámetros se sobrepone al Grupo 1, entonces el terreno es rico en MO, P y N, y por tanto, el terreno es más apto para la agricultura y tendría valores negativos de los componentes principales.

**Tabla 3.** Valores de análisis de: a) covarianza y b) componentes principales

a) Matriz de componente rotado

b) Coeficiente de componente principal

	Componente	
	1	2
pHenKCl	0.876	0.461
Na	0.739	0.667
CE	0.728	0.683
Mg	0.723	0.682
pHenH2O	0.711	0.699
H_Al	0.476	0.87
N	-0.71	-0.699
MO	-0.717	-0.694
P	-0.717	-0.693
Ca	-0.718	-0.694
K	-0.725	-0.657

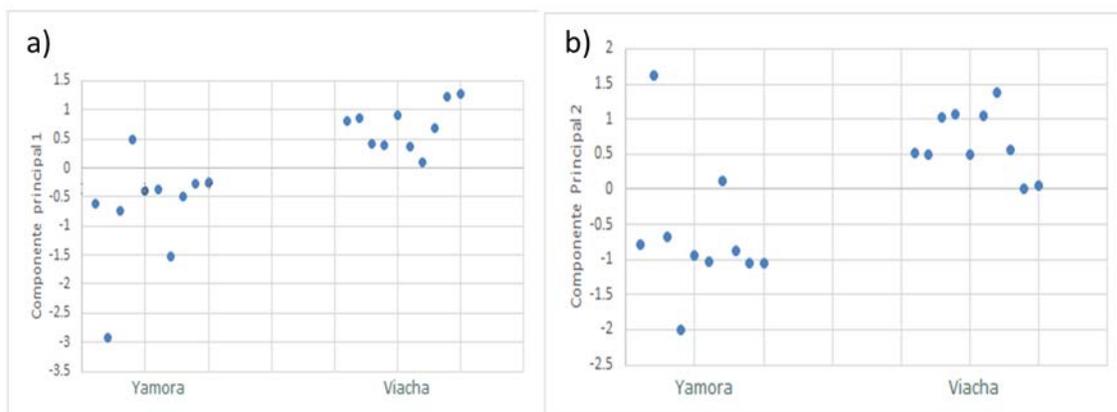
	Componente	
	1	2
pHenH2O	.011	.123
pHenKCl	1.195	-1.122
CE	.106	.024
H_Al	-1.184	1.367
MO	-.041	-.092
N	-.007	-.128
Na	.185	-.059
K	-.174	.049
Ca	-.047	-.086
Mg	.095	.035
P	-.045	-.087

Los coeficientes de los componentes principales (Tabla 3b) y la representación de los componentes para las muestras de Yamora y Viacha se muestran en la figura 2.

Tanto para el primer componente principal (Figura 2a) como para el segundo (Figura 2b) los valores positivos indican que los parámetros pH en KCl,  $\text{Na}^+$ , CE,  $\text{Mg}^{2+}$ , pH en  $\text{H}_2\text{O}$  y H+Al se sobrepone a los parámetros N, MO,



P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ; lo que significa que si los suelos tienen valores positivos de los componentes 1er o 2do, entonces el suelo tiene altos valores de pH, concentración de  $\text{Na}^{+}$  alta, alta CE. Por otro lado, si el suelo tiene valores negativos de los componentes, entonces el suelo es rico en MO, P, N, lo que representa un terreno mucho más apto para la agricultura.



**Figura 2.** Análisis de Componente principal de las muestras de Yamora y Viacha a) primer componente, b) segundo componente

En caso de las muestras de Yamora, su componente principal 1 y 2 es negativo, por lo tanto, este suelo es rico en MO, P y N. Esto indica que es un terreno mucho más apto para la agricultura. En cambio, para las muestras de Viacha los componentes principales 1 y 2 son positivos. Por lo tanto, este suelo se muestra como un terreno no tan apto para la agricultura.

## CONCLUSIÓN

En este estudio, el análisis discriminante encuentra una función de cinco parámetros con una eficiencia del 100% en la clasificación de muestras. Por otra parte, el análisis factorial encuentra una estructura de variables independientes en dos grupos. El primer grupo con correlaciones positivas y el segundo con correlaciones negativas. Los valores negativos de las funciones de los componentes principales indican altos contenidos de materia orgánica, contenido de fósforo, y nitrógeno. Por el contrario, valores positivos indican altos valores de pH, valores elevados en contenido de  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y alta conductividad eléctrica. En el caso de las muestras de Yamora, su componente principal 1 y 2 es negativo por lo tanto este suelo es rico en materia orgánica, en contenido de fósforo y nitrógeno, es decir, es un terreno mucho más apto para la agricultura. En el caso de las muestras de Viacha, los componentes principales 1 y 2 son positivos, por lo tanto, este suelo tiene altos valores de pH, alta concentración de Na, y alta conductividad CE. Por lo tanto, este suelo se muestra como un terreno no tan apto para la agricultura según su fertilidad química. Este trabajo muestra que puede aplicarse un análisis multivariable en la clasificación y caracterización de suelos con propósitos de aplicación en agricultura.

## RECONOCIMIENTOS

Al Ing. Rubén Callisaya por la colaboración en el análisis de textura de suelos, a la Lic. Rocio Choque por la colaboración en los análisis en el instrumento de Absorción Atómica, a la Lic. Heidi Ruth Mamani Tola por la colaboración en los análisis de muestra en el equipo de Espectrofotómetro (UV/visible), a la Lic. Lizangela Huallpara por la colaboración en la elaboración del mapa del área de estudio, Lic. Damián Torrez y Ing. Gabriela Alba Huanca en la colaboración en los análisis de las muestras de suelos.

## REFERENCIAS

1. Martín, N., Adad, Idaybis. Generalidades más importantes de las ciencias del suelo, En Disciplina Ciencias del Suelo, Tomo I. Pedología. Universidad Agraria de La Habana, **2006**, Cuba.
2. Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E. **1997**. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation., *Soil Sci. Soc. Am. J.*, *61*, 4-10.
3. Debelis, S. **2003**. Evaluación de tierras. FCA-UNLZ, Sitio Argentino de Producción Animal, [https://www.produccion-animal.com.ar/suelos\\_ganaderos/15-evaluacion\\_de\\_tierras.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/15-evaluacion_de_tierras.pdf), Access date 03/2011



4. Mamani, R., Gúzman, L., Chungara, J., Ramos R., O. E. **2019**, Evaluación quimiométrica del material de referencia interno (MRI) de suelos agrícolas en dos municipios provinciales de La Paz, *36*(4), 180-189.
5. Karma, A. Chemical properties of organic soils, In: Soil sampling and methods of analysis, Lewis Publishers, Martin R. Carter Editor, **1993**, Canadian Society of Soil Science.
6. Coleman, N.T., Weed, S.B., Mccracken, R.J. **1959**, Cation exchange capacity and exchangeable cations in Piedmont soils of North Carolina, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, *23*, 146-149.
7. Vogel, A. Química Analítica Cuantitativa, Editorial Kapelusz S.A., 2<sup>nd</sup> Edition, **1960**, Buenos Aires, Argentina.
8. Cottenie, A., Verloo, M., Kiekens, L., Velghe, G., Camerlynck, R., Chemical analysis of plant and soil laboratory of analytical and agrochemistry, State University Ghent press, **1982**, Ghent, Belgium.
9. Kaúrichev, I.S., Prácticas de edafología, Editorial Mir, **1980**, Moscú.
10. Wolf, A.M., Y Baker, D.E. **1965**, Comparison of soil test phosphorus by Olsen, Bray P1, Mehlich I and Mehlich III methods, *Comm. Soil Sci and Plant Anal*, *16*, 467-484.
11. Escobar, G., Berdegué, J. Tipificación de sistemas de producción agrícola, RIMISP, **1990**, Santiago de Chile, Chile.
12. Salm, H., Castro, J. **2005**. Propiedades químicas y potencial productivo de los suelos del departamento de La Paz, Bolivia, *Revista Boliviana de Química*, *22*(1), 19-26.