

## Variabilidad Estadística y Modelos de Distribución de Probabilidades para las Variables de Consolidación de los Suelos Finos del Valle Central de Tarija, Bolivia

Laura Karina Soto Salgado<sup>1</sup>

[laraksosal@gmail.com](mailto:laraksosal@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-7324-2850>

Universidad Autónoma Juan Misael Saracho  
Bolivia

### RESUMEN

Se ha determinado la variabilidad estadística de las variables más importantes relativas a la consolidación de los suelos finos del Valle Central de Tarija, expresada en términos de algunos indicadores estadísticos, se ha seleccionado el modelo de distribución de probabilidades más apropiado para cada una de esas variables y, con esos modelos, se ha calculado varios percentiles que son útiles para tomar decisiones de análisis o diseño geotécnico.

*Palabras clave:* variabilidad; consolidación; suelos finos; modelo de distribución de probabilidades; percentiles

---

<sup>1</sup> Autor principal.

Correspondencia: [laraksosal@gmail.com](mailto:laraksosal@gmail.com)

# **Statistical Variability and Probability Distribution Models for the Consolidation Variables of Fine Soils in the Central Valley of Tarija Bolivia**

## **ABSTRACT**

The statistical variability of the most important variables related to the consolidation of the fine soils of the Central Valley of Tarija, expressed in terms of some statistical indicator, has been determined, the most appropriate probability distribution model has been selected for each of these variables and, with these models, it has been calculated several percentiles that are useful for making geotechnical analysis or design decisions.

**Keywords:** *variability; consolidation; fine soils; probability distribution model; percentiles.*

*Artículo recibido 15 setiembre 2023  
Aceptado para publicación: 28 octubre 2023*

## **INTRODUCCIÓN**

Está ampliamente demostrado el carácter aleatorio de casi todas las variables representativas de los fenómenos de la Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Es decir, por más homogénea que sea una masa de suelo, es fácil probar que, al tomar varias muestras de la misma, para determinar experimentalmente el valor de una variable, por ejemplo, la resistencia a la compresión no confinada, los resultados serán siempre diferentes. Esto conduce a establecer, con absoluta claridad, que el tratamiento matemático más apropiado para modelar estas variables pasa por el uso de la teoría de las probabilidades, de manera que, cualquier resultado está asociado a un nivel de probabilidad de excedencia o de no excedencia.

Ese carácter aleatorio, de las mencionadas variables conllevan a una incertidumbre, la cual genera un riesgo asociado, a tiempo de realizar diseños geotécnicos.

Por otra parte, tal como mencionan Phoon & Retief (2016), los ingenieros deben estar abiertos a aplicar métodos simplificados (semiprobabilísticos) o enfoques probabilísticos directos para el diseño basados en la confiabilidad RBD (Reliability Based Design). RBD se refiere a cualquier metodología de diseño que aplica principios de confiabilidad, explícitamente o no.

Por otra parte, los métodos estadísticos y probabilísticos se han usado ampliamente en la mecánica de suelos. En el caso de los suelos bolivianos, se tienen los trabajos de Benítez Reynoso, A. (2021, 2019, 2015, 2012, 2010 y 1997).

En ese contexto, la selección y el uso de modelos de distribución de probabilidades juegan un papel importante, tal como refiere Benítez Reynoso, A. (2021). El uso de estos modelos se refleja también en Benítez Reynoso, A. y L.K. Soto (2022) en el caso de las propiedades plásticas de los suelos finos bolivianos.

## **METODOLOGÍA**

Se han extraído 24 muestras de suelo, mediante calicatas de 1 m de profundidad, del Distrito 12 de la ciudad de Tarija (Bolivia), que se encuentra ubicado en el Valle Central de Tarija. Las cuales fueron transportadas apropiadamente al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Una vez realizados los ensayos básicos de laboratorio, se ha procedido a realizar los ensayos consolidación, los cuales están normalizados (ABC, 2007 y Das, 2019).

Posteriormente, se ha procedido a realizar los gráficos y cálculos respectivos, que han conducido a determinar las variables más importantes del fenómeno de la consolidación. Para esto, se ha usado el software Statgraphics (Statpoint Technologies, 2017).

Para la determinación del modelo de distribución de probabilidades más apropiado, para cada variable, se ha empleado dos criterios, a saber: la comparación del histograma empírico con el modelo teórico y la prueba chi-cuadrada (Benjamin & Cornell, 1970; Mendenhall y Sincich, 1997; Walpole, Myers & Myers, 2012; Ang & Tanf, 2007).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Tipos de suelos

Al clasificar los suelos, mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, se ha obtenido los siguientes resultados:

11 muestras corresponden a un suelo CL

2 muestras corresponden a un suelo CL-ML

10 muestras corresponden a un suelo ML

1 muestra corresponde a un suelo MH.

### Variabilidad Estadística

Realizados los ensayos de consolidación, se han estimado las variables, cuyos indicadores estadísticos más importantes se presenta en los cuadros 1 y 2.

#### Cuadro 1

Indicadores estadísticos principales (variables de consolidación)

Indicador	w (%)	e <sub>o</sub>	σ' <sub>c</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	C <sub>c</sub>
n	24	24	24	24
M̄	10,41	0,649	406,25	0,144
DS	3,32	0,084	153,40	0,075
COV	0,32	0,13	0,38	0,52
Min	5,69	0,41	130	0,081
Max	17,7	0,79	670	0,363

**Cuadro 2**Indicadores estadísticos principales (**variables de consolidación**)

INDICADOR	$C_r$	$C_s$	$C_v$ ( $m^2/min$ )	$S$ ( $m$ )
<b>n</b>	24	24	24	24
<b><math>\bar{M}</math></b>	0,0131	0,00029	0,0000186	0,368
<b>DS</b>	0,0045	0,001	0,0000111	0,062
<b>COV</b>	0,35	3,44	0,60	0,17
<b>Min</b>	0,005	0,00001	0,0000094	0,21
<b>Max</b>	0,023	0,005	0,0000540	0,47

En los cuadros 1 y 2:

**n** = tamaño de la muestra o serie estadística de trabajo = 24;

**$\bar{M}$**  = media aritmética;

**DS** = desviación típica;

**COV** = coeficiente de variación;

**Min** = valor mínimo de la serie;

**Max** = valor máximo de la serie;

**w** = humedad de la muestra de suelo (%);

**$e_0$**  = relación de vacíos inicial;

**$\sigma'_c$**  = esfuerzo de preconsolidación ( $kN/m^2$ );

**$C_c$**  = índice de compresión;

**$C_r$**  = índice de recompresión;

**$C_s$**  = índice de expansión;

**$C_v$**  coeficiente de consolidación;

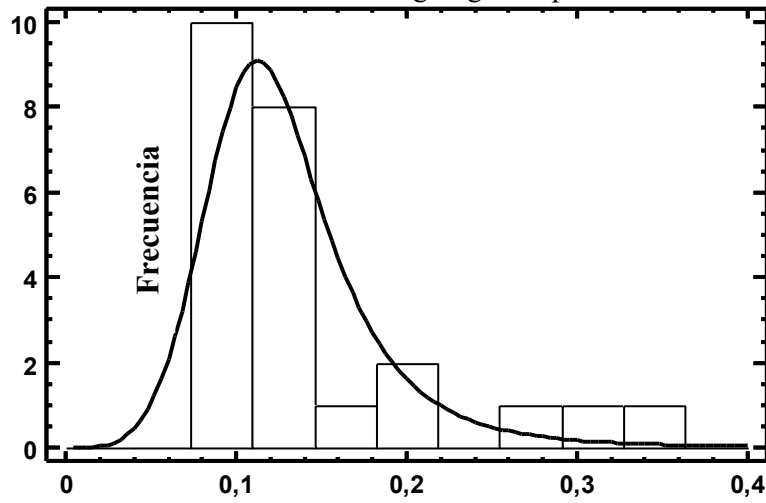
**S** = asentamiento (m).

**Modelos de distribución de probabilidades**

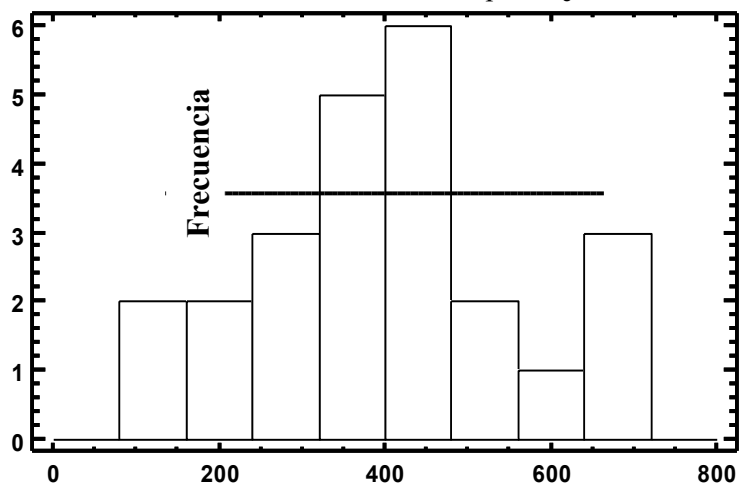
En las figuras 1, 2 y 3 se puede apreciar, a modo de ejemplo, la comparación del histograma empírico con el modelo teórico seleccionado para tres de las variables consideradas.

En tanto que, en el cuadro 3, se presenta el resumen de los modelos para la totalidad de las variables.

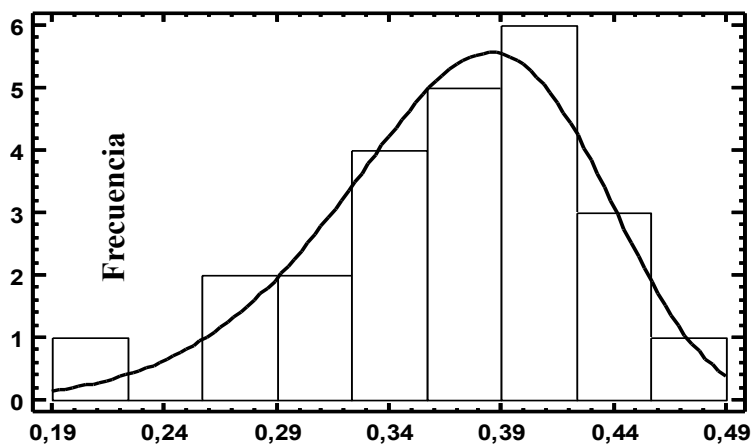
**Figura 1**  
Distribución de Probabilidades Log Logística para  $C_c$



**Figura 2**  
Distribución de Probabilidades Uniforme para  $\sigma'_c$



**Figura 3**  
Distribución de Probabilidades Weibull para S



**Cuadro 3**

Resumen de modelos de distribución de probabilidades (Variables de consolidación)

<b>Variable</b>	<b>Modelo de distribución de probabilidades</b>
w	Uniforme
e <sub>o</sub>	Valor Extremo Más Chico
σ' <sub>c</sub>	Uniforme
C <sub>c</sub>	Log Logística
C <sub>r</sub>	Gamma
C <sub>s</sub>	Log Logística
C <sub>v</sub>	Gaussiana Inversa
S	Weibull

**Percentiles**

El cuadro 4 muestra la estimación de los percentiles 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% y 99% para cada una de las variables estudiadas, mismos que fueron calculados usando los modelos seleccionados en cada caso.

Los percentiles son valores debajo de los cuales se encuentra un porcentaje específico de datos.

Pero, también se pueden interpretar en términos de probabilidades. Así, si se observa el cuadro 4, se tiene que, la probabilidad de que el asentamiento sea menor o igual a 0,29 es igual a 0,10 (10%), o, la probabilidad de que este asentamiento sea mayor o igual a 0,29 es 0,90 (90%).

**Cuadro 4**

Percentiles para todas las variables consideradas (Según su modelo de distribución de probabilidades)

<b>Per (%)</b>	<b>VARIABLE DE CONSOLIDACIÓN</b>							
	<b>w</b>	<b>e<sub>o</sub></b>	<b>σ'<sub>c</sub></b>	<b>C<sub>c</sub></b>	<b>C<sub>r</sub></b>	<b>C<sub>s</sub></b>	<b>C<sub>v</sub></b>	<b>S</b>
<b>1</b>	5,81	0,380	135,4	0,0477	0,0049	0,00000945	0,000005618	0,21
<b>5</b>	6,29	0,488	157,0	0,0669	0,0066	0,00002052	0,000007552	0,26
<b>10</b>	6,89	0,537	184,0	0,0779	0,0077	0,00002915	0,000008913	0,29
<b>25</b>	8,69	0,604	265,0	0,0976	0,0098	0,00004884	0,000011877	0,33
<b>50</b>	11,70	0,662	400,0	0,1220	0,0125	0,00008183	0,000016515	0,37
<b>75</b>	14,70	0,708	535,0	0,1530	0,0158	0,0001371	0,000023057	0,41
<b>90</b>	16,50	0,742	616,0	0,192	0,0191	0,0002297	0,000031026	0,44
<b>95</b>	17,10	0,760	643,0	0,223	0,0213	0,0003263	0,000036906	0,46
<b>99</b>	17,58	0,789	664,6	0,313	0,0258	0,0007085	0,000050489	0,48

Per = Percentil.

## CONCLUSIONES

Las variables de la Mecánica de Suelos, que son medidas (en laboratorio o campo) tiene un comportamiento aleatorio (no determinista). Consecuentemente su tratamiento resulta más apropiado cuando se usa la teoría de las probabilidades.

Los modelos de distribución de probabilidades seleccionados sirven para tomar decisiones y para estimar el riesgo en el diseño geotécnico.

Sin duda alguna, los modelos de distribución de probabilidades constituyen una herramienta importante para el diseño basado en la confiabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC – Administradora Boliviana de Carreteras (2007). *Manual de Ensayos de Suelos y Materiales: Suelos*. Grupo APIA XXI, La Paz.
- Ameratunga, Sivakugan and Das (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Springer, New Delhi.
- Ang and Tang (2007). *Probability Concepts in Engineering – Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Benítez Reynoso, A. y L.K. Soto (2022). Parámetros Estadísticos, Variabilidad y Modelos de Distribución de Probabilidades para las Propiedades Plásticas de los Suelos Finos Bolivianos. *Revista CienciaSur* Vol. 7, N° 9, pp. 23-31, UAJMS, Tarija.
- Benítez Reynoso, A. (2021). *Propiedades Geotécnicas y Mecánicas de los Suelos: Correlaciones y Modelos Matemáticos (Con Énfasis en los Suelos Bolivianos)*. Imprenta Integral S.R.L., Tarija.
- Benítez, A (2019). *Modelos Matemáticos Generales para la Predicción del CBR (California Bearing Ratio) en los Suelos Bolivianos*. *Revista Universitaria de Divulgación Científica “VENTANA CIENTÍFICA”*, Vol. 9 N° 15, pp. 9-24, junio, 2019, Tarija.
- Benítez, A. (2015). *Estimación de algunas propiedades geotécnicas de los suelos mediante análisis multivariado (regresión múltiple) y su utilidad en la Ingeniería Civil: Suelos Finos del Oriente Boliviano*. *Revista INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN* (órgano oficial de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia), N° 5, pp. 36-43. Depósito Legal: 4-3-10-14.



- Benítez, A. (2012). *Propiedades mecánicas de los suelos, correlaciones, modelos matemáticos e implicaciones en la ingeniería vial*. XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 22-26 de octubre, Córdoba.
- Benítez, A. (2010). *Modelos multivariados en la estimación de algunas propiedades mecánicas de los suelos y sus implicaciones en la ingeniería vial*. XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (6 al 9 de octubre) publicación en CD e impresa (libro del Congreso) ISBN: 978-950-42-0129-8, Mendoza (Argentina).
- Benítez, A. (1997). *Modelos matemáticos para la estimación de propiedades mecánicas de los suelos y su aplicación al diseño de firmes*. Los suelos del valle Central de Tarija. Revista Rutas, No. 59 – II época, marzo-abril, pp. 73-78, Madrid, España.
- Benjamin and Cornell (1970). *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. McGraw Hill, USA.
- Bunge, M. (2011). *La investigación científica*. Siglo Veintiuno Editores, México.
- Carrier, W.D. (1985). *Consolidation parameters derived from index tests*, *Géotechnique*, vol. 35, no. 2, pp. 211–213.
- Cozzolino V.M. (1961). *Statistical forecasting of compression index*. In: Proceedings of the 5th ICSMFE, Paris, pp 51–53.
- Carter, M. y Bentley, S.P. (2016). *Soil properties and their Correlations*. John Wiley & Sons, Inc., UK.
- Das, B. (2019). *Advanced Soil Mechanics*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, FL.
- Das and Sobhan (2018). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, Boston, MA.
- Germaine, J. and A. Germaine (2009). *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Gutierrez, R. (1996). *Introducción al método científico*. Esfinge, México.
- Haan, C. T., 1982. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State University Press. Iowa, USA.
- Lambe y Whitman (1999). *Mecánica de Suelos*. Limusa, México.
- Magnan, J.P., 1982. *Les méthodes statistiques et probabilistas en mécanique des sols*. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Mendenhall, W. y Sincich, T., 1997. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Prentice Hall. México.

Phoon, K.K. & Retiev, J.V. – Editors (2016). *Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394*. CRC Press, USA.

Skempton, A. W. (1944). *Notes on the compressibility of clays*. Quarterly Journal of the Geological Society 100: 119–135.

Statpoint Technologies, Inc. (2017). *Statgraphics Centurion 18 User Manual*. USA.

Walpole, Myers y Myers (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Pearson, México.