

Estimación del *Porcentaje de Sodio Intercambiable* en función de la *Relación de Adsorción de Sodio* para suelos afectados por sales en el Valle Alto de Cochabamba

Demis Andrade Foronda ¹; Edgar Gutiérrez Rodríguez ²; Gilles Colinet ³

¹ Doctorante AI/ARES-UMSS; ² Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias, Universidad Mayor de San Simón; ³ Gembloux Agro-Bio Tech / Universidad de Lieja (Bélgica)

E mail: dn.andrade@doct.uliege.be

Resumen. Con el fin de desarrollar una alternativa más eficiente en términos de tiempo y costo, para determinar la sodicidad de suelos afectados por sales, el objetivo del estudio fue generar un modelo de regresión para predecir el *Porcentaje de Sodio Intercambiable* (PSI), en función a la *Relación de Adsorción de Sodio* (RAS). A partir de una base de datos, de 84 muestras de suelo del Valle Alto de Cochabamba, se generó el modelo lineal: $PSI = 0.9725 RAS + 1.5765$ ($R^2=0.85$). Posteriormente, a través de un conjunto de 18 muestras y empleando el análisis “prueba T” de muestras pareadas, entre valores del PSI estimado y PSI medido de forma directa, se verificó la eficiencia del modelo generado con un valor de $p = 0.063$ indicando que los valores de PSI estimados, no son significativamente diferentes de los valores de PSI medidos; no obstante, el modelo referencial del *US Salinity Lab* resultó más eficiente ($p = 0.285$). El modelo generado tuvo un mejor ajuste para suelos con $CE < 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y $PSI < 15\%$. Para recomendar el modelo generado, es pertinente incrementar su eficiencia con muestras adicionales, además de estratificar el análisis en función a los niveles de salinidad/sodicidad y textura del suelo.

Palabras clave: Degradación y remediación de suelos; Salinidad; Sodicidad

Summary: *Estimation of the Exchangeable Sodium Percentage as a function of the Sodium Adsorption Ratio for salt-affected soils in the High Valley of Cochabamba.* In order to develop a more efficient cost-time alternative, to determine the sodicity of salt-affected soils, the objective of the study was to generate a regression model to predict the Exchangeable Sodium Percentage (ESP) from the Sodium Adsorption Ratio (SAR). Based on a database of 84 soil samples from the High Valley of Cochabamba, a linear model was generated: $ESP = 0.9725 SAR + 1.5765$ ($R^2=0.85$). Subsequently, through a set of 18 samples and using T-test of paired samples between values of the predicted ESP and directly measured ESP, the efficiency of the generated model was verified with a value of $p= 0.063$, indicating that the predicted ESP values; however the *US Salinity Lab* referential model was more efficient ($p= 0.285$). The generated model had a better fit for soils with $CE < 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ and $ESP < 15\%$. To recommend the generated the model, it is pertinent to increase its efficiency with additional samples, besides to stratifying the analysis according to salinity/sodicity levels and texture of the soil.

Keywords: Soil degradation and remediation; Salinity; Sodicity

Introducción

Los suelos afectados por sales se caracterizan por el exceso de sales solubles

(salinidad) y/o sodio (Na^+) en la fase de solución de suelo, así como en el complejo de intercambio (sodicidad). Las sales y el Na^+ se originan a partir del

material parental, hidrodinámica, mal manejo de suelo y agua, entre otros (Qadir *et al.* 2007). Normalmente, la salinidad se mide a través de la conductividad eléctrica (CE) del suelo, y la sodicidad se determina en función a la concentración de Na^+ , en relación a los cationes divalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) como *Relación de Adsorción de Sodio* (RAS) en solución, o como *Porcentaje de Sodio Intercambiable* (PSI), representados en las ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

Ec. (1):

$$\text{RAS} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{(C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}})/2}}$$

donde C es la concentración en $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$

Ec. (2):

$$\text{PSI} = \left(\frac{C_{\text{Na}^+}}{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}} + C_{\text{Na}^+} + C_{\text{K}^+}} \right) 100$$

donde el PSI se expresa en porcentaje, C es la concentración en $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, y la suma de cationes en el denominador, reemplaza a la *Capacidad de Intercambio Catiónico* (CIC), según la fórmula de Sumner *et al.* (1998). La medición directa del PSI en laboratorio, a través de cationes intercambiables, es laboriosa y costosa en términos de tiempo e insumos, más aún si se incluye la CIC. En ese contexto la modelización o predicción del PSI de forma indirecta a partir de la RAS, es un recurso que ha sido planteado y validado por autores como Harron *et al.* (1983), Seilsepour *et al.* (2009) y probablemente el más difundido, es el formulado por Richards *et al.* (1954) del *US Salinity Lab* (US-SL), a partir de la *Relación de Sodio Intercambiable* ($\text{RSI} = -0.0126 + 0.01475 \text{RAS}$), traducido en la ecuación:

Ec. (3):

$$\text{PSI} = \frac{100 (-0.0126 + 0.01475 \text{RAS})}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{RAS})}$$

Considerando la necesidad de caracterizar los suelos afectados por sales en el Valle Alto de Cochabamba, y de contar con un método accesible para medir la sodicidad, el objetivo del estudio fue generar y validar un modelo predictivo, para estimar el PSI a partir de la RAS del suelo.

Materiales y métodos

De la base de datos de muestras de suelo, colectadas en el Valle Alto de Cochabamba el año 2017, en el marco del estudio realizado por Weber (2018), se tomaron en cuenta 84 muestras (Cuadro 1a) para generar el modelo de regresión; asimismo se consideraron 18 muestras (Cuadro 1b) de una base de datos alterna, para evaluar la eficiencia de dicho modelo.

Los cationes intercambiables cuantificados por espectrofotometría de adsorción atómica (EAA), además del pH, CE y MO para la base de datos del modelamiento (Cuadro 1a), fueron medidos en la unidad de suelos de Gembloux ABT (Bélgica). Los cationes solubles, a partir del extracto de pasta cuantificados por EAA, el pH y la CE, para la base de datos de verificación del modelo (Cuadro 1b), así como la textura de todas las muestras, fueron determinados en el *Laboratorio de Suelos y Aguas* de la FCAyP-UMSS.

La RAS y el PSI medidos en laboratorio, para ambos conjuntos de datos, fueron calculados empleando las fórmulas *Ec. 1* y *Ec. 2*, respectivamente.

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de algunas propiedades físico-químicas de 84 muestras de suelo (a) para generar el modelo y 18 muestras (b) para evaluar el modelo

Propiedades del suelo	(a) Suelo Generación del modelo				(b) Suelo Evaluación del modelo			
	Med.	Min.	Max.	DE	Med.	Min.	Max.	DE
EC _e (dS.m ⁻¹)	2.22	0.17	20.60	3.31	2.88	0.34	31.50	7.19
pH	7.93	6.84	8.97	0.39	7.72	6.92	9.82	0.69
Arena (%)	30.81	4.60	57.46	13.02	28.99	8.75	72.71	14.53
Limo (%)	46.31	23.00	73.46	9.74	44.07	16.33	65.86	13.56
Arcilla (%)	22.88	7.48	65.40	9.69	26.94	5.88	63.54	15.48
MO (%)	1.78	0.50	6.00	1.06	0.85	0.05	2.48	0.80
RAS (cmol kg ⁻¹) ^{0.5}	7.22	0.01	58.40	10.90	17.94	0.50	75.90	22.88
PSI (%)	8.60	0.00	60.97	11.50	13.22	0.20	61.70	19.99

Med.: Media; Min: mínimo; Max.: máximo; DE: Desviación estándar

Para generar el modelo de predicción del PSI estimado, se utilizó la fórmula matemática de regresión lineal:

Ec. (4):

$$Y = b_0 + b_1 x$$

donde:

Y es la variable dependiente (PSI), b_0 y b_1 son los coeficientes beta de regresión lineal para el intercepto y la pendiente, respectivamente, y x es la variable independiente (RAS).

Para evaluar la eficiencia del modelo generado, los valores de PSI estimados con el mismo, empleando la RAS de la base de datos de evaluación del modelo (Cuadro 1b), fueron comparados con los valores de PSI calculados de forma directa para las mismas muestras; empleando la prueba T de muestras pareadas e intervalo de confianza para la diferencia promedio; asimismo con fines comparativos, se evaluó de manera homóloga, el modelo de referencia representado en la Ec. (3).

Tanto para generar como para evaluar el modelo, se utilizó el software R versión 3.5.1 (R Core Team 2019) / RStudio, versión 1.1.463[®], además de planillas electrónicas en Excel[®].

Resultados y discusión

Con los valores de la RAS y el PSI medido, de la base de datos de 84 muestras de suelo, y en base a la Ec. 4, se generó un modelo (Figura 1) para predecir el PSI, representado por la ecuación de regresión lineal:

Ec. (5):

$$PSI = 0.9725 (RAS) + 1.5765$$

El R^2 del modelo (Ec. 5) fue 0.85, y el valor de $p = 0.000$ para la variable independiente, lo cual implica una asociación significativa entre la variable a predecir (PSI) y el predictor (RAS).

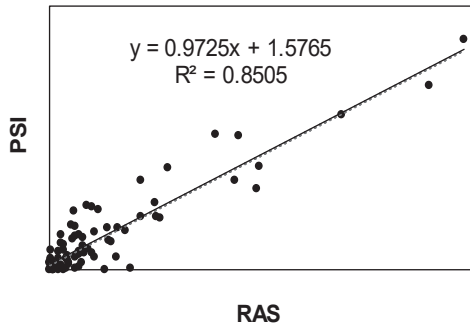


Figura 1. Modelo de regresión lineal para predecir el PSI a partir de la RAS

Según los resultados de la evaluación de eficiencia del modelo con la prueba T de muestras pareadas (Cuadro 2), la media de las diferencias entre el PSI estimado por el modelo generado (*Ec. 5*) y el PSI calculado de forma directa fue 5.82%, el intervalo de confianza (95%) para la diferencia fue -0.35 a 11.98, el valor de $p = 0.063$; indicando que los valores de PSI predichos no son diferentes -con moderada significancia- de los valores de PSI medidos, reflejando concordancia. Este resultado es coincidente con los hallazgos de Seilsepour *et al.* (2009); Elbashier *et al.* (2016 a); Zare *et al.* (2014); y Chi *et al.* (2011).

A partir de la evaluación -comparativa- de la eficiencia del modelo referencial del US-SL (*Ec. 3*), se obtuvo un valor de $p = 0.285$ e intervalo de confianza de -2.65 a 8.47, es decir que los valores predichos de PSI, fueron significativamente no diferentes de los valores medidos; por tanto, resultó más eficiente que el modelo generado. Al respecto, Elbashier *et al.* (2016 b), encontraron que el modelo del US-SL fue más eficiente ($p > 0.05$) que el modelo generado por Seilsepour *et al.* (2009): $\text{PSI} = 1.95 + 1.03 \text{ RAS}$ ($p < 0.05$), para predecir el PSI en muestras con $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$.

Según la línea de igualdad del gráfico 1.0:1.0, entre los valores predichos por el modelo y los valores medidos de PSI (Figura 2), existe un grado de concordancia aceptable ($r = 0.83$), con mayor intensidad para valores estimados con PSI menor al 20%.

Asimismo, en la Figura 3 se aprecian los valores de PSI medidos vs. los valores de PSI estimados con el modelo generado, y vs. el modelo de referencia del US-SL, para cada muestra, confirmando la alta eficiencia de ambos modelos para predecir el PSI en suelos con bajo contenido de Na^+ y sales solubles, y menor eficiencia con suelos saturados de Na^+ ; lo que coincide parcialmente con los resultados de Elbashier *et al.* (2016 b), y a la vez se presume que un modelo de regresión logarítmica puede adecuarse mejor a suelos muy salino/sódicos, acorde con lo evaluado por Chi *et al.* (2011).

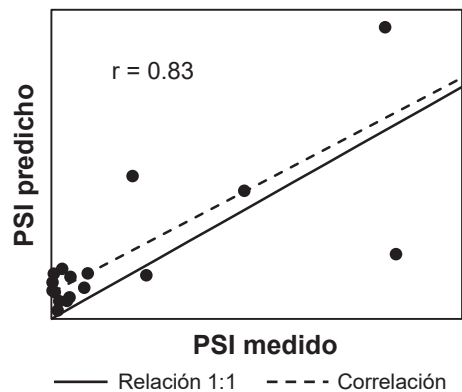


Figura 2. Gráfico 1:1 y de relación entre el PSI medido y el PSI estimado con el modelo generado

Según el enfoque de Bland y Altman (1999), las diferencias entre el PSI estimado y calculado, tienen una distribución normal, ya que el 95% de los valores de PSI estimado, caen entre $5.81\% \pm 1.96 \text{ DE}$ del PSI medido.

Cuadro 2. Análisis de prueba T o de muestras pareadas entre el modelo generado y el modelo de referencia (US-SL) para predecir el PSI

Modelo	Diferencia promedio	DE de la diferencia (%)	EE de la media	Valor de p	IC de la diferencia (95%)
Modelo PSI-RAS generado	5.81	12.40	2.92	0.063	-0.35 a 11.98
Modelo PSI-RAS US/SL	2.91	11.18	2.64	0.285	-2.65 a 8.47

EE: Error estándar; IC: Intervalo de confianza

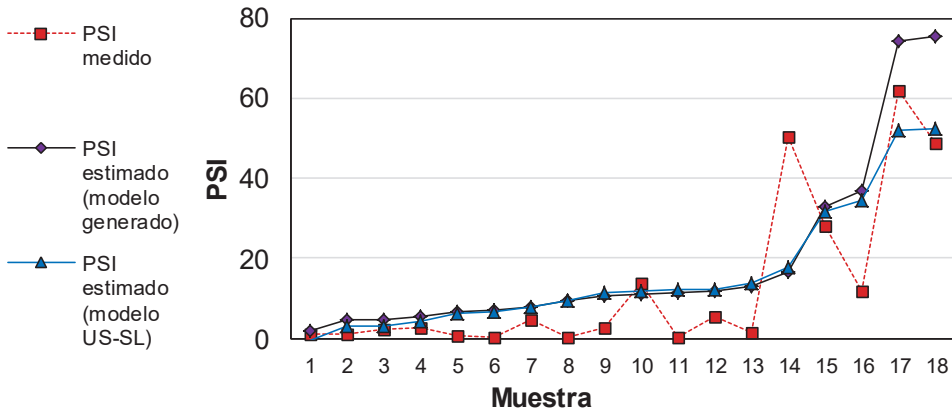


Figura 3. PSI medido vs. PSI estimado con el modelo generado y con el modelo del US-SL

Conclusiones

- El modelo de regresión lineal generado para predecir valores de PSI en suelos afectados por sales del Valle Alto de Cochabamba fue:

$$PSI = 0.9725 RAS + 1.5765$$

$$(R^2 = 0.85)$$
- De acuerdo con la evaluación de la prueba T de muestras pareadas entre los valores de PSI medido y PSI estimado, el modelo generado tiene una eficiencia aceptable (valor de $p = 0.063$) para predecir el PSI; no obstante, el modelo referencial del US-SL resultó más eficiente ($p = 0.285$).
- El modelo generado resultó más eficiente para suelos con $CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$ y $PSI < 15\%$ (suelos no salinos/sódicos, según la clasificación del US-SL).
- Para recomendar el uso del modelo generado, es pertinente incrementar su eficiencia con muestras de suelo adicionales, así como estratificar el modelamiento en función a grados de salinidad/sodicidad y textura del suelo.

Agradecimiento

Al Programa AI ARES Bélgica - UMSS, a Gembloux ABT (Universidad de Lieja) y al Laboratorio de Suelos (FCAYP-UMSS)

Referencias citadas

- Bland J., Altman D. 1999. Measuring agreement in method comparison studies. *Stat Methods Med Res.* Jun; 8(2):135-60. PubMed. *En línea.* Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10501650>
Consultado en enero de 2020.
- Chi C., Zhao C., Sun X., Wang Z. 2011. Estimating exchangeable sodium percentage from sodium adsorption ratio of salt-affected soil in the Songnen Plain of Northeast China. *Pedosphere.* 21(2): 271-276.
- Elbashier M., Shao X., Ali A., Bashir H. 2016 a. Modeling of Soil Exchangeable Sodium Percentage Function to Sodium Adsorption Ratio on Sandy Clay Loam Soil, Khartoum- Sudan. *International Journal of Plant & Soil Science.* 10: 1-6. *En línea.* Disponible en: <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/25389>
Consultado en enero de 2020.
- Elbashier M., Ebrahim M., Musa A., Ali A., Mohammed M. 2016 b. Efficiency of Two Models for Prediction of Exchangeable Sodium Percentage from Sodium Adsorption Ratio on Saline and Non Saline Soil. *Univ. Journal of Agricultural Research* 4.1: 32 - 36. *En línea.* Disponible en: http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=3342
Consultado en febrero de 2020.
- Harron W., Webster G., Cairns R. 1983. Relationship between exchangeable sodium and sodium adsorption ratio in a solonchic soil association. *Can. J. Soil Sci.* 63: 461-467. *En línea.* Disponible en: <https://doi.org/10.4141/cjss83-047>
Consultado en febrero de 2020.
- Qadir M., Oster J., Schubert S., Noble A., Sahrawat K. 2007. Phytoremediation of Sodic and Saline-Sodic Soils. *Advances in Agronomy* 96: 197-247. *En línea.* Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)96006-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)96006-X)
Consultado en diciembre de 2019.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. *En línea.* Disponible en: <https://www.R-project.org/>
Consultado en noviembre de 2019.
- Richards L., Allison L., Bernstein C., Bower J., Brown M., Fireman J., Richards W. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils. United States Salinity Laboratory Staff. Agricultural Research Service. Washington, DC-USA. 169 p.
- Seilsepour M., Rashidi M., Khabbaz B. 2009. Prediction of Soil Exchangeable Sodium Percentage Based on Soil Sodium Adsorption Ratio. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 5 (1): 01-04. *En línea.* Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11038819.pdf>
Consultado en febrero de 2020.
- Sumner M., Rengasamy P., Naidu R. 1998. Sodic soils: A reappraisal. In: 'Sodic Soil: Distribution, Management and Environmental Consequences. pp. 3-17. Oxford University Press, New York.
- Weber A. 2018. Identification des échelles spatiales et des facteurs de variations des sols et de leurs propriétés au sein de la Valle Alto de Cochabamba (Boli-vie). Tesis de Maestría en Bioingeniería. Gembloux Agro-Bio Tech - Université de Liège. Belgique. 122 p.
- Zare M., Ordookhani K., Emadi A., Azarpahan A. 2014. Relationship between soil exchangeable sodium percentage and soil sodium adsorption ratio in Marvdasht Plain, Iran. *Int. Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(12): 2934-2939. *En línea.* Disponible en: http://www.ijabbr.com/article_11601.html
Consultado en febrero de 2020.

Trabajo recibido el 8 de abril de 2020 - Trabajo aceptado el 18 de abril de 2020